NAVEGACIÓN

2004

AUTORES

Capitán de Fragata (R)
Ing. Mario de la Caridad Iglesias Campillo

Capitán de Corbeta
Ing. Jorge Martín Ferrer

Capitán de la Marina Mercante
Lic. Ergio González Rebelles

REALIZADORES
Téc. María Teresa Rodriguez Mendoza
Téc. Georgina Martínez Campos
Lic. Cristóbal Morales Quesada
Ing. Alexis López Miranda

DISEÑO DE PORTADA
Lic. Cristóbal Morales Quesada

REVISIÓN
Capitán de Fragata
Ing.Larry Díaz Díaz
1er Oficial de Navegación y Operaciones Navales MGR

COLABORADORES

Capitán de Fragata
Ing. Fidel Calderín Pérez

Capitán de Fragata
Ing. Rafael Alfonzo Hernández

Capitán de Corbeta (R)
Ing. José Roque Aldama

Capitán de Fragata
Ing. Arturo Carballo León

Capitán de Fragata
Ing. Jurgen Fondevila Ayala

Téc. Alberto Garrido Cedeño

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL
O PARCIAL DE ESTA OBRA

© GEOCUBA
© Sobre la presente edición,
Edimar, Agencia de Cartografía Náutica

Estudios Marinos
Punta Santa Catalina Regla.
La Habana, Ciudad de La Habana

ÍNDICE

Pág.

Prólogo……..... -

Historia de la navegación …… I-VII

Capítulo I. Conceptos fundamentales……... 1

1.1 Formas y dimensiones de la Tierra. Orientación del observador en la superficie terrestre……. 3

1.2 Principales puntos, líneas y planos en la esfera terrestre……. 7

1.3 Coordenadas geográficas: latitud y longitud……... 10

1.4 Diferencia de latitud y diferencia de longitud…… 11

1.5 Nociones sobre los radios de curvaturas…….. 17

1.6 La Geodesia y el Datum en la navegación…… 19

1.7 Unidades náuticas de medidas……... 28

1.8 Alcance de visibilidad de los objetos en el mar…… 29

1.9 Distancia de visibilidad de los objetos en la mar……. 31

1.10 Distancia de visibilidad de los objetos indicada en las cartas……. 32

Capítulo II. Determinación de direcciones en el mar…….. 37

2. Sistema de direcciones en el plano del horizonte verdadero…… 39

2.1 Rumbos verdaderos, marcaciones verdaderas y marcaciones relativas……... 46

2.2 Breve caracterización de los equipos utilizados para la determinación de direcciones en el mar……. 49

2.3 Determinación de las direcciones en el mar con ayuda del girocompás……. 50

2.4 Determinación de la corrección del girocompás…….. 53

2.5 Determinación de direcciones con el compás magnético…….. 56

2.6 Declinación magnética……. 60

2.7 Direcciones magnéticas……. 65

2.8 Desvío del compás magnético……. 67

2.9 Direcciones de las agujas……. 68

2.10 Corrección total del compás magnético. Conversión de las agujas en verdaderas y viceversa……. 69

2.11 Determinación del desvío y corrección total del compás magnético……. 71

Capítulo III. Compensación del compás magnético……. 79

3. Compás magnético. Definición……. 81

3.1 Construcción del sistema magnético……. 81

3.2 Momento magnético. Momento giratorio…….. 82

3.3 Sensibilidad y estabilidad de la aguja del compás magnético…….. 83

3.4 Comprobación del compás magnético…….. 84

3.5 Determinación del período de oscilación…….. 85

3.6 Momento de inercia…….. 87

3.7 Momento magnético……. 87

3.8 Revisiones, observación y cuidado……. 88

3.9 Campo magnético del buque…….. 89

3.10 Compensación magnética…… 90

3.11 Correctores utilizados para la compensación del compás magnético…….. 91

3.12 Métodos para la determinación del desvío…… 92

3.13 Métodos para aproar el buque a un rumbo magnético (Rm) dado……... 105

3.14 Compensación del compás magnético…….. 110

3.15 Compensación práctica…… 114

3.16 Compensación del desvío semicircular por el método de Enry y compensación del desvío cuadrantal…… 114

ÍNDICE

Pág.

3.17 Compensación del desvío cuadrantal……. 118
3.18 Métodos para determinar la longitud de la barra Flinders…….. 120
3.19 Métodos prácticos y simplificados para colocar la barra Flinders……. 123
3.20 Cálculo de la tablilla de los desvíos residuales……. 126
3.21 Rectificación de la compensación……... 137
3.22 Desvío de orden superior……. 138
3.23 Construcción racional del dispositivo magnético del compás……. 138
Capítulo IV. Cartas y Publicaciones náuticas…….. 143
4.1 Conceptos sobre las proyecciones cartográficas……... 145
4.2 Clasificación de las proyecciones cartográficas……. 154
4.3 Descripción detallada de las proyecciones cartográficas más utilizadas……... 161
4.4 Proyecciones equivalentes……. 161
4.5 Proyecciones equidistantes……. 162
4.6 Proyecciones azimutales o zenitales……. 163
4.7 Proyecciones cilíndricas……. 165
4.8 Proyecciones cónicas……. 167
4.9 Proyección cilíndrica conforme Mercator……. 169
4.10 Requisitos exigidos en las cartas náuticas……. 171
4.11 La loxodromia y sus ecuaciones en la superficie de la esfera y del elipsoide……. 172
4.12 Ecuación general de las proyecciones cilíndricas……. 177
4.13 Ecuaciones principales de la proyección de Mercator para la esfera y el elipsoide…….. 179
4.14 Variación de la escala en la proyección de Mercator……... 183
4.15 Concepto de paralelo principal……. 185
4.16 Cálculo y confección de las redes cartográficas Mercator y ploteo en ella de los puntos de referencia y otras particularidades……... 187
4.17 Confección de la carta de Mercator dadas las dimensiones del marco……... 193
4.18 Clasificación de las cartas náuticas, guías de navegación y publicaciones……. 196
Capítulo V. Navegación de estima……..... 199
5. Esencia y destino de la navegación de estima……... 201
5.1 Corredera. Principio de funcionamiento…….. 202
5.2 Determinación del espacio recorrido por la velocidad y el tiempo……... 208
5.3 Determinación de la velocidad del buque y la corrección de la corredera……. 210
5.4 Longitud de la corrida (S)……... 211
5.5 Número de corridas……. 212
5.6 Instrumentos de ploteo. Su destino y corrección……. 218
5.7 Solución de las tareas elementales en la carta náuticas…….. 222
5.8 Nociones sobre el giro. Consideraciones del círculo de evolución en el método gráfico de estima……. 229
5.9 Estima gráfica……. 238
5.10 Navegación de estima considerando el abatimiento……. 240
5.11 Métodos principales para la determinación del ángulo de abatimiento……. 243
5.12 Cálculo preliminar del ángulo de abatimiento……... 247
5.13 Tablas y gráficos de los ángulos de abatimiento y las variaciones de la velocidad del buque 249
5.14 Cálculo del abatimiento en la estima gráfica……. 251
5.15 Estima del buque considerando la corriente……. 257
5.16 Influencia de la corriente sobre el buque en movimiento…….. 258
5.18 Solución de tareas típicas en la estima gráfica considerando la corriente……. 262

ÍNDICE

Pág.

5.19 Navegación de estima considerando el abatimiento y la deriva…… 265
5.20 Exactitud de la navegación de estima…… 268
5.21 Apreciación de la exactitud en la estima gráfica del buque…… 270
5.22 Errores vectoriales en la estima originadas por los errores en el rumbo, el espacio recorrido por el buque, la consideración del abatimiento y la deriva…… 272
5.23 Cálculo del error cuadrático medio cuando no existen abatimiento y corriente…….. 274
5.24 Coeficiente de exactitud de estima…… 281
5.25 Dispersión de la discrepancia de estima……... 284
Capítulo VI. Navegación Costera……..... 287
6. Necesidad del control de estima…….. 289
6.1 Parámetros de navegación y sus líneas isométricas…… 289
6.2 Fundamentos de la determinación de la posición del buque……... 295
6.3 Determinación de la posición del buque por dos ángulos horizontales…… 296
6.4 Determinación de la posición del buque por dos marcaciones…….. 303
6.5 Determinación de la posición del buque por tres marcaciones…… 309
6.6 Determinación de la posición del buque por marcación corrida tomadas a uno o dos objetos 316
6.7 Determinación de la posición por distancias……... 325
6.8 Determinación de la posición del buque por métodos combinados…… 331
Capítulo VII. Navegación Electrónica……..... 335
7. Empleo en la navegación de las ayudas electrónicas para determinar la posición del buque 337
7.1 Determinación de la posición del buque con ayuda del radiogoniómetro…… 338
7.2 Ecuación de los isoazimutes…… 341
7.3 Corrección de las radiomarcaciones. Corrección ortodrómica…… 342
7.4 Cálculo y ploteo de las radiomarcaciones…….. 348
7.5 Método para la determinación de las posiciones por radiomarcaciones…… 354
7.6 Búsqueda de la posición más probable en un triángulo de error…… 355
7.7 Particularidades a tener en cuenta para la determinación de la posición por radiomarcaciones a radiofaros aéreos y estaciones de radiodifusión……... 356
7.8 Navegación por radiofaros de enfilación…… 357
7.9 Determinación de la posición del buque cuando se miden radiomarcaciones (radiodemoras) a éste desde una estación costera…….. 358
7.10 Radiofaros que transmiten correcciones diferenciales DGPS (Sistema Diferencial de Posicionamiento Global)……... 360
7.11 Tareas que se resuelven con ayuda de las estaciones de radiolocalización…… 360
7.12 Determinación de la posición con ayuda del radar…… 366
7.13 Determinación de la posición del buque con la ayuda de las estaciones de hidrolocalización 374
7.14 Determinación de la posición del buque con ayuda del sondador…… 382
7.15 Sistemas de radionavegación LORAN-C…… 389
7.16 Proyecto Eurofix…… 404
7.17 Sistema de navegación por satélites (NAVSTAR-GPS)…… 407
7.18 Sistema Global de Navegación por Satélite (GLONASS)…… 422
7.19 Sistema de Navegación por satélite GPS y GLONASS. Utilización integrada del GPS y el GLONASS…… 424
7.20 Fuentes de errores del sistema GPS…….. 428
7.21 Sistemas de Cartas Electrónicas (ECS)……..... 436

ÍNDICE

Pág.

Capítulo VIII. Generalidades de la exactitud de la navegación del buque. Errores casuales y valoración de la exactitud de las mediciones y cálculos…….. 447

8.1 Tipos de observaciones (mediciones) en la práctica de navegación……. 449

8.2 Causas que originan errores. Clasificación de los errores…….. 450

8.3 Propiedades de los errores casuales……. 451

8.4 Conceptos sobre las leyes de distribución de los errores casuales……. 453

8.5 Error medio cuadrático de una medición aislada…….. 458

8.6 Cálculo del error medio cuadrático por mediciones directas……. 460

8.7 Error medio cuadrático de una función……. 464

8.8 Error medio cuadrático del valor medio aritmético en una serie de mediciones…….. 466

8.9 Probabilidad del error medio cuadrático…….. 467

8.10 Conceptos sobre los errores centrales y medios…….. 469

8.11 Cálculo del error límite en la medición y eliminación de fallos……. 470

8.12 Errores en las mediciones de desigual exactitud……. 471

8.13 Errores sistemáticos, su determinación y consideración……. 473

8.14 Conceptos sobre la línea de posición……. 474

8.15 Gradientes de los parámetros de navegación……. 480

8.16 Exactitud de la medición de los parámetros de navegación……. 486

8.17 Error cuadrático medio de la línea de posición……. 490

8.18 Error cuadrático medio en la determinación de la posición del buque por dos líneas de posición……... 492

8.19 Concepto sobre los errores vectoriales y conversión de los errores de las líneas de posición en errores vectoriales……. 495

8.20 Suma de dos errores vectoriales en la elipse de errores……. 497

8.21 Cálculo de los elementos de la elipse de errores……. 499

Capítulo IX. Valoración de la exactitud de determinación de la posición del buque por dos líneas de posición……..... 503

9.1 Valoración de la exactitud de determinación de la posición por dos marcaciones…… 505

9.2 Valoración de la exactitud de la posición obtenidas por observaciones y estima…….. 507

9.3 Valoración de la determinación de la posición por dos ángulos……. 510

9.4 Valoración de la exactitud en la determinación de la posición por dos distancias y por marcación y distancia……. 514

9.5 Valoración de la exactitud en la determinación de la posición por diferencias de distancias obtenidas con ayuda del SRN por impulsos…….. 516

9.6 Valoración de la exactitud de la posición determinada por diferencias de distancias medidas con ayuda del SRN por fases…….. 518

Capítulo X. Valoración de la exactitud de determinación de la posición del buque con más de dos líneas de posición…….. 521

10.1 Búsqueda y valoración de la exactitud de la posición más probable en la figura de errores con la mayor influencia de los errores casuales de las líneas de posición…….. 523

10.2 Búsqueda de la posición más probable en la figura de errores cuando predominan los errores sistemáticos de las observaciones……. 526

10.3 Determinación de la posición más probable en presencia de varias posiciones reducidas a un mismo momento ……. 530

ÍNDICE

Pág.

Capítulo XI. Estima analítica de la derrota del buque…… 535
11.1 Fórmulas y tablas del método de estima analítica de la derrota del buque…… 537
Capítulo XII. Navegación por círculo máximo…… 547
12.1 Derrota ortodrómica…….. 549
12.2 Cálculo de los parámetros de la ortodrómica……... 553
12.3 Trazado del arco de círculo máximo en la carta Mercator y cálculo de los rumbos para la navegación…….. 559
12.4 Navegación por arco de círculo máximo utilizando la corrección ortodrómica……... 564
12.5 Derrota ortodrómica por rumbo inicial…… 566
12.6 Cálculo del rumbo loxodrómico y distancia entre los puntos de salida y llegada……... 574
12.7 Cálculo del rumbo inicial y distancia mediante tablas especiales…… 576
12.8 Navegación mixta o compuesta…… 581
12.9 Navegación por la derrota más ventajosa…… 584
12.10 Cálculo de la derrota ortodrómica mediante el uso de programas de cómputo……..... 585
Capítulo XIII. Navegación en condiciones especiales…… 591
13.1 Generalidades…… 593
13.2 Características de las aguas restringidas…… 594
13.3 Particularidades de la navegación en aguas restringidas…….. 595
13.4 Aspectos que comprende la navegación por aguas restringidas…….. 595
13.5 Determinación de la posición de fondeo…… 606
13.6 Particularidades de la navegación con poca visibilidad…….. 610
Capítulo XIV. Preparación del buque para la travesía……..…. 613
14.1 Preparación y estudio general de la travesía…… 615
14.2 Planificación y estudio detallado de la travesía…… 618
14.3 Preparación de los equipos e instrumentos…….. 626
14.4 Control de la derrota durante la navegación…… 626
14.5 Navegación en condiciones meteorológicas desfavorables…….. 628

PRÓLOGO.

Ediciones Marinas (Edimar) de la Agencia de Cartografía Náutica presenta en su primera edición el Cuaderno de Navegación, cuyo objetivo fundamental es la de dotar a los guardiamarinas de la Marina de Guerra, Mercante y de Pesca en la especialidad de cubierta de un texto de estudio que por su contenido abarca los aspectos esenciales, plasmados en los planes y programas de estudio de los cursos regulares de la asignatura Navegación de la Academia Naval “Granma” sirviendo a su vez como texto de consulta a todos los oficiales de cubierta en las distintas flotas del país.

En la elaboración de la presente obra se tuvieron en cuenta las conferencias y publicaciones confeccionadas durante más de cuatro décadas, así como los criterios y opiniones de los colaboradores y la labor desplegada por el autor, con una experiencia de más de 30 años en la impartición de esta especialidad.

El Cuaderno de Navegación consta de catorce capítulos en cuyos contenidos se abordan los aspectos fundamentales de la navegación marítima.

En los capítulos I y II se expondrán los conceptos fundamentales de la navegación. Las cuestines generales sobre la compensación del desvio del compás magnético se analizará en el capítulo III. En el capítulo IV se estudia los aspectos esenciales de las proyecciones cartográficas y en los capítulos V y VI lo relacionado con la navegación de estima y costera.

El capítulos VII contiene lo relacionado a la Navegación Electrónica. Los capítulos VIII, IX y X trata los aspectos sobre la exactitud en la navegación. La Estima Analítica se expone en el capítulo XI. En el capítulo XII se explica las cuestiones fundamentales sobre la Navegación Ortodrómica y en los capítulos XIII y XIV los principales elementos de la Navegación en Condiciones Especiales y Planificación de la Travesía respectivamente.

Los ejemplos y ejercicios donde aparecen funciones trigonométricas, han sido resueltos utilizando una calculadora científica típica, y en algunos casos se emplearon las tablas (Tablas Útiles a los Navegantes edición P5905 -2002). En la mayoría de estos ejemplos y ejercicios se confeccionaron los gráficos correspondientementes los cuales ayudarán a una mejor comprensión de los mismos.

Los autores agradecerán cualquier opinión o sugerencia sobre esta publicación y le rogamos sean dirigidos a Ediciones Marinas para considerarlos en posteriores ediciones.

HISTORIA DE LA NAVEGACIÓN.

Sobre el origen de la navegación se han formulado diversas hipótesis, casi todas ellas razonables. Según unos, pudo ser la contemplación de algún animal encima de un madero a la deriva por un río. También dentro de esa teoría cabe la posibilidad de una caída al agua o una riada que hiciese de los presuntos ahogados unos navegantes forzosos sobre un tronco salvador, explotando posteriormente en su beneficio esta circunstancia aparentemente adversa. Otros autores mantienen la teoría de que la navegación surgió por un proceso mental que llevó al hombre a inflar un pellejo o ahuecar un tronco, unido esto a una necesidad imperiosa de salvar un obstáculo líquido que se interponía en el natural desenvolvimiento del clan o tribu. Un tercer grupo sitúa el origen en las costas, basándose en la necesidad de un mayor contacto con el elemento líquido y en la cultura superior de los pueblos que viven a orillas del mar. En realidad es imposible sentar una conclusión definitiva, ya que es evidente que el origen de la navegación no fue uno, sino múltiples y que en cada lugar predominaron en su aparición los factores característicos de la zona, clima, cultura, etc., sin olvidar las casuales.

La navegación en la antigüedad. Los datos referente a los fenicios no son todo lo amplio que podía suponerse dada su intensa actividad marítima. En el capítulo de la fábula se dice que **Usoo** construyó una embarcación ahuecando un tronco por medio del fuego.

La situación geográfica de este país, en un terreno pobre, impelía a sus nativos a la navegación y ya Herodoto en sus escritos supone que las naves fenicias llegaban a las costas griegas en tiempos del robo de la hija de Inaco, si bien el comercio marítimo no adquiere un desarrollo apreciable hasta pasada la conquista de Palestina por los judíos. En sus andanzas no se limitan a la estricta navegación costera próxima, sino que poco a poco se van aventurando y llegan a Chipre, Rodas, Sicilia, Cerdeña y España. Las columnas de Hércules no son un obstáculo para ello y no se descarta la posibilidad de que llegasen al Cabo de Buena Esperanza. Lo que sí es cierto, es que fue un pueblo con un sentido comercial tan desarrollado, que todo su interés estaba centrado en mantener el secreto de sus viajes y conocimientos náuticos que les permitían, con objeto de que nadie les pidiese hacer la competencia. Esta es la razón de que haya muy pocas noticias y sólo se sabe que sus embarcaciones mercantes (las había también de guerra) eran sólidas y estaban provistas de remos y velas, llevando normalmente más de un timón (espadilla). No solían aventurarse con mal tiempo y se mantenían, siempre que podían, a la vista de la costa, fondeando al anochecer si se trataba de una región desconocida o peligrosa. El remo era el medio de propulsión habitual, y usaban de la vela con vientos favorables, desconociendo las viradas. Se fondeaba con grandes piedras y posteriormente se utilizaba un ancla de madera rellena de plomo y con un solo brazo que más tarde pasa a ser de hierro y se le añade el segundo brazo. Sus conocimientos astronómicos provienen de los caldeos, usando primeramente para orientarse la Osa Mayor, que luego fue sustituida por la Osa Menor y dentro de ella por la Polar, que dado el tiempo transcurrido es difícil fuese la que se conoce como tal en la actualidad, siendo posiblemente Kochab.

Los egipcios no se distinguieron por sus aficiones marineras y dejan a la posteridad únicamente algunos viajes en busca de la mirra y el incienso, pero Sesortres y Psamético dieron notables impulsos a sus flotas mercantes. Los griegos heredaron los conocimientos náuticos de los fenicios y se atribuye a Tales de Mileto (640 AC), según Diógenes Laertes, y a Foco de Samos, según otros historiadores, la paternidad de un escrito que versaba sobre astronomía náutica y en que se mensionaba la piedra imán. También es citado Tales por Estrabón, como el que enseñó a orientarse por la Osa Menor. Supusieron que la estrella Polar estaba fija en el polo y fue Piteas de Marsella quién aclaró este punto, deshaciendo el error. Conocían la división del horizonte en cuatro puntos cardinales y dibujaban mapas en los que a Hiparco le corresponde la idea de situar los lugares en la tierra por latitudes y longitudes, contando esta última por partes del ecuador y fijando el meridiano origen en las islas Afortunadas (Canarias).
En el imperio romano la profesión de marino era considerada como una de las más bajas y únicamente

con motivo de las guerras púnicas se levantó un poco el papel de la misma, sin que pudiera compararse con las de guerrero y agricultor, que eran las más consideradas. Con ellos hace su aparición el "odómetro" anticipo de la corredera, que contaba en esencia de una rueda de madera de unos 35 cm de diámetro con unas paletas también de madera y dispuesta de tal forma en la parte exterior del buque, que éste en su movimiento la hacía girar, transmitiéndose este movimiento por un sistema de ruedas a un tambor situado dentro y que por cada giro de la rueda dejaba caer una piedra, permitiendo así deducir por el número de ellas en un intervalo de tiempo, la velocidad del buque. También se presta gran atención a los fenómenos atmosféricos, vuelo de pájaros y a los peces, formándose una especie de meteorología náutica empírica de la cual quedan todavía muchos vestigios entre la gente de mar y pescadores. Se tienen noticias del empleo del escándalo que recibía los nombres de "bolis", "catapirates" y "contos", siendo manejados por los " talasometras". Las expediciones en las que se conquistan las Galias y Gran Bretaña les hace fijarse en los fenómenos del flujo y reflujo, poco destacados en el Mediterráneo. Coincidiendo con Roma e Italia y hasta su destrucción; mantuvo Cartago dignamente la herencia fenicia, eficazmente ayudada por los habitantes de la costa de Andalucía, afamados pilotos y expertos navegantes. De esto son buenos exponentes las expediciones de Hannón hacia el Sur, costeando África y dejando a la posteridad el recuerdo del famoso periplo, y la de Himilcón (360 AC) hacia poniente y septentrión costeando Europa.

Al hacer este breve relato no se puede dejar de mencionar la contribución alejandrina que se manifiesta de diversas formas, algunas de ellas tan interesantes como el primerfaro del mundo situado en Alejandría, cuya construcción fue iniciada por Ptolomeo Sóter y terminada en el primer año de reinado de Ptolomeo Filadelfo . Las empresas bélicas de Alejandro en la India trajeron consigo un aumento notable del comercio con aquellos remotos países y de la repetición de los viajes se llegó al conocimiento de los vientos monzónicos y del efecto de las mareas. En América hay vestigios de que la navegación era conocida mucho antes que su descubrimiento teniendo un desarrollo notable en la parte noroeste del continente septentrional y en el Caribe, mientras que en América del Sur (Atlántico) no se pasó de primitivas embarcaciones o balsas fluviales.

Actualmente está en estudio y discusión la probabilidad de una navegación de los indígenas en las costas de Perú y Ecuador hasta las islas polinésicas, pero por los medios y circunstancias en que parecen tuvieron lugar se deduce que la navegación; como tal ciencia, tuvo poca o nula intervención en la empresa.

Invasión de los Bárbaros. La cuna de la civilización y de la cultura que radica en el Mediterráneo sufre un rudo golpe en el siglo IV de nuestra era con la invasión de los bárbaros, y el arte de la navegación y los conocimientos relacionados con ella sufren también las consecuencias sin progresar nada. La existencia de las antípodas (mundo desconocido) es negada a finales del siglo IV al igual que lo hace San Agustín en el V. El mar infunde pavor e incluso se mantiene la teoría de la imposibilidad de la navegación. Esta época de estancamiento y retroceso dura cinco siglos, hasta el IX, en que florece de nuevo.

Esta idea de conjunto no quiere decir que no hubiera pueblos en los que no se siguiese en el tono anterior o incluso progresase, pero se trata mas bien de situaciones locales y sin repercusiones decisivas en el resto de la humanidad conocida. Como ejemplo típico además de los genoveses y pisanos, están los venecianos, que obligados a vivir en las lagunosas islas del Adriático fundan la ciudad y crean una flota con la que mantienen un activísimo comercio, fletando sus buques y tripulaciones a los países beligerantes con los que obtienen pingues beneficios.

Los Vikingos. Esta denominación corresponde al pueblo que habitaba en las costas del noroeste de Europa y de las cuales son actualmente descendientes los noruegos, suecos y daneses. Así como en Roma y Grecia la profesión de marino no era muy estimada, entre ellos era la de más categoría y

acreditaban esto con arriesgadísimas navegaciones con toda clase de tiempo. Por los relatos de la época, se sabe que a mediados del siglo IX (861) llegó a Islandia Nadod, encontrando en la isla campanas y otros objetos sagrados que son atribuidos a expediciones anteriores y también a botín abandonado por piratas que arribaron a sus costas. En el año 983, Erik el Rojo, descubre Groenlandia, "el país verde" y posteriormente, en el año 1000, su hijo Leif arriba a las costas de América. Estas navegaciones, independientemente del grado de perfección marinera que suponía en las tripulaciones, indica que debían tener conocimientos astronómicos, si bien poco o nada de éstos han pasado a la posteridad, al igual que sus descubrimientos no beneficiaron a la humanidad, quedando relegados o pronto al olvido. Según referencias de la Edda, al igual que las sagas de Torsten Vikingson, conocían el arte de ceñir, aunque en otros escritos posteriores se indica que fondeaban si los vientos no eran favorables.

Los árabes y judíos en España. Cuando invadieron la Península (711) hubo un período, de aproximadamente de un siglo de duración, en el que no se verifica ningún aporte extraordinario a la náutica, pero después, una vez firmemente establecidos, empiezan a cultivar las ciencias, entre ellas la astronomía. Durante el reinado del califa Hixem II (976 -1013) destaca Almanzor, no sólo por sus éxitos militares, sino también por corresponderle la iniciativa de mandar a traducir al árabe el Almagesto de Ptolomeo (327) del que Alfergan extracta unos elementos de astronomía que posteriormente son transformados y corregidos por Albagtenio y en el siglo XI por Arzochel (tablas toledanas), árabe, español. Son también notables los trabajos y traducciones hechos por Thebith, Alhacen y Averroes. De lo anterior se puede inferir, que se trata más bien y casi exclusivamente de traducciones y recopilaciones que de obras originales, pero estos esfuerzos al recordar y mejorar en muchos casos los conocimientos olvidados, sirvieron de base para el impulso y renacimiento de la navegación que se encontraba en un estado semiolvidado.

Los judíos españoles que vivían en Andalucía siguieron el ejemplo de los árabes y que cultivaron mucho, entre otras ciencias, los trabajos astronómicos y efectuaron numerosas traducciones del hebreo y del árabe al castellano. Con todo eso se fue fomentando en los reinos de Castilla y León, un ambiente muy propicio que alcanza su mayor expresión con Alfonso el Sabio que reune 50 sabios (según otros sólo fueron 10) y bajo su dirección, después de cuatro años de trabajo publica las famosas Tablas Alfonsinas, que rectificadas poco después, sirven durante casi dos siglos de norma para los trabajos astronómicos y de náutica astronómica.

Por esta época los marinos vascongados ya destacaban y lo mismo ocurría con los catalanes y mallorquines, siendo imprescindible destacar, al sabio balear y genio de su época, Raimundo Llull, contemporáneo de Alfonso X que publica su Arte de Navegar, inventa un astrolabio, trata de las mareas y menciona ya en sus escritos la aguja magnética.

Sobre la aparición de la aguja existen diversas teorías completamente distintas unas de otras, tanto en cuanto a su procedencia como a la fecha origen de la misma.

Según algunos escritores y científicos ésta la sitúan entre los griegos y romanos, así como otros, con un espíritu patriótico muy loable, aunque un tanto apasionado, le dan paternidad francesa, inglesa, alemana, etc. Lo más probable, sin que esto esté rigurosamente comprobado, es que uno de los posibles y varios caminos de introducción en Europa de la aguja fuesen los árabes, que lo recibieron de los indios y estos a su vez de los chinos, que parecen ser los que cuentan con referencias más antiguas de las propiedades de la "piedra imán". Hay noticias concretas de que a mediados del siglo XII ya era empleada y se generaliza su uso antes de finales del siglo XV. En 1302 Flavio Gioia, natural de Amalfi (Nápoles), ideó un sistema que permitía a la aguja girar con libertad, eliminando la fricción y manteniéndola en posición horizontal a pesar del balanceo del buque. La armazón con que se lograba esto estaba constituido por una cajita de boj (bosso en italiano) y de aquí, por el continente recibió el nombre de bossola

y de esta palabra se derivan la castellana brújula, la francesa boussole, etc., empleada para designar a la aguja imantada. Su aparición y generalización entre los navegantes es el mayor progreso náutico - científico de todos los tiempos y dio un impulso fundamental a la navegación en todas sus manifestaciones. El surgimiento de la aguja náutica trajo como cosecuencia otros avances que mejoran considerablemente el estado de atraso en que se encontraba la navegación.

El uso de las cartas, aunque no se generaliza, se empieza a conocer, entrando en disputa los mallorquines y catalanes con los italianos naturales de Pisa, Amalfi, Génova y Venecia en la producción de éstas. Su antigüedad en el uso a bordo no es tanta como algunos pretenden, y este error viene posiblemente de confundir las cartas marítimas, propiamente dichas, con las exclusivamente geográficas y también con las instrucciones escritas para la navegación, que se conocían igualmente como “cartas”. El procedimiento seguido para su dibujo consistía en seleccionar el trayecto de los marinos (rumbos magnéticos y distancias estimadas que los capitanes o patrones entregaban a su regreso. Cuando se consideraba que habría suficiente número de datos se procedía a dibujar la carta o portulano, completando la línea de la costa con más buena voluntad que acierto en muchos casos. Como documentos auténticos de esta clase se pueden citar algunos de principio del siglo XIV, entre ellos los atlas de Pedro Vesconte, fechados en 1318.

De los anteriores, si bien se atribuye a Fammar Luxaro uno del XII, no hay indicación de la fecha en los mapas de su atlas hidrográfico. La construcción de cartas se orienta de dos formas distintas de las cuales una, a la que responden a las anteriores citadas, carece del reticulado de grados y que si posteriormente se les añadió al margen, fue en escala especial y bastante inexacta. Se utilizaron mucho en el Mediterráneo y subsistieron hasta pasada la primera época del descubrimiento del nuevo mundo. Las otras llamadas planas, suponen un avance a pesar de sus inconvenientes derivados de que la proyección empleada, del tipo cilíndrico centrográfico, no conservaba sus dimensiones reales de los paralelos. Hacia a mediados del siglo XVI, el alemán Gerardo Kremer, más conocido por el nombre latinizado de Mercator, dándose cuenta de los errores de antes señalados inventa un nuevo tipo de proyección en el que quedan corregidos, y publica en 1569 su primera carta esférica con latitudes aumentadas, luego perfeccionada por Eduardo Wright (1594). En la actualidad es la comúnmente usada y la única modificación posterior consistió en tener en cuenta el radio de la tierra según las latitudes, que en las primeras era considerado uniforme.

Al infante D. Enrique de Portugal (1394 – 1460) le corresponde una gran contribución al progreso de la ciencia náutica. En Sagres reunió un nutrido grupo de cosmógrafos, astrónomos, matemáticos y navegantes que trabajaban bajo su personal dirección. Numerosas empresas, trabajos y descubrimientos fueron llevados a feliz término y son el comienzo del formidable impulso colonial portugués. A la cartografía le dedica mucha atención y merece citarse la colaboración del mallorquín maestre Jacome “hombre muy instruido en el arte de navegar que hacía cartas e instrumentos” y que fue llevado allí hacia el año 1415. Los globos terráqueos, que también se empleaban a bordo, hacen su aparición a finales del siglo XV y son utilizados, entre otros, por Colón y Magallanes, perdiendo importancia su uso cuando se generalizaron las cartas esféricas.

Desde la antigüedad ya eran conocidos algunos instrumentos náuticos antiguo, como el Gnomon, que se supone que ya usado por egipcios; consistía en una varilla o palo vertical, cuya altura junto con la longitud de la sombra proyectada daba los catetos de un triángulo rectángulo que servía para calcular la altura del sol; este aparato fue mejorado posteriormente por Aristarco y se utilizaba para obtener la latitud, si bien sus resultados eran bastante erróneos. Los árabes introducen en España el trinqueto y el astrolabio, que se transforma de astronómico en náutico. Durante el reinado de Alfonso X el Sabio es incorporado a los usos náuticos el cuadrante, que es análogamente a lo anterior, aportación árabe.

Posteriormente se generaliza el uso de la ballestilla, que, aunque de menor perfección, tiene buena acogida, siendo mencionada en todos los tratados, entre ellos en el Regimiento de Navegar de Medina (1553).

El descubrimiento de América y los Grandes Viajes.

A finales del siglo XV, España, Portugal se encontraban en un momento histórico propicio para grandes empresas y aventuras. Los resultados de esa inquietud no se hacen esperar y se manifiestan en forma del más grandioso descubrimiento de todas las épocas que independientemente de su transcendencia histórica y universal, había de impulsar definitivamente a la navegación dándole su verdadera categoría de elemento primordial del comercio y relación entre pueblos. Cristóbal Colón, nacido, según las versiones más autorizadas, en Génova, firma las capitulaciones de Santa Fe el 17 de abril de 1492 y se hace a la mar desde Palos el 3 de agosto del mismo año, dispuesto a llegar al continente asiático por occidente. El 12 de octubre de 1492 descubre tierras de lo que hoy es América y regresa a España el 15 de marzo de 1493, realizando posteriormente otros tres viajes en lo que explora y toma posesión de nuevas islas y territorios del continente. En Portugal, donde reina don Manuel el Afortunado (1495 - 1521), siendo Vasco da Gama quien abre, en un memorable viaje (1497 - 1499), el camino de la India doblando el Cabo de Buena Esperanza y arriba a Calicut el 4 de mayo de 1498. En el año de 1500 una flota de 13 navíos al mando del Alférez Cabral zarpa de Restelo con idéntico objeto, pero a causa de tiempos adversos arriba a las costas de Brasil y aunque después prosiguen viaje, toman posesión de aquellas tierras, compartiendo así con España el total dominio del nuevo mundo. El coronamiento de todas estas empresas y otras muchas realizadas en condiciones de hoy es difícil de concebir, culmina con la vuelta al mundo iniciada el 20 de Septiembre de 1519 por Hernando de Magallanes al mando de 5 naves y terminado por una sola, la Victoria el 7 de Septiembre de 1522 capitaneada por Juan Sebastián Elcano que asumió el mando de la expedición por muerte del primero a manos de los indígenas en el islote de Mactán, junto a la isla de Cebú. Este viaje, navegando hacia occidente, comprueba definitivamente la esferidad de la tierra y abre nuevos caminos al comercio y a la civilización. La relación de expediciones análogas sería interminable pero sí conviene resaltar que a partir de este momento ya existe un verdadero aliciente para la navegación, y que la razón de sus desmesurados progresos en sólo 450 años hay que buscarla en aquellos arriesgados y heroicos navegantes que abrieron los caminos de la mar.

Instrumentos ópticos. Hay una tendencia general a mejorar la situación obtenida a bordo, derivada de la mayor importancia de las navegaciones. Esto se traduce e un perfeccionamiento de los cronómetros , de los sistemas de trabajar las alturas y de los aparatos con que éstos se median. El instrumento más usado con anterioridad al octante de reflexión, fue el cuadrante de Davis, que se empleó desde el siglo XVII desplazando el astrolabio y siéndolo a su vez por el octante de John Hadley fabricado en 1731, y a quien se le considera como el inventor de los instrumentos de reflexión. Unos veinte años después se había transformado en sextante, y todos los esfuerzos de los constructores van dirigidos a mejorar las condiciones de solidez, exactitud de la graduación y confiabilidad del sistema óptico, cosas que se consiguen en un plazo relativamente breve, destacando en ello los técnicos y operarios ingleses. Como ciertas anormalidades en las situaciones solo eran explicables considerándolas debida a factores extraños al aparato, se investiga sobre ello y al matemático holandés Willibold Snnellius se le atribuye la invención de las leyes de la refracción, también asignadas por otros al francés Descartes, debiéndose las primeras tablas de refracción aceptables al italiano Cassini quién junto a Piccard observaría que sus valores cambiaban con las horas del día y las estaciones. La teoría del sextante se menciona por primera vez por Bohnemberger en 1775 y hay un trabajo posterior, muy meritorio, **sobre este asunto** y los errores debidos a las posiciones de los espejos escritos por Enke en la crónica astronómica de Berlín, de 1830. Otros instrumentos de reflexión son el círculo de Borda y el círculo de reflexión dado a conocer en 1850 por los alemanes Pistor y Martins. Numerosas innovaciones, modificaciones y estudios fueron realizados tanto sobre el aparato como sobre la teoría de reflexión. Entre los primeros se destacan

Richardson que incorpora al anteojo un nivel de agua con objeto de lograr la perfecta horizontalidad del eje óptico del anteojo; Laurent que propone la adopción de anteojos en lugar de los cilíndricos, Caleb Davis con una modificación en el lembo y sistema micrométrico del mismo y finalmente A. B. Amici que inventa el círculo para la medición de ángulos muy grandes.

Entre los segundos son notables por sus trabajos Laplace, Berssel, Plana, Gylden y Kowalski entre otros. En la actualidad el grabado de la graduación en el sextante, instrumento consagrado, ha llegado a un alto grado de perfección; los materiales que se emplean so ligeros a la par que sólido; en los anteojos las cualidades ópticas son las máximas compatibles con el tamaño, y en resumidas cuentas se puede decir que se trata de un aparato perfectamente logrado y que responde a las necesidades de su uso. La navegación aérea ha impuesto otro tipo de sextante, llamado de burbujas o nivel, es el que no se utiliza el horizonte para efectuar el tangenteo del astro sino que se hace coincidir éste con una burbuja que mediante un dispositivo se hace aparecer en el campo del anteojo. Su exactitud, como es de suponer, es inferior a la de las corrientes, pero es suficiente para la navegación aérea. Para mejorarlos en este aspecto, suelen ir provistos de un mecanismo promediador que da automáticamente la lectura promedio de un cierto intervalo de tiempo, durante el cual se ha verificado una serie ininterrumpida de tomas de alturas. Estos aparatos que tuvieron sus predecesores en varios ensayos realizados en la marina, entre ellos el original del sextante giroscópico, se fabrican también de tipo naval para observaciones de noche sin horizonte.

La navegación submarina. Esta es el fruto de una serie de ensayos y perfeccionamientos sucesivos iniciados con el Turtle de Bushnell (1776) y seguidos del Nautilus de Fulton en 1801 y el Ictíneo (1858) de Monturiol de casco doble. El primer buque de este tipo con propulsión eléctrica es el Gymnote, de Gustave Zédé (1888) seguido poco después del muy perfeccionado de Isaac Peral. Como arma militar se revelan en la Primera Guerra Mundial, volviendo a actuar intensamente en la Segunda, siendo por sus características especiales inadecuados para fines pacíficos o comerciales).

Estado actual de la Náutica. Las irregularidades observadas en la orientación de la misma aguja a diferentes rumbos y en distintos emplazamientos dentro del buque, expuestos por el francés Guillaume Denis en 1666, fueron comprobadas por otros posteriormente, y se les buscó una explicación que en principio no fue satisfactoria. La introducción del hierro y de acero en la construcción naval aumentó las dificultades, y hasta principio del siglo XIX no se logró sentar una teoría completa y razonable sobre la desviación de la aguja, que fue seguida del estudio de la anulación de estas anormalidades, base de la actual teoría de la compensación. El dromoscopio, el desviador Thomson y el de Peichl, el deflector de Colon etc., siguen utilizándose y pertenecen en realidad a nuestra época, siendo instrumentos auxiliares de gran utilidad en los trabajos del desvio de los compases magnéticos. Esta constante preocupación por la exactitud del rumbo en los buques se tradujo también en innovaciones en la fabricación de las agujas en las que las rosas se hacen más ligeras, los imanes se reparten simétricamente y se subdividen, se inventa la aguja de líquido, etc. En la actualidad las condiciones de sensibilidad y estabilidad son notables y se han llegado a producir agujas magnéticas con repetidores que a distancia, al igual que las giroscópicas, indican el rumbo de la magistral. El giróscopo, perfectamente estudiado en mecánica, hace su aparición en los buques a principio del siglo XX y su uso es múltiple, pues lo mismo se utiliza en las direcciones de tiro de los buques de guerra, que actúa como estabilizador en los grandes transatlánticos o resuelve el problema del rumbo verdadero, sin correcciones por declinación magnética y desvío, bajo la forma de compás giroscópico (girocompás) de universal empleo. La última palabra en esta materia parece que la tiene el compás electrónico en vías de ensayo, que consiste en un rayo catódico emitido verticalmente utilizando una corriente de 200 voltios. La desviación que sufre por la acción del campo magnético terrestre, se utiliza para determinar la posición del punto cardinal este, y por consiguiente para conocer el rumbo. Sobre el cronómetro se prosiguen los estudios y se descubre el efecto de perturbación en la marcha debido a la proximidad de hierros magnéticos, realizándose numerosos in-

tentos para expresar con fórmulas las alteraciones en su funcionamiento. Aunque no estén generalmente aceptados, se emplean para determinados usos cronómetros que marchan con tiempo sidéreo, muy adecuados para observaciones de estrellas. El descubrimiento de la telefonía sin hilos simplifica enormemente la corrección de la hora por el adelanto o retraso, llamado movimiento, pues varias veces al día, y por distintas emisoras se dan señales que permiten corregir el estado absoluto. La meteorología marítima adquiere **carta de naturaleza** con el norteamericano Maury, verdadero creador de la navegación oceánica. Para ello recogió durante muchos años las anotaciones y observaciones de los capitanes de los buques, labor que iniciada aproximadamente en 1842 permitió poco después la publicación de las Win and Current and Sailing Direction. El éxito de estas cartas y publicaciones análogas fomenta el estudio de la meteorología náutica, y a finales del siglo XIX, es raro el país que no cuenta con observaciones y servicios dedicado a este objeto.

Actualmente y por diversas estaciones se efectúa la radiación de previsiones de tiempo y, al igual que se localiza y señala continuamente la posición geográfica de los hielos flotantes, se hace con los huracanes que azotan determinadas regiones. La navegación por círculo máximo ganó en importancia al generalizarse las derrotas oceánicas y se construyen tablas que facilitan el cálculo, siendo de las primeras las debidas a Towson, Labrosse y Friesach. Otra solución se buscó en el empleo de la proyección Polar estereográfica, atribuyéndosele a Knorr el tratado de las primeras. Las cartas editadas en Washington, en 1881, en proyección gnomónica y que abarca el Atlántico Norte representan la solución gráfica más cómoda, siendo todavía, las de este tipo, las más utilizadas para la navegación ortodrómica El estudio formal de las mareas lo inicia Newton partiendo de varios supuestos que conducen a resultados bastante distinto de la realidad, pero que sirven de base para trabajos posteriores de otros sabios e investigadores, siendo Laplace quien define las mareas como una variante de los fenómenos ondulatorios. Lagrange determina la velocidad de propagación de las ondas y posteriormente Russell Bazin establecen nuevas fórmulas, teniendo en cuenta, además, la altura de la ola por encima del nivel usual. El problema de producción de las mareas es abordado por Airy Whewel, Lubbock, Fitzry y otros, hasta que en 1862, sin Wiltrain Thomson (lord Kelvin) estudia el análisis armónico de las mismas seleccionándolo completamente y construyendo el primer **predíctor** de mareas. Van ler Stok establece su clasificación en 4 tipo y el hidrógrafo Harris jlo justifica en el fenómeno de la resonancia. La profundidad del mar, dato muy interesante para el navegante (sobre todo en las proximidades de las costas y de los puntos de recaladas), que figura en las cartas náuticas, ha sido objeto de notable atención y perfeccionamiento en cuanto a sus procedimientos de obtención. El primitivo escandallo es sustituido por el mecánico con fina sondaleza de cable de acero y tambor graduado en metros que indica la longitud de salida.

A estos escandallos se les acoplan dispositivos para obtener calidades de fondo, tubos con sustancias químicas para señalar las profundidades independientemente del ángulo que forman el cable con la vertical, indicadores de presión, etc. que permiten medidas muy exactas.

El paso final se logra con los sondadores sonoros y ultrasonoros que fundados en la medición del intervalo de tiempo que emplea una señal acústica o ultrasonora en llegar hasta el fondo del mar y regresar al buque, han puesto al alcance, de las embarcacines pesqueras, las ventajas y seguridad de un dato tan importante como es la profundidad y en muchos casos la calidad y existencia de bancos de pesca acusados en la forma característica de eco (Sondador).

La distancia navegada, uno de los elementos fundamentales de la estima, sigue un proceso análogo, comensando por la corredera holandesa, de ésta a la de barquilla seguida de la mecánica basada en las revoluciones de un cuerpo de forma helicoidal de velocidad de giro bien contrastado y, finalmente a las de hoy en uso de diferencias de presión que al tiempo que indican la velocidad instantáneamente, dan la distancia total recorrida (corredera). Esta mecanización y simplificación en cuanto a la obtención de los datos esenciales para la navegación, que años antes eran motivo de trabajos y operaciones engorro-

sas, tienen su máximo exponente en la solución del problema de la situación. El descubrimiento efectuado el 18/12/1867 de la recta de altura por el Capitán de la marina mercante de los Estados Unidos, Th. Sumner, abre paso a métodos mas sencillos y rápidos que desplazan a los laboriosos cálculos de la longitud empleados hasta entonces. Como contribuyentes destacados y meritorios hay que señalar, entre otros, a Johnson, Marc de Saint, Helaire, Litrow, Fasci, Stahlberger y Alessio, de algunos de los cuales todavía perduran procedimientos de trabajar la recta de altura con su nombre. Las velocidades, cada vez en aumento de los buques y sobre todo la aparición de la navegación aérea hacen necesarias soluciones de tipo rápido en la que se elimine el cálculo sencillo el de la situación antes problema difícil y **entrevesado** (tablas náuticas y H.O). Con el desarrollo de la electrónica y su aplicación a la navegación, a finales de la Primara Guerra Mundial las propiedades direccional de la antena de cuadro fueron utilizadas con éxito en el radiogoniómetro, siendo el primer equipo de radionavegación empleado como ayuda a la navegación, siendo instalado el primer radiofaro en 1921.En el año 1922 dos científicos, Dr A. Hoyt Taylor y Leo C. Young comprobando un sistema de comunicaciones en el laboratorio de radio de una aeronave en Anacostia, notaron fluctuaciones de la señal cuando el buque pasaba entre estaciones de lados opuestos del rio Patomac. Aunque el valor potencial del descubrimiento fue reconocido el trabajo de su explotación no comenzó hasta marzo de 1934, cuando Young sugirió al Dr. Robert M. Page (asesor) que asumiera la responsabilidad de una futura investigación.
En diciembre, Page había construido un dispositivo de se señales de impulsos que determinaba la posición de la aernave, este fue el primer radar. En 1945 al finalizar las hostilidades en la Segunda Guerra Mundial el radar estaba disponible para uso comercial. Con el estudio posterior de las transmiciones de las ondas electromagnéticas surgieron los sistemas de radionavegación tales como el Consol, Loran, Shoran, Decca, Omega, etc. Siendo su máxima expresión la aparición de los sistemas de navegación por satélites, los cuales permiten una exactitud menor de 20 metros, que conjuntamente con el surgimieto de las cartas electrónicas han relegado aun segundo plano los métodos tradicionales empleados en la navegación.

Conclusiones.

La navegación ha transitado por un largo camino, pero no existe evidencia de que esté cercano su fin de desarrollo. El progreso continuará indeteniblemente mientras el hombre quede insatifecho con los medios de que él dispone.

CAPÍTULO I

CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Capítulo I

FORMAS Y DIMENSIONES DE LA TIERRA. ORIENTACIÓN DEL OBSERVADOR EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

I. Introducción

La navegación es el arte o la ciencia de conducir un buque o avión de un punto a otro de la superficie terrestre. Los problemas de que trata la navegación son aquellos relativos a la posición, dirección y distancia recorrida.

Como ciencia comprende los cálculos de los problemas concernientes a la navegación y el desarrollo de métodos, instrumentos, medios técnicos, accesorios y publicaciones. La aplicación de esos recursos y la interpretación recibida mientras se dirigen los movimientos de un buque o avión, constituye un arte que requiere habilidad y experiencia.

La navegación marítima combina tanto la ciencia como el arte. Un buen navegante recolecta la información de cada fuente de que dispone, evalúa dicha información, determina una posición fija y compara la misma con la posición predeterminada (posición de estima).

Un navegante constantemente evalúa la posición del buque, determina con anticipación la situación de peligro y toma las medidas que sean pertinentes para guiar el buque por la derrota más segura y ventajosa posible a fin de lograr los objetivos propuestos. El navegante en los tiempos actuales debe comprender también los conceptos básicos de muchos sistemas de navegación utilizados hoy día, evaluar la exactitud de los equipos expedidos por la fábrica y llegar a conclusiones más probables para garantizar la navegación con seguridad.

Los métodos y técnicas de navegación varían de acuerdo al tipo de buque las condiciones de acuerdo al tipo de buque, las condiciones y la experiencia del navegante. Por ejemplo la navegación en un yate de turismo difiere de la navegación en un buque portacontenedores y ambos difieren de la navegación de un buque de guerra.

Algunos elementos importantes de la navegación segura no pueden ser adquiridos de los manuales o profesores. La ciencia de navegación puede ser aprendida, pero el arte de navegar debe ser adquirida por experiencia.

Tipos de Navegación

Los métodos de navegación han cambiado a través de la historia.

Cada nuevo método ha sido perfeccionado por la habilidad y destreza de los marinos para realizar la navegación con seguridad y la mayor rapidéz posible.

Uno de los criterios más importantes que el navegante necesita tener en cuenta está relacionado con el método más adecuado que éste va a utilizar. Generalmente se reconocen los siguientes tipos de navegación.

Navegación de estima, es el método de navegar en el cual la posición del buque se determina teniedo en cuenta la dirección y el espacio que éste recorre, desde la última posición conocida.

Navegación costera, consiste en dirigir los movimientos del buque por referencia, a objetos notables

en la costa (puntos de referencia), a auxilio a la navegación o por medio de sondeos.

Navegación astronómica, se basa en la determinación de la posición del buque o avión por medio de los astros, tal como el sol, la luna, los planetas y las estrellas.

Radionavegación, utiliza las ondas de radio para determinar la posición con ayuda del radiogoniómetro o sistemas hiperbólicos (Sistema Loran - C)

Navegación por radar, usa el radar para determinar la distancia y marcación de objetos cuya posición es conocida.

Navegación por satélite, utiliza los satélites artificiales de la Tierra para determinar la posición.

Navegación en condiciones especiales, Estudia la determinación de la posición del buque y las medidas de seguridad a tomar durante las navegaciones que por cualquier motivo presentan un peligro potencial para el buque (aguas restringidas, nieblas, hielo, etc.).

1.1 Formas y dimensiones de la Tierra

La Tierra tiene forma de un cuerpo geométrico complejo e irregular que se llama geoide.

La superficie cerrada que constituye la forma del geoide se llama **Superficie de Nivel***. Esta superficie es horizontal en todos sus puntos , es decir, perpendicular a las líneas verticales que coinciden con la dirección de la fuerza de gravedad.

En realidad la superficie de nivel coincide con la superficie de las aguas del océano que se encuentra en equilibrio total. Esta superficie imaginariamente prolongada a los continentes, constituye la forma del geoide.

La irregularidad de la forma del geoide se explica por la distribución irregular de masas de diferente densidad en el cuerpo de la Tierra, lo que determina la dirrección de la fuerza de gravedad en distintos puntos de su superficie (Fig. 1).

Ya que el geoide es un cuerpo geométrico irregular, para la solución de diferentes problemas en su superficie es imposible utilizar leyes matemáticas que se expresen por determinadas ecuaciones.

*La forma del **elipsoide de revolución**, formado por la rotación de una elipse alrededor del eje menor, es similar a la forma del geoide por eso ante la solución de los problemas de la Geodesia, Cartografía y otras ciencias, se toma como forma de la Tierra el **elipsoide de revolución.**

El elipsoide terrestre es la figura matemática regular que mejor define al geoide, o sea que el elipsoide que mejor representa la superficie terrestre se denomina **esferoide terrestre genera**l.

* ***Superficie de nivel****. Es aquella superficie que se iguala a la superficie de mares y océanos y es perpendicular en todos susm puntos a la dirección de la gravedad.*

*** De todas las figuras geométricas una de las que más se asemeja al geoide por su forma y la más conveniente por la simplicidad de las fórmulas que de ella se derivan es la **elipsoide de revolución.***

Seleccionando correctamente las dimensiones del elipsoide y colocándolo de la mejor forma en el cuerpo del geoide, la distancia entre sus superficies no será mayor de 100 m.

La sustitución del geoide por el Esferoide Terrestre General de realiza observando una serie de condiciones:

El volumen del elipsoide debe ser igual al volumen del geoide

- La superficie del Ecuador y los ejes menores del elipsoide y el geoide deben coincidir.

- La suma de los cuadrados de las desviaciones por la altura entre la superficie del elipsoide y la super ficie del geoide d

- La suma de los cuadrados de las desviaciones por la altura entre la superficie del elipsoide y la super ficie del geoide debe ser mínima.

El problema de la solución del tal **Esferoide Terrestre General** aún no está resuelto.

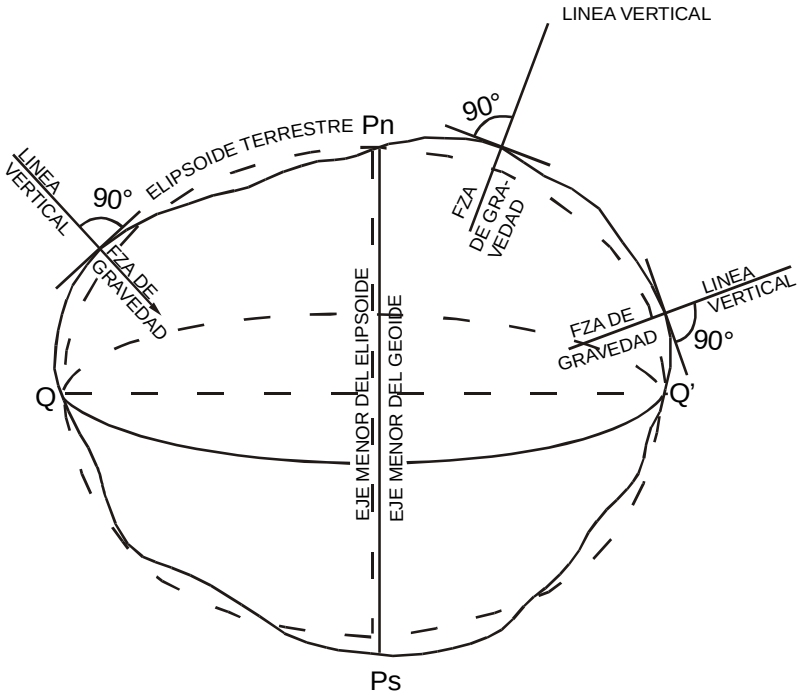


Fig. 1 Geoide.

En la actualidad existen una serie de valores del elipsoide terrestre, encontrados por los científicos en base a las mediciones realizadas en distintos países.

Tabla1.1

Autor	Año	Eje mayor (m)	Achatamiento
Bessel	1841	6 377 397	1: 299,15
Clark	1866	6 378 206	1: 295,0
Hayford	1910	6 378 388	1: 297,0
Krasovski	1940	6 378 245	1: 298,3

El elipsoide con determinadas dimensiones y orientado en el cuerpo de la Tierra, a la superficie del cual se relacionan los resultados de los trabajos de geodesia y topografía se llama Elipsoide de Referencia.

En la antigua URSS los trabajos para la determinación de las dimensiones del elipsoide de referencia se realizaron bajo la dirección del profesor Krasovski, utilizando los resultados de las mediciones realizadas en los EE.UU, en la Unión Soviética y en otros países de Europa Occidental.

Como resultado de estos trabajos se obtuvo el elipsoide de referencia de Krasovski (Fig. 2).

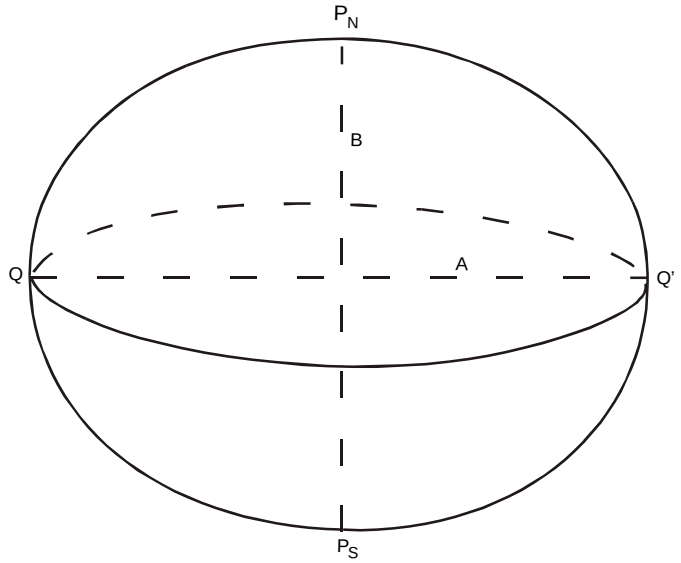


Fig. 2 Elipsoide terrestre.

Sus dimensiones son:

Semieje mayor	a = 6 378 245 m;
Semieje menor	b = 6 356 863 m;
Achatamiento polar	$\alpha = \frac{a-b}{a} = 1{:}298;\ 3;$
Cuadrado de la excentricidad.	$e^2 = 1{:}\ 149{,}3$

Estos datos se justifican con el resultado de las mediciones realizadas por los satélites artificiales de la Tierra.

El Elipsoide de Referencia de Krasovski, cuyas dimensiones se determinaron por un sin número de mediciones realizadas en el territorio de varios países, es el que más se acerca al elipsoide terrestre General.

Desde 1946 en la antigua URSS, y ahora en otros muchos países, el elipsoide de Krasovski es indispensable para la realización de los trabjos de geodesia y cartografía.

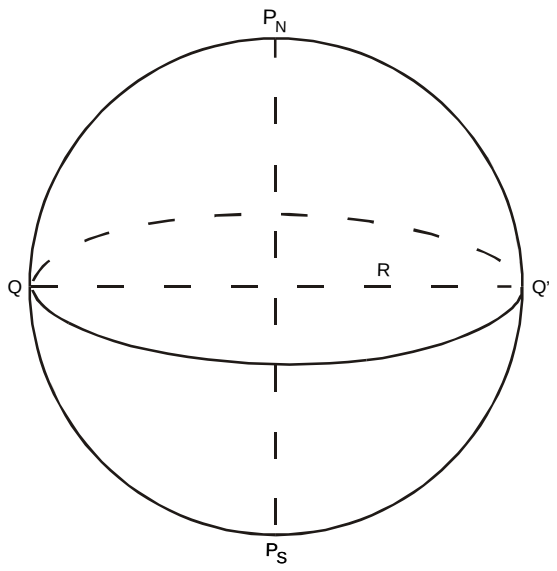


Fig. 3 Esfera terrestre

Ante la solución de muchos problemas de navegación la Tierra se puede considerar como una esfera. En este caso se simplifica la solución de problemas en la superficie de la Tierra .

Considerando a la Tierra como una esfera, su volumen debe ser igual al volumen del elipsoide terrestre.

En la observancia de esta condición, el radio de la esfera terrestre pasa más cerca del radio medio de la curvatura del meridiano del elipsoide terrestre.

De la igualdad de los volúmenes de la esfera y el elipsoide, se determina el radio de la esfera terrestre (Fig. 3).

Volumen del elipsoide $V_{elip} = \frac{4}{3}\pi a^2 b;$

Volumen de la esfera $V_{esf} = \frac{4}{3}\pi R^3.$

De la condición de igualdad de los volúmenes tenemos que.

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi a^2 b; \quad R^3 = a^2 b; \quad R = \sqrt[3]{a^2 b}.$$

Sustituyendo los valores de los semiejes obtenemos el valor del radio de la esfera terrestre.

R = 6 371 109,7 m = 3 437,75 millas.

1.2 Principales puntos, líneas y planos en la esfera terrestre

Para la determinación de la posición del observador en la superficie de la Tierra, la dirección de movimiento del buque y la dirección a diferentes objetos se utilizan determinados puntos, líneas y planos en la superficie de la tierra.

El diámetro P_n - P_s; alrededor del cual rota la Tierra se llama eje de la Tierra (figura 4a)

Los puntos de intersección del eje de la Tierra con la superficie de la Tierra se llaman polos.

Pn - Polo Norte

Ps - Polo Sur

Si la esfera terrestre se corta por un plano, se forman en su superficie circunferencias. Cualquier circunferencia en la superficie de la Tierra, cuyo plano pasa por su centro se llama **círculo máximo.**

El círculo máximo que tiene su plano perpendicular al eje de la Tierra se llama Ecuador. (figura 4b)

El ecuador divide a la Tierra en dos hemisferios: Hemisferio Norte y Hemisferio Sur. (figura 4a y 4b)

Los círculos menores en la superficie de la Tierra, que tienen sus planos paralelos al ecuador se llaman paralelos.

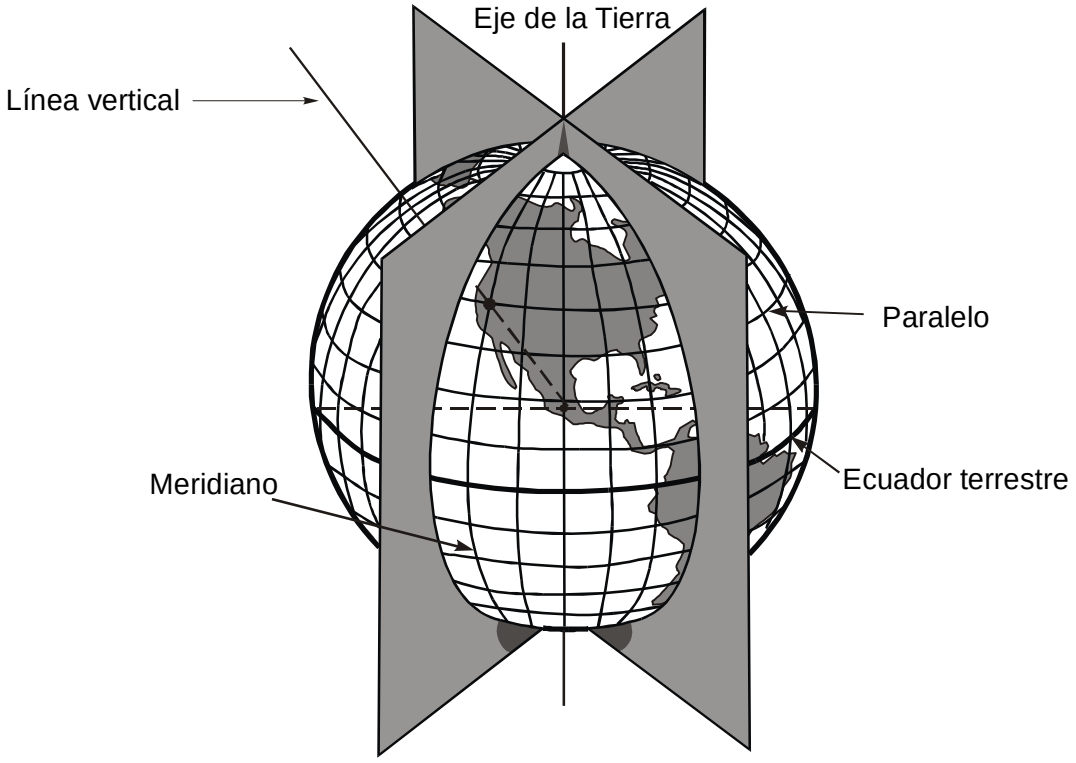


Fig. 4a Líneas principales en la superficie de la Tierra

Los círculos máximos, cuyos planos pasan por los polos de la Tierra se llaman **meridianos.**

Donde quiera que se encuentre el observador en la superficie de la Tierra, por ejemplo en el punto A (Fig.5), puede determinar con facilidad la dirección de la línea vertical. Esta dirección la señala un hilo con una plomada.

La dirección de la línea vertical hacia arriba señala un punto sobre la cabeza del observador que se llama Zenit (Z).

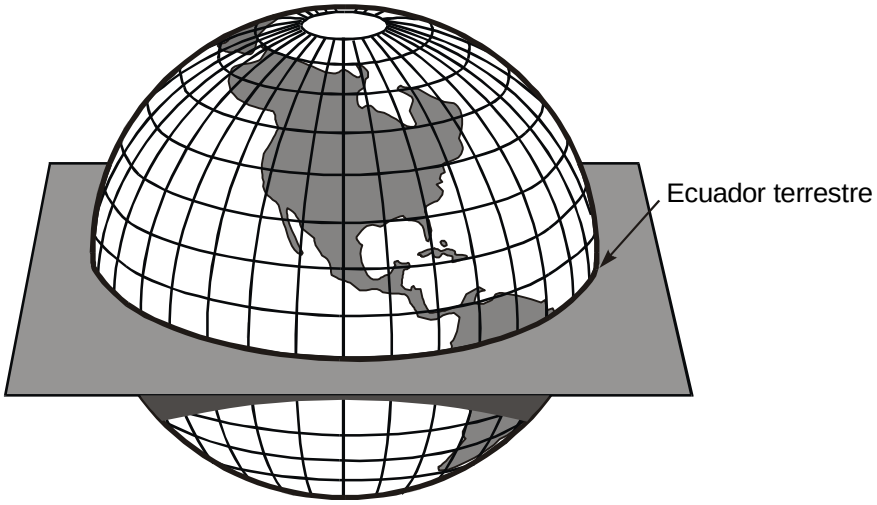


Fig. 4b Ecuador terrestre

La dirección de la línea vertical hacia abajo señala hacia el centro de la esfera terrestre.

En el elipsoide terrestre la dirección de la línea vertical hacia abajo no señala hacia el centro del elipsoide.

Coloquemos la figura 4a de tal forma, que la línea vertical, sea vertical (Fig. 5), esto lo haremos con el objetivo de poder analizar seguidamente la cuestión planteada.

En la figura 5 la línea vertical se representa por la línea Z - n, cualquier plano perpendicular a la línea vertical, se llama **plano horizontal**

El plano horizontal H - H que pasa por el ojo del observador se llama **plano del horizonte verdadero** del observador.

Cualquier plano que coincida con la línea vertical se llama **plano vertical.**

El plano vertical M - M' que pasa por los polos de la Tierra se llama **plano del meridiano verdadero del observador.**

El plano del meridiano verdadero del observador al cortarse con la superficie de la Tierra da origen al círculo máximo Pn Q' Ps QA que es el **meridiano del observador.**

Al cortarse los planos del horizonte y meridiano verdadero del observador se forma la línea N - S que se llama **línea del meridiano verdadero del observador.**

La mitad de la línea del meridiano verdadero del observador que esta dirigida hacia el norte se llama **línea norte** (AN) y la mitad que está dirigida hacia el sur se llama **línea sur** (AS). De esta forma la línea del meridiano verdadero del observador en el punto A señala la dirección hacia el Polo Norte (Pn) y hacia el Polo Sur (Ps), es decir, que determina dos direcciones principales en el plano del horizonte verdadero, la dirección N y la dirección S.

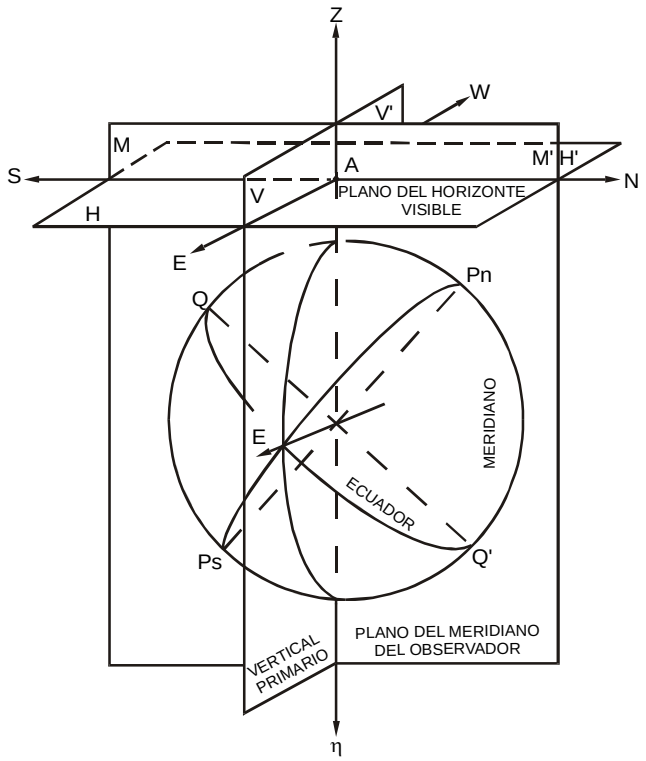


Fig. 5 Líneas y planos principales del observador

El plano vertical V - V' perpendicular al plano del meridiano verdadero del observador se llama plano del **vertical primario**.

La línea E - W se origina por la intersección del plano del vertical primario con el plano del horizonte verdadero.

Con la intersección de los planos del meridiano verdadero y el vertical primario con el plano del horizonte verdadero se determinan cuatro direcciones principales: N, S, E y W.

1.3 Coordenadas geográficas: latitud y longitud

La posición de cualquier punto en la superficie de la Tierra se determina por sus coordenadas geográficas: latitud y longitud.

Se llama **latitud geográfica de un punto** A, al ángulo entre el plano del ecuador y la normal a la superficie del elipsoide terrestre en este punto (Fig. 6).

La latitud geográfica se representa por la letra griega φ (Fi) y se mide por el arco de meridiano desde el ecuador hasta el paralelo del punto dado.

Como se ve en la figura 6, la normal a la superficie del elipsoide no pasa por el centro de éste.

Cualquier punto situado en el paralelo a -a' tendrá la misma latitud que el punto A.

El ecuador divide a la Tierra en dos hemisferios: El hemisferio norte, donde se encuentra el Polo Norte (Pn) y el hemisferio sur, donde se encuentra el Polo Sur (Ps).

Si el punto dado se encuetra en el hemisferio norte, entonces a la latitud geográfica se le llama **latitud norte** (φ_n).

Si el punto dado se encuentra en el hemisferio sur entonces a la latitud se le llama **latitud sur** (φ_s). Para los efectos de los cálculos la latitud norte se considera positiva y tiene el signo (+) y la latitud sur negativa con signo (-).

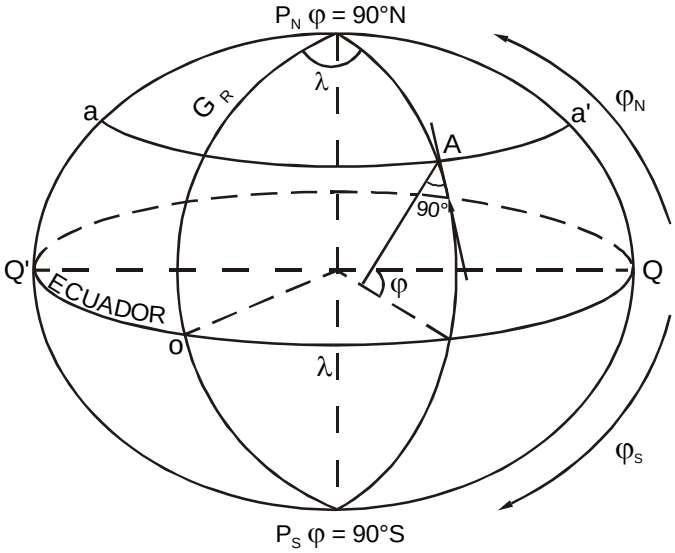


Fig. 6 Coordenadas geográficas

La latitud geográfica se mide en los límites de 0° a 90°. Un punto en el ecuador tiene latitud (φ= 0°). Los polos tienen latitud 90°.

Longitud geográfica de un punto dado (A), **se llama al ángulo diedro entre el plano del meridiano cero y el plano del meridiano del punto.**

La longitud geográfica se mide por el ángulo esférico en el polo entre el meridiano cero y el meridiano del punto dado o por el arco del ecuador comprendido entre estos meridianos. Se representa por la letra griega λ (lambda).

Por meridiano cero se asume, para el conteo de la longitud geográfica el meridiano Greenwich desde 0° a 180° hacia el este o hacia el oeste.

En la realización de cálculos la longitud éste se considera positiva (+), y la longitud oeste (-).

En el meridiano Greenwich λ = 0° y en el meridiano opuesto a este meridiano λ = 180°.

Es necesario señalar que si se considera a la Tierra como una esfera, entonces la esencia física de las coordenadas geográficas no varía.
La diferencia reside solamente, en que la normal a la superficie de la esfera, pasará por su centro.

1.4 Diferencia de lalitud y diferencia de longitud

En la navegación el buque se traslada de un punto a otro, surgiendo la variación de las coordenadas geográficas de su posición.

Si el buque salió del punto a con coordenadas φ_1 y λ_1 (Fig. 7) y se trasladó al punto B con coordenadas φ_2 y λ_2, entonces durante la navegación sucedió la variación de la latitud y longitud de la posición del buque.

El punto A, desde donde partió el buque, se llama punto de salida y el punto B, donde se dirige el buque se llama punto de llegada.

La variación de la latitud al trasladarse el buque de un punto a otro se llama diferencia de latitud ($\Delta\varphi$).

La diferencia de latitud se mide por el arco de meridiano comprendido entre los paralelos de los puntos de salida y llegada.

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1. \qquad (1)$$

Si el buque se mueve hacia el norte (N) la diferencia de latitud será norte ($\Delta\varphi_n$). Cuando la diferencia de latitud es norte la latitud norte aumenta y la latitud sur disminuye.

Si en su movimiento, el buque se dirige hacia el sur (S); la diferencia de latitud será sur ($\Delta\varphi_s$). En este caso la latitud sur aumentará y la latitud norte disminuirá.

La fórmula (1) es algebraica. En la solución de ejercicios la diferencia de latitud norte se considera positiva con signo (+) y la diferencia de latitud sur se considera negativa, con signo -). La diferencia de latitud se mide en los límites de 0°a 90°. Si el buque se traslada por un paralelo o por el ecuador, su latitud no varía. Esto significa que $\varphi_1 = \varphi_2$ y la diferencia de latitud $\Delta\varphi = 0°$.

La variación de la longitud cuando el buque se traslada de un punto a otro, se llama diferencia de longitud $\Delta\lambda$. La diferencia de longitud se mide por el arco menor del Ecuador comprendido entre los meridianos de los puntos de partida y llegada.

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1. \qquad (2)$$

Cuando el movimiento del buque es hacia el este la diferencia de longitud es este ($\Delta\lambda_E$). Aquí la longitud este aumenta y la longitud oeste disminuye.

Si el movimiento del buque es hacia el oeste la diferencia de longitud será oeste ($\Delta\lambda_w$). En este caso la longitud oeste aumenta y la longitud este disminuye.

La fórmula (2) es una fórmula algebraica. En la solución de ejercicios se considera la diferencia de longitud este positiva, con signo más (+), y la diferencia de longitud oeste negativa, con signo (-).

La diferencia de longitud se mide en los límites de 0° a 180°.

Si en la solución de ejercicios de navegación se determina una diferencia de longitud mayor de 180°, entonces es necesario restarla de 360°, y al resultarlo cambiarle el signo por el contrario.

Cuando el buque se traslada por el meridiano su longitud no varía, es decir, $\lambda_1 = \lambda_2$ y $\Delta\lambda = 0°$

Conociendo las coordenadas de uno de los puntos y la diferencia de latitud y longitud, es fácil calcular las coordenadas del otro punto.

$\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi \qquad \lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$

$\varphi_1 = \varphi_2 - \Delta\varphi \qquad \lambda_1 = \lambda_2 - \Delta\lambda$

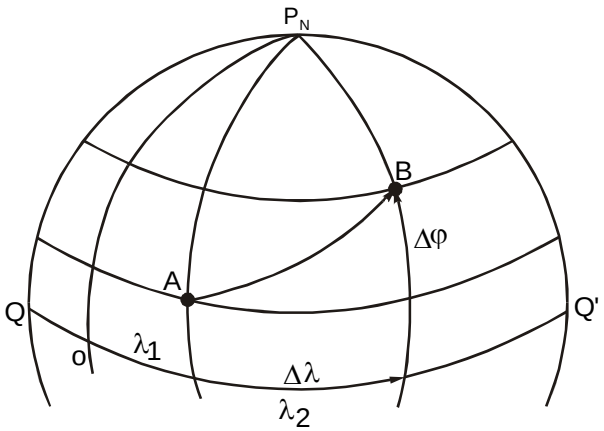


Fig. 7 Diferencia de latitud y diferencia de longitud

Es necesario tener en cuenta que en lugar de las coordenadas de los puntos de salida y llegada de la posidión del buque, para la determinación de $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$ pueden ser tomadas las coordenadas de dos puntos cualesquiera en la superficie de la Tierra. En este caso tendremos las diferencias $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$ entre estos puntos.

Ejemplo 1. El buque navegó desde el punto con coordenadas φ_1 = 35°31,0'N; λ_1= 35°45,0'E hasta el punto con coordenadas φ_2 = 31°11,0'N; λ_2= 29°52,0'E. Determinar $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$.

Solución: En la figura 8 el punto de salida del buque se representa por la letra A, y el punto de destino por la letra B.

De la figura se observa que en la travesía entre los puntos A Y B el buque tuvo una $\Delta\varphi$ hacia el sur y una $\Delta\lambda$ hacía el oeste. Los valores de $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$ se determinan con ayuda de las fórmulas (1) y (2).

$$\begin{array}{ll} \varphi_2 = +31°11{,}0' & \lambda_2 = +29°52{,}0' \\ - & - \\ \varphi_1 = +35°31{,}0' & \lambda_1 = +35°45{,}0' \\ \hline \Delta\varphi = -\ 4°20{,}0' & \Delta\lambda = -\ 5°53{,}0' \\ \Delta\varphi = -\ 4°20{,}0'\,S & \Delta\varphi = -\ 5°53{,}0'\,W \end{array}$$

Cuando se realizan los cálculos de $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ ó $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, y la cantidad de minutos del minuendo numéricamente es menor que la del sustraendo, al primero se le resta una unidad a la cantidad de grados (60 minutos) agregándole posteriormente los 60 minutos a los minutos que tiene el minuendo y solo así se podrá efectuar la aperación correcta.

En el ejemplo, la longitud del punto de salida (λ_1= 35°45,0'E) y la longitud del punto de llegada (λ_2= 29°52,0E).

Para calcular la diferencia de longitud se aplica la fórmula.

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 29°52{,}0' - 35°45{,}0'$$

Al efectuarse la operación, al mayor valor se le resta el menor.

$$\begin{array}{l} \quad\quad 34°105{,}0' \\ \lambda_1 = +\ 35°\ \ 45{,}0' \\ - \\ \lambda_2 = +\ 29°\ \ 52{,}0' \\ \hline \Delta\lambda = -\ \ \ 5°\ \ 53{,}0' \end{array}$$

Puede observarse que la cantidad de minutos del minuendo (45') es menor que la del sustraendo (52'), por lo tanto antes de efectuar la operación se debe restar un grado al minuendo, quedándole 34°y este grado convertido en minutos se le suma a los minutos que tenía anteriormente (45 + 60 = 105), hecho esto, ya se puede efectuar el cálculo de $\Delta\lambda$, quedando como:

$$\lambda_1 - \lambda_2 = 34°105{,}0' - 29°52{,}0' = \Delta\lambda = -\ 5°53{,}0'$$

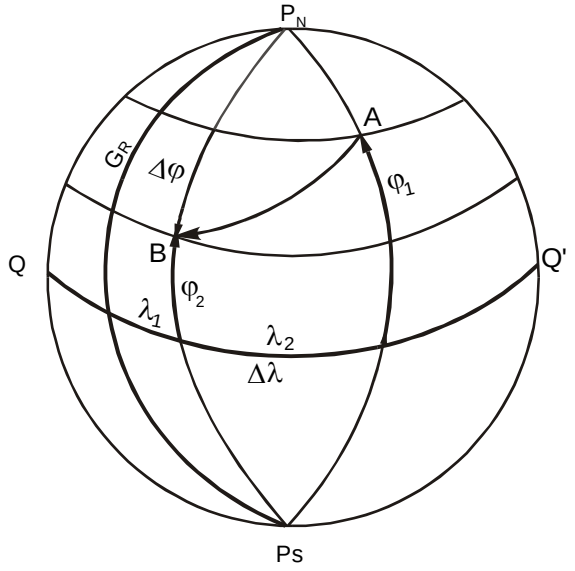


Fig. 8 Diferencia de latitud y diferencia de longitud

Ejemplo 2. El buque salió desde el punto con coordenadas φ_1 = 31°18,0'N; λ_1 = 32°17,0'E y llegó al punto de destino con coordenadas φ_2= 35°10,0'N; λ_2 = 33°57,0'E

Determinar $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$.

Solución: En la figura 9 el punto de salida se representa por la letra A y el punto de destino por la letra B. En ésta se ve que el buque navegó $\Delta\varphi$ hacia el norte y $\Delta\lambda$ hacía el este.

El valor de $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$ se determinan de las fórmulas:

$$\begin{array}{l} \varphi_2 = +\ 35°10{,}0' \\ - \\ \varphi_1 = +\ 31°18{,}0' \\ \hline \Delta\varphi = +\ \ 3°52{,}0' \\ \Delta\varphi = \quad\ \ 3°52{,}0N \end{array} \qquad \begin{array}{l} \lambda_2 = +\ 33°57{,}0' \\ - \\ \lambda_1 = +\ 32°17{,}0' \\ \hline \Delta\lambda = +\ \ 1°40{,}0' \\ \Delta\lambda = \quad\ \ 1°40{,}0E \end{array}$$

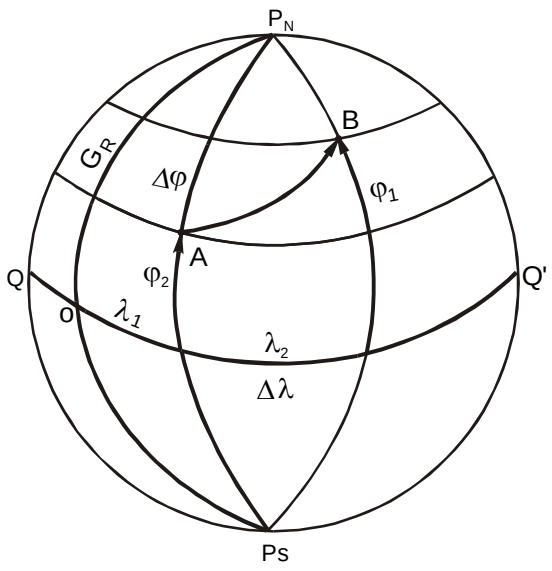


Fig. 9 Diferencia de latitud y diferencia de longitud

Ejemplo 3. El buque realizó una travesía desde el punto A con coordenadas φ_1 = 43°02,0'N; λ_1 = 5°35,0'E hasta el punto B, cuyas coordenadas son:φ_2= 35°24,0N; λ_2= 4°34,0'W.

Determinar $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$

Solución: En la figura 10 se observa que en la travesía desde el punto A hasta el punto B el buque realiza una $\Delta\varphi$ hacia el sur y una $\Delta\lambda$ hacia el oeste, atravesando el meridiano de Greenwich, por lo que pasa del hemisferio oriental al hemisferio occidental:

$\varphi_2 = +35°24{,}0'$	$\lambda_2 = -\ 4°34{,}0'$
$-$	$-$
$\varphi_1 = +43°02{,}0'$	$\lambda_1 = +\ 5°35{,}0'$
$\Delta\varphi = -\ 7°38{,}0'$	$\Delta\lambda = -10°09{,}0'$
$\Delta\varphi = 7°38{,}0S$	$\Delta\lambda = 10°09{,}0S$

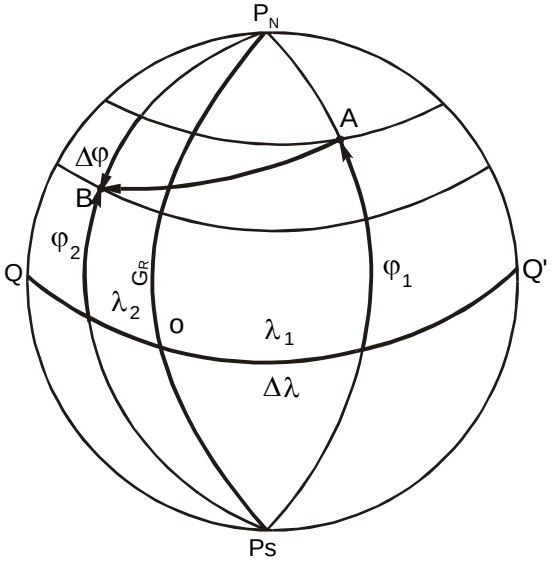


Fig.10 Diferencia de latitud y diferencia de longitud

Ejemplo 4. El buque se trasladó desde el punto A con coordenadas φ_1 = 49°36,0'; λ_1 = 91°18,0'W hasta el punto B, cuyas coordenadas son φ_2 = 57°15,0'N; λ_2 = 172°06,0'E.

Determinar $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$

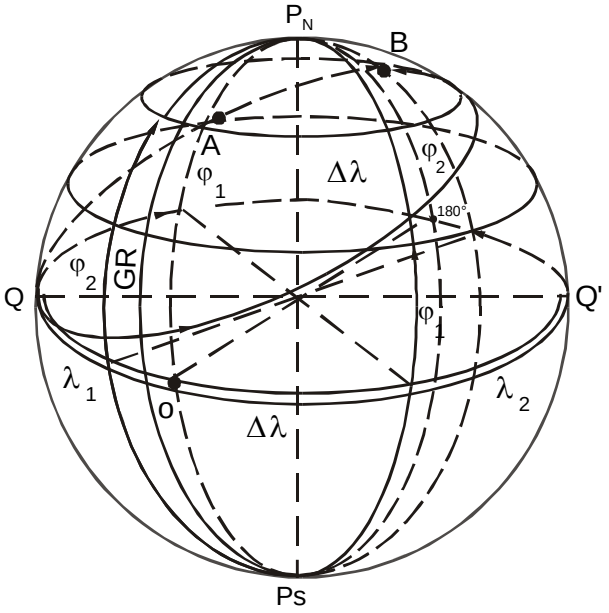


Fig.11. Diferencia de latitud y diferencia de longitud (Δλ>180°)

a) Solución: En la figura 11 se observa que en la travesía desde el punto A hasta el punto B realizada por el buque, la $\Delta\varphi$ es hacia el norte, y una $\Delta\lambda$ hacia el oeste. Al aplicar la fórmula $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ la diferencia de longitud es hacia el este, pero como es mayor de 180° el resultado obtenído por la fórmula se resta de 360° y se le cambia de signo.

Calculando los valores $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$

$$56°75,0'$$
$$\varphi_2 = +57°15,0'$$
$$-$$
$$\varphi_1 = +49°36,0'$$
$$\Delta\varphi = -\ 7°39,0'$$
$$\Delta\varphi = \ \ 7°39,0'\,N$$

$$\lambda_2 = +172°06,0'$$
$$-$$
$$\lambda_1 = -91°18,0'$$
$$\Delta\lambda = -263°24,0'$$
$$\Delta\lambda = \ \ 263°24,0'\,E$$
$$\Delta\lambda > 180°$$
$$360° - 263°24,0'$$
$$359°60' - 263°24,0' = 96°36'\,W$$
$$\Delta\lambda = 96°36'\,W$$

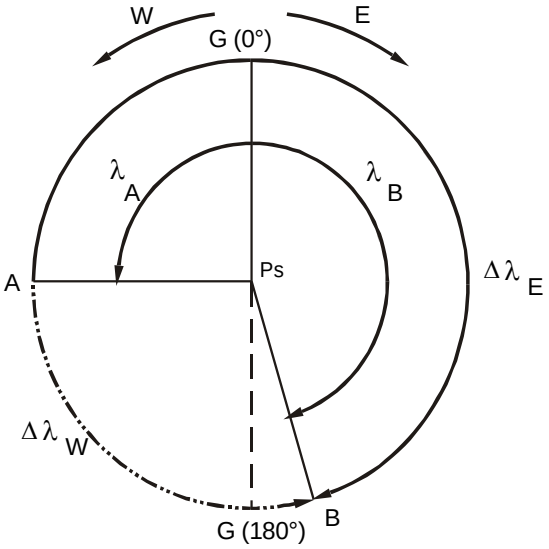


Fig. 12 Diagrama guía para el cálculo de la diferencia de longitud (cuando Δλ>180°)

$$\boxed{\Delta\lambda_E = \lambda_A + \lambda_B}$$

Sustituyendo ($\lambda_A = \lambda_1$, $\lambda_B = \lambda_2$)

$$\Delta\lambda_E = +\ 172°06{,}0' - (-\ 91°18{,}0')$$
$$= +\ 172°06{,}0' + 91°18{,}0'$$
$$\Delta\lambda_E = 263°24{,}0'$$
$$\Delta\lambda_W = 360 - (\lambda_A + \lambda_B)$$
$$= 360 - 263°24{,}0'$$
$$\boxed{\Delta\lambda_W = 096°36{,}0'}$$

1.5 Nociones sobre los radios de curvaturas

A través de cualquiera de los puntos de la perpendicular a la superficie del elipsoide se pueden trazar infinidad de planos. Todos estos planos son perpendiculares a la tangente de la superficie del elipsoide y se llaman normales. Los planos normales al cortarse con la superficie del elipsoide forman lo que se llama cortes normales. En cada punto existen dos cortes normales perpendiculares entre sí, cuyos radios de curvatura poseen valores máximos y mínimos.

Tales cortes normales se llaman **cortes normales principales**

Los cortes normales principales en la superficie de la Tierra son:

a) El corte de meridiano P_n Q' P_s Q, que posee un radio de curvatura mínimo M (figura 11).

El valor del radio de curvatura del meridiano se determina por la expresión.

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \operatorname{sen}^2\varphi)^{3/2}}; \qquad (3)$$

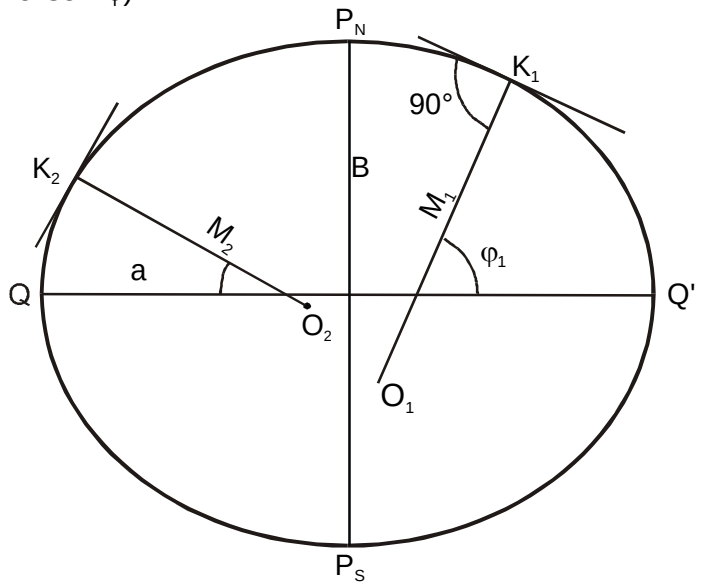


Fig. 13 Radio de curvatura del meridiano

b) El corte por el vertical primario EKW, que posee un radio de curvatura máxima N (figura 12)

El valor del radio de curvatura del vertical primario N se determina por la expresión.

$$N=\frac{a}{(1-e^2 sen^2\varphi)^{1/2}}. \qquad (4)$$

Conociendo el radio de curvatura máximo y mínimo se puede determinar el **radio medio de curvatura R** por la fórmula:

$$R=\sqrt{M\,N} \;\text{ ó }\; R=\frac{a\sqrt{1-e^2}}{1-e^2 sen^2\varphi} \qquad (5)$$

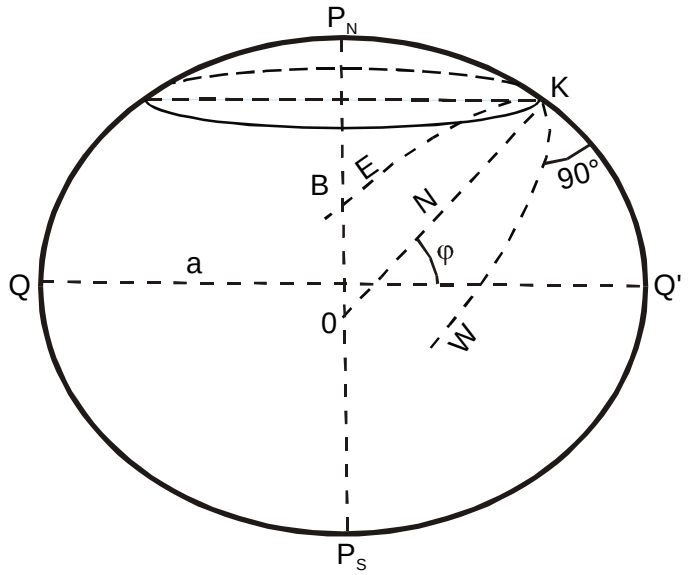


Fig.14 Radio de curvatura del vertical primario

El **radio del paralelo** de un punto K arbitrario del elipsoide terrestre se determina por la expresión:

$$r=N\cos\varphi=\frac{a\cos\varphi}{(1-e^2 sen^2\varphi)^{1/2}}. \qquad (6)$$

Utilizando la expresión del radio de curvatura del corte del meridiano se puede determinar el largo de 1', de arco del meridiano del elipsoide terrestre.

$$\Delta 1'=M\,arc1'=\frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 sen^2\varphi)^{3/2}}arc1'. \qquad (7)$$

Para los cálculos prácticos con frecuencia se utiliza una fórmula más simple.

$$\Delta 1'=1852{,}23-9{,}34\cos 2\varphi. \qquad (8)$$

En la fórmula (8) se ve que el largo de 1' de arco de meridiano es una magnitud variable y depende de la latitud del lugar. La menor longitud de 1' de meridiano es en el Ecuador; igual a 1 842,98 m la mayor longitud es en los polos; igual a 1861,57 m.

1.6 La geodesia y el datum en navegación

INTRODUCCIÓN

La definición de Geodesia tal como usualmente se entiende es:
La Geodesia [del griego γη (gé), Tierra, y δαιειν(daisia), división] es la ciencia Físico - Matemática que tiene por objeto determinar la posición relativa de los puntos que convengan en la superficie terrestre, a fin de:

- Conocer la figura y dimensiones de la Tierra, así como las dimensiones, área y posición sobre dicha superficie de diversas porciones de la misma y de las líneas y puntos que en ella puedan considerarse.

- Poder representar la Tierra y cualquiera de sus diversas partes, por medio de líneas y puntos.

- Poder dividir la superficie del globo, trazar en ellas líneas y determinar puntos según se necesite.

La determinación de los puntos de control geodésico en la superficie terrestre se realiza utilizando principalmente dos métodos:

- Método astronómico.

- Método geodésico.

En el primer método utilizamos las observaciones astronómicas aplicadas a los fines geodésicos.

La posición de los puntos obtenidos astronómicamente está referida a la figura física de la Tierra.

En el segundo método, que es más exacto, se obtienen dichas posiciones al realizar mediciones angulares y lineales con instrumentos y métodos apropiados.

En el método geodésico se realizan los siguientes trabajos: triángulación, poligonometría y nivelación.

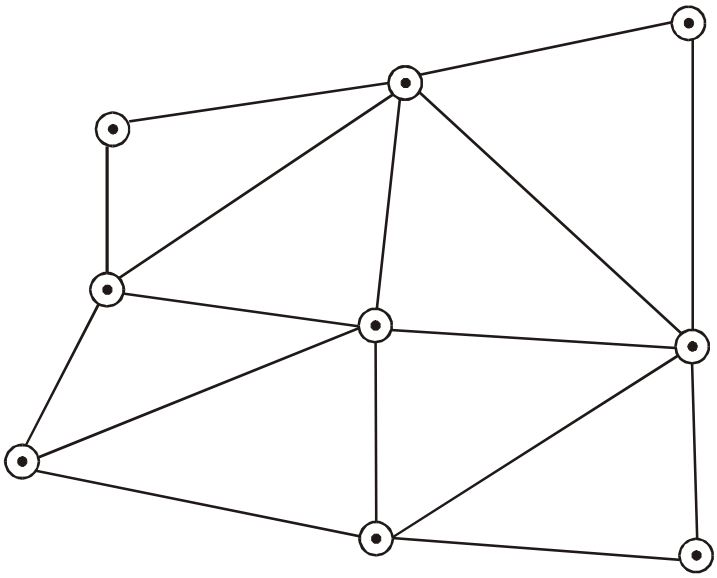


Fig. 15a Triangulación

Mediante la triangulación y poligonometría, que se muestran en las figuras 15a y 15b, se obtienen las posiciones de los puntos en la superficie de la figura matemática de la Tierra, mientras que con la nivelación figura 15c , se obtiene la altura de los puntos sobre una superficie, que se denomina **superficie de nivel.**

En Geodésia se utiliza una superficie de nivel para definir la forma física de la Tierra, o sea, el Geoide; esta superficie es el nivel medio del mar.

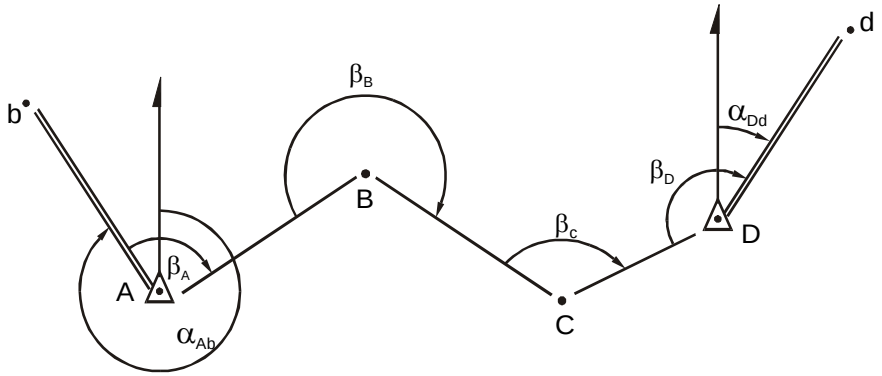


Fig. 15b Poligonal

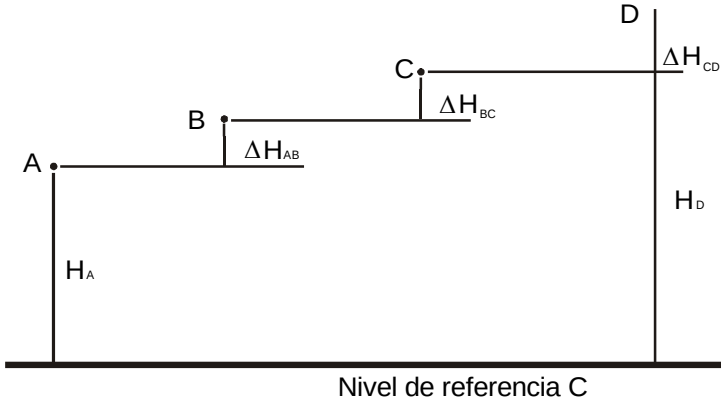


Fig. 15c Nivelación

En Cuba los trabajo Geodésicos se realizan por el Grupo Empresarial GEOCUBA, organismo que se ocupa de redactar y editar los mapas nacionales, de editar normas y especificaciones para los trabajos geodésicos, así como el establecimiento de los puntos de control necesarios para el desarrollo de los trabajos de carácter especializado.

La Red Geodésica Estatal de Cuba se desarrolla mediante mallas compactas de triangulación que agrupa aproximadamente 1500 puntos cuya posición geográfica y plana se determina con suficiente exactitud.

Además se ha desarrollado una red estatal de nivelación con puntos cuya altura sobre el nivel medio del mar quedó definida con suficiente exactitud.

De esta forma, en todo el país se obtuvieron puntos cuya posiciones geográficas y altura sobre el nivel medio del mar son conocidos.

Los puntos cuya posición geográfica se conocen, se denominan **puntos de control geodésico horizontal** o simplemente puntos de control.

Los puntos cuya altura sobre el nivel medio del mar se conocen, se denominan **puntos de control geodésico vertical** o simplemente Punto de Cota Fija (PCF).
Las coordenadas geográficas, que están referidas a la superficie del esferoide, no son de facíl empleo en los trabajos usuales. Además, los mapas, que son representaciones planas de porciones de la superficie terrestre, son superficies planas y, por tanto, las coordenadas geográficas no son adecuadas, estableciéndose para ello el **sistema de coordenadas planas***.*

Mediante relaciones matemáticas definidas se transforma el sistema de coordenadas geográficas en el sistema de coordenadas planas. El conjunto de fórmulas que viabiliza esta transformación se denomina **sistema de proyección.**

En Cuba empleamos el s*istema de* la Proyección Cónica Conforme de Lambert, de dos conos.

Nociones sobre la forma de la Tierra

En Geodesia se considera, generalmente, la Tierra como un elipsoide de revolución; por diversas causas físicas, su figura difiere algo del cuerpo geométrico anterior, presentando ciertas irregularidades que dependen únicamente del sistema de fuerzas que sobre ella actúa y, por tanto, tiene que estar representada por una superficie equipotencial (superficie de nivel), que es normal a la dirección del campo resultante de las fuerzas gravitacionales (fuerza de atracción mutua de las masas) y la fuerza centrífuga (fuerza originada por su propia rotación).

A causa de su estado líquido, la superficie media exterior de las masas de agua de los océanos, que cubren los 2/3 de la superficie terrestre es aproximadamente una superficie de nivel uniforme.

Es evidente que existe infinito número de superficies de nivel, de las cuales la superficie del nivel medio del mar, denominada **geoide** es de importancia especial. En la figura 16a se ilustra estas superficies.

Cada partícula de materia de la Tierra es atraída hacia otras partículas por la fuerza de gravitación.

Sobre la superficie terrestre, la dirección de la resultante de todas las fuerzas de gravitación es aproximadamente hacia el centro de masa de la Tierra. Las variaciones en la densidad de la corteza terrestre afectan la dirección de esta resultante.

Estos efectos se observan especialmente en las proximidades de las cadenas de montañas, grandes yacimientos de minerales o de las islas que se elevan desde profundidades del océano, entonces, la resultante está desplazada hacia esas grandes concentraciones de las masas de la corteza, tal como se muestra en la figura 16b.

Cada partícula de la masa terrestre, salvo que esté situada en el eje de rotación de la Tierra, es también empujada hacia afuera, en una dirección perpendicular al eje de rotación a causa de la fuerza centrífuga por el movimiento realizado sobre este eje.

De esta forma tenemos que cada partícula está accionada por dos fuerzas con direcciones diferentes, una atracción (gravitación) y otra de repulsión (centrífuga).

La resultante de las fuerzas centrífuga y gravitacional, cuando analizamos su efecto combinado sobre la partícula, se conoce como **fuerza de gravedad.**

A causa del componente de la fuerza centrífuga, la dirección de la gravedad no es hacia el centro de la

Tierra, sino que está ligeramente desviada hacia el plano del ecuador, excepto naturalmente en el Ecuador y en los polos.
Como la fuerza centrífuga tiene su mayor valor en los puntos que corresponden al Ecuador, la Tierra, que posee considerable viscosidad en su masa, toma la forma general de un elipsoide de revolución. La rigidez y las diferentes densidades de la corteza impiden la formación de una figura matemáticamente perfecta.

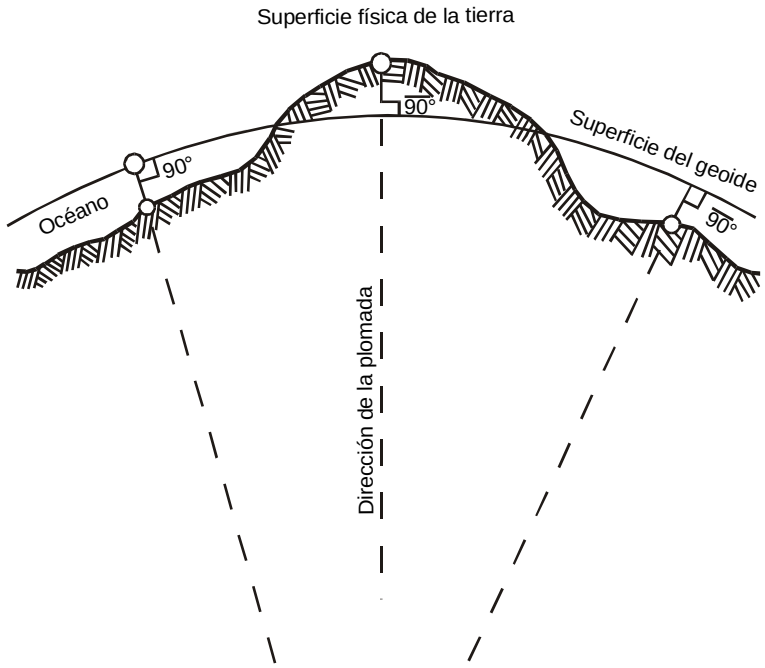


Fig. 16a Superficie física de la Tierra y superficie del geoide

El geoide, tal como se ha definido es una figura exclusivanmente física y, por consiguiente, relativamente irregular, pues la superficie real del mismo estará supeditada a las alteraciones que pueda sufrir el campo de fuerzas que sobre él actúa y determina su forma.

Una figura exclusivamente física como el geoide no se puede expresar sencillamente por ecuaciones matemáticas, ya que el comportamiento exacto de los distintos y complejos elementos que definen con exactitud su forma (fuerza gravitacional, fuerza centrífuga, densidad de los materiales bajo su superficie, viscosidad, etc.), es prácticamente imposible de conocer.

Es necesario, por consiguiente, para poder referir los puntos que forman la corteza terrestre unos con relación a otros, escoger una figura que por su forma sea prácticamente igual a la del geoide, pero en la cual las relaciones entre los distintos elementos se pueden expresar sencillamente por fórmulas matemáticas exactas, más o menos complejas.

De todas las figuras geométricas una de las que más se asemeja al geoide por su forma y la más conveniente por la simplicidad de las fórmulas que de ella se derivan es la del elipsoide de revolución.

Un número de elipsoides de referencia son utilizados en geodesia para la confección de mapas y cartas debido a que un elipsoide es matemáticamente más simple que el geoide.

En la figura 17 se muestra el geoide y dos elipsoides, ilustrando como el elipsoide que coincide con América del Norte no coincide en Europa teniendo diferentes orígenes.

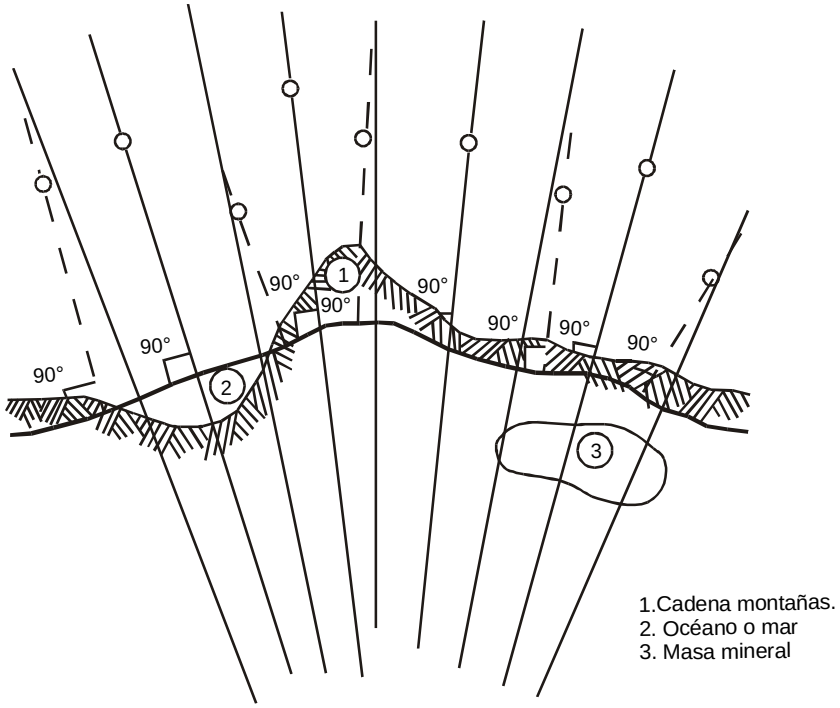


Fig. 16b. Efecto de las agrupaciones de masas en la dirección de la línea de la plomada y del perfíl de la superficie del geoide

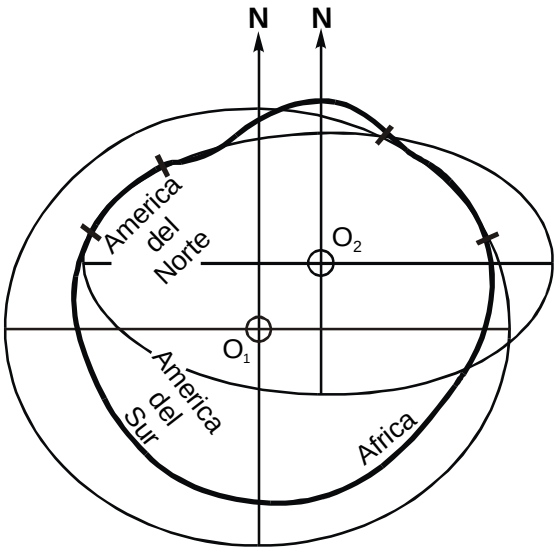


Fig.17. El geoide y dos elipsoides, ilustran como el elipsoide coincide correctamente con América del Norte, pero no coincide con Europa, pudiendo tener un origen diferente

CLASIFICACIÓN DE LAS REDES GEODÉSICAS

Las redes geodésicas son un conjunto de puntos en la superficie terrestre de los cuales se saben su posición planimétrica en el sistema de coordenadas escogido y la altura sobre el nivel medio del mar.

Los puntos de las redes se sitúan en el terreno según un plan elaborado de antemano y se marcan con señales especiales.

En dependencia del tipo de trabajo a realizar las redes geodésicas pueden ser planimétricas, altimétricas o planimétricas y altimétricas a la vez.

Los métodos fundamentales para la determinación de los puntos que conforman las redes geodésicas planimétricas son: triangulación (Trilateración) y la poligonometría.

Para la creación de las redes geodésicas altimétricas los métodos de la nivelación geométrica y trigonométrica son fundamentales.

Las redes geodésicas se subdividen en:

1. Red geodésica estatal.

2. Red geodésica especial.

La red de apoyo geodésico estatal sirve para el cumplimiento de las tareas científico-técnicas y es la base fundamental para hacer el levantamiento topográfico a cualquier escala, así como satisfacer todas las necesidades planteadas por la defensa y la economía nacional.

La red geodésica estatal se subdivide en:

a) Redes de triangulación y poligonometría de 1er, 2°, 3er y 4°. órdenes de acuerdo con la precisión de las mediciones de los ángulos y líneas y por las longitudes admisibles de los lados.

b) Las redes de nivelación de 1er, 2°, 3er y 4°. órdenes.

El principio universalmente admitido de la construcción de la red geodésica estatal es el paso de lo general a lo particular, es decir, del orden superior al orden inferior.

DATUMS INTERRELACIONADOS

Un Datum es definido como cualquier valor numérico o geométrico, o conjunto de tales valores, que sirven como un punto de referencia o patrón para medir y comparar otras cantidades.

Tanto en geodesia, cartografía, como en navegación, son considerados dos tipos de datums:

Datum horizontal y Datum vertical. El datum horizontal es la base para el cálculo de la posición horizontal. El datum vertical proporciona la referencia para medir alturas. El datum horizontal puede ser definido en un punto de origen en el elipsoide (datum geocéntrico). Las coordenadas para puntos en un levantamiento geodésico específico y redes de triangulación, son calculados desde ciertos valores iniciales, o datums.

Datums normalizados

Son las áreas de redes de triangulación geodésicas solapadas, cada una calculada con datums diferentes, a las coordenadas de los puntos dados, con relación a un datum diferirán de los dados con respecto a otro. Las diferencias pueden ser usadas para establecer la transformación de fórmulas. Los datums

son relacionados desarrollando la transformación de fórmulas en puntos comunes, ya sea entre redes de control solapadas, o por unión de satélites.
Muchos países han desarrollado datums nacionales los cuales se diferencian de los países vecinos. En consecuencia, los mapas y cartas nacionales con frecuencia no concuerdan sus parámetros a las de las diferentes naciones vecinas.

El Datum de América del Norte, 1927(North Américan Datum - NAD 27), es el empleado para la edición de las cartas náuticas cubanas, y ha si usado en los Estados Unidos de América por más de 50 años, por lo está siendo reemplazado por el datums basado en el World Geodetic System (WGS - Sistema Geodésico Mundial).

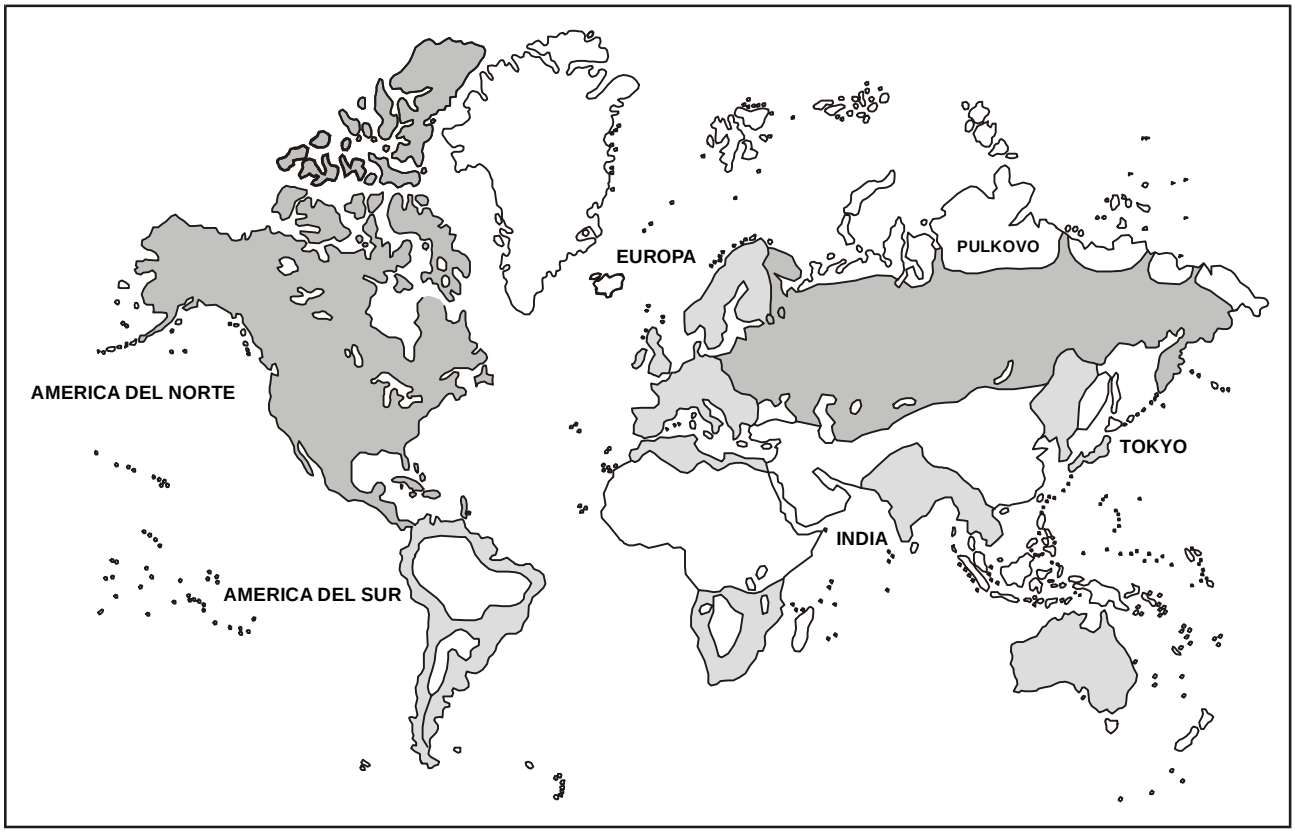


Fig.18 Bloques de los principales datums geodésicos

Las coordenadas en el NAD 27 están basadas en la latitud y longitud de una estación de triangulación (punto de referencia) en el rancho de Mead's en Kansas, el azimut de una estación de triangulación cercana llamada Waldo, y los parámetros matemáticos del elipsoide de Clark 1866. Otros datums en el mundo utilizan diferentes puntos de origen y elipsoides.

El origen del **Datum Europeo** es en Postdam Alemania. Numerosos sistemas nacionales han sido unidos en un gran datum basados en el elipsoide internacional de 1924 el cual fue orientado por un método astronómico modificado.

Las cadenas de triangulación de Europa, África y Asia fueron unificadas, y en África las mediciones realizas desde el Cairo hasta Ciudad del Cabo (Cape Town) fueron completadas. Por lo tanto toda Europa, África y Asia fueron unidos o moldeados en un gran sistema. Gracias al levantamiento común de las estaciones, fué también posible convertir datos del sistema Pulkov de Rusia 1932, al datum

Europeo, y como resultado, éste incluye la triangulación hacia el este hasta el meridiano 84.
El enlace adicional a través del Medio Oriente ha permitido la unión de los Datum de la India y Europa.

Datum del Servicio Cartográfico de Gran Bretaña 1936: Este no tiene punto origen. El dato fue deducido como un mejor entre la retriangulación y los valores originales de 11 puntos de la triangulación principal de Gran Bretaña (1783 - 1853).

Datum de Tokio, tiene su origen en Tokio. Es definido en términos del Elipsoide de Bessel y orientado por una simple estación astronómica. La triángulación enlaza por medio de Corea la unión del datum de Japón con el datum de Manchurriam. Desafortunadamente, Tokio está situado en un acantilado inclinado en el geoide, y la orientación de la simple estación.

Datum Indico, es el datum normalizado por la India y varios paises adyacentes del Sudeste de Asia. está calculado por el Elipsoide Everest con su origen en el centro de la India. Fue el resultado de un gran e incansable trabajo del científico George Everest (1790 - 1866), geodesta general en la India desde1830 a 1843. El fue más famoso por lo que la montaña más alta del mundo lleva su nombre, pero su legado más importante fue el levantamiento de la India como subcontinente.

Desarrollo del Sistema Geodésico Mundial

Despúes de la década del 50 con el aumento del alcance y el sofisticado sistema la dirección del armamento los datums locales o nacionales han prestado un servicio inadecuado para propositos militares; estos nuevos armamentos requieren datums al menos en el ambito continental . En respuesta a estos requerimientos, el Departamento de defensa de los Estados Unidos generó un Sistema geocéntrico de referencia al cual diferentes redes geodésicas pudieran ser referidas y establecidas compatiblemente entre las coordenadas de los sitios de interés. La gestión de la armada, la marina y la fuerza aérea fueron combinadas dirigidas hacia el desarrollo del World Geodetic System de 1960 (Sistema Geodésico Mundial - WGS 60).

En enero de 1966, un Comité del Sistema Geodésico Mundial fue el encargado con la responsabilidad para el desarrollo del WGS mejorado necesario para satisfacer los trabajos de cartografía y requerimientos geodésicos. Las observaciones adicionales de la gravedad superficial, fue el resulta de la extensión de las redes de triángulación y trilateración asi como la gran cantidad de datos de los satelites doppler y ópticos lo han convertido en disponible desde el desarrollo del WGS 60. Usando los datos adicionales y la técnica perfeccionada, el Comité elaboró el WGS 66 el cual le planteo al Derpartamento de Estado la nececidad de su implementación en 1967.

El propio Comité del Sistema Geodésico Mundial comenzó a trabajar en 1970 para desarrollar el reemplazo del WGS 66. Desde el desarrollo del WGS 66, gran cantidad de datos adicionales han estado disponible tanto de los satélites doppler como de los ópticos, levantamientos de gravedad superficial, triangulación y trilateración, poligonal de alta precisión y levantamientos astronómicos, Después de un extensivo esfuerzo en un período de tres años, el Comité completó el desarrollo del Departamento de Defensa del Sistema Geodesis Mundial de 1972 (WGS 72).

Con una posterior modificación del WGS 72 surgió el nuevo Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS 84).

North American Datum 1983

La Administración Oceanográfica Atmosférica Norteamericana (Coast and Geodetic Survey of the National

Ocean Service – NOAA), es responsable de cartografíar las aguas de los Estados Unidos. Desde 1927 hasta 1987, los cartas estadounidenses estuvieron referidas a NAD 27, basadas en el elipsoide de Clarke 1866. En 1989, Estados Unidos cambió oficialmente toda su cartografía a NAD 83 (equivalente a WGS 84 y otros sistemas de WGS).

La red de levantamientos interrelacionados que cubre el territorio de los Estados Unidos consta de unos 250,000 puntos de control, a cada uno de los cuales corresponde una latitud y longitud, más algunos datos adicionales, tales como la elevación. La conversión de coordenadas NAD 27 en coordenadas NAD 83 se realiza recalculando la posición de cada punto basado en el nuevo datum NAD 83.

Además de los 250, 000 puntos de control en los Estados Unidos, otros miles más fueron incluidos para ampliar la cobertura a Canadá, México y centroamérica.

La conversión de las cartas al nuevo datum, ya sea WGS 84 o NAD 83, incluye la conversión de los puntos de referencia en cada carta, del viejo datum al nuevo, así como el ajuste de la latitud y de la retícula, de modo que refleje las posiciones nuevamente ploteadas. Este ajuste de la retícula es la única diferencia entre las cartas, las que sólo diferirán en el datum. Todas las características cartografiadas se mantienen en sus respectivas posiciones relativas.

Repercusión en la navegación

Un impacto en la navegación por la diferencia de datums aparece cuando un sistema de navegación proporciona una posición fija basado en un datum diferente al utilizado en la carta náutica. El resultado de la posición ploteada puede ser diferente a la posición actual en esa carta, esta diferencia es conocida como **corrimiento o desplazamiento del datum.**

Otro efecto en navegación se presenta cuando el desplazamiento entre las cartas ha sido obtenido utilizando datums diferentes.

Si cualquier posición es ploteada nuevamente en una carta de otro datum usando solamente la latitud y la longitud para ubicar esa posición, esta no será igual respecto a otra carta semejante, este desplazamiento de datum puede ser evitado mediante el reploteo utilizando marcaciones y distancia a puntos comunes. Si los valores para la conversión del corrimiento del datum aplicable a la carta son dados, las posiciones que están definidas por latitud y longitud deben ser ploteadas nuevamente después de aplicado los valores de la correcciónes.

Minimización de los errores causados por la diferencia de datums

Para minimizar los problemas cauzados por la diferencia de datums se debe:

• Plotear las correcciones sólo en las cartas especificas y las ediciones para las cuales fue hecha dicha enmienda, cada corrección de carta es especifica solamente para una edición de ésta. Cuando la misma corrección es hecha sobre dos cartas basándose en diferentes datums, la posición para el mismo accidente no debe diferir significativamente. Esta diferencia es igual al desplazamiento del datum entre los dos datums para esa área.

• Tratar de determinar la fuente y datum de posiciones de un accidente temporal, como por ejemplo una draga. En general éstas están dadas en el datum utilizado en el área en cuestión, ya que las mismas usualmente están posicionados usando satélites, el datum normalmente empleado es el WGS. Si es necesario corregir un datum, debe ser hallado en una carta del área.

• Recordar que si el datum de un accidente ploteado no es conocido, pueden obtenerse posiciones

inexactas. Es de sabio admitir un margen de error si existe alguna duda acerca del datum.

• Conocer como el datum del sistema de posicionamiento que usted está utilizando (Sistema de Radionavegación Hiperbólico - **Loran**, Sistema de Posicionamiento Global - **GPS**, etc.) esta relacionado a su carta. El GPS y otros sistemas modernos de posicionamiento usan el datum WGS. Si su carta está en otro datum, usted debe aplicar una corrección de datum cuando plotee la posición del GPS en la carta.

La geodesia moderna puede apoyar al objetivo de producción de todas las cartas del mundo en el mismo datum. Acoplando una carta electrónica con el posicionamiento del satélite se eliminará el problema de la diferencia de datum debido a que las posiciones obtenidas **electrónicamente** y las cartas de video en las cuales éstas están representadas, son derivadas del nuevo datum de covertura mundial.

1.7 Unidades náuticas de medida

Unidades de longitud y velocidad utilizadas en navegación

Para la medición de distancia, profundidades, alturas de los objetos (faros, montañas, etc), así como la velocidad del buque, en navegación se utilizan las siguientes unidades de longitud y velocidad:

La milla náutica es una unidad de longitud igual al largo de 1' de meridiano del elipsoide terrestre que se determina por la fórmula:

$$\Delta 1' = 1852{,}23 - 9{,}34 \cos 2\varphi$$

Analizando esta fórmula se observa que la milla náutica es una magnitud variable. Pero una unidad de longitud variable resulta muy incómoda, por eso como unidad de longitud se toma la milla estandar igual a 1852 m, en una latitud media $\varphi = 45°$.

La milla náutica es la principal unidad de longitud en el mar.

El cable es una unidad de longitud igual a 0,1 milla, o sea 185,2 m. El cable se usa para medir pequeñas distancias en el mar, tales como la distancia entre buques, el ancho de los canales, el alcance de los hidrolocalizadores, etc.

En la artilleria se usa el cable de artillerio, igual a 182,88 m.

La diferencia entre el cable marino y el cable artillero no es muy grande, pero para medir grandes distancias es necesario tenerla en cuenta.

Para la conversión de unos cables en otros existen coeficientes de conversión:

$$D_{cab} = 0{,}987\, D_{cab.\,art.} \qquad (9)$$
$$D_{cab.\,art} = 1{,}013\, D_{cab.}\,,$$

donde,

D_{cab} - distancia en cables marinos.

$D_{cab.\,art}$ - distancia en cables artillero.

La profundidad de los mares y la altura de los objetos sobre el nivel del mar se mide en metros. Cuando se utilizan cartas inglesas y otros publicaciones de navegación podemos encontrar otras unidades de longitud.

La braza es una unidad de longitud igual a 1,83 m, y se utiliza para medir la profundidad en las cartas náuticas inglesas.

El pie es una unidad de longitud igual a 30, 48 cm. Se utiliza para medir la altura de los objetos y bajas profundidades en las cartas inglesas, para el paso de unas unidades de longitud a otras se emplean las Tablas Útiles al Navegante (TUN); tablas 44 -a, 44 - b, 45 - b, 46 - a y 46 - b.

La principal unidad de velocidad es el nudo. Un nudo corresponde a una milla por hora.

Por ejemplo. Una velocidad de 24 nudos corresponde a 24 millas / horas. Cuando se resuelven algunos ejercicios de navegación es más práctico expresar la velocidad en cables por minutos (cab/min).
La relación entre nudos y cables por minuto se determina por la expresión:

$$V = \text{cab/min} = \frac{V(\text{nudos})}{6}. \qquad (10)$$

La velocidad del viento, en navegación, se expresa en metros por saegundo (m/s).

1.8 Alcance de visibilidad de los objetos en el mar

El horizonte visible del observador y su distancia.

Supongamos que el observador se encuentra en el punto A de la superficie de la Tierra (Fig.19). El ojo del observador estará en el punto A a una altura sobre la superficie terrestre.

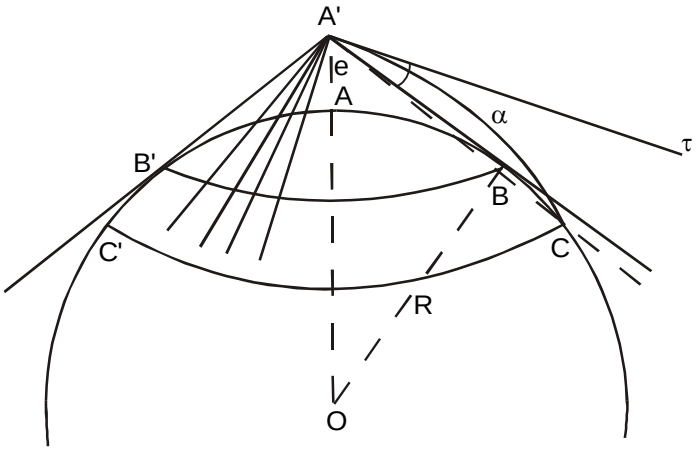


Fig.19 Distancia del horizonte visible del observador

Desde el punto A' tracemos tangentes a la superficie de la Tierra. Uniendo los puntos de tangencia obtenemos un círculo menor B - B' en la superficie de la Tierra.

Si la Tierra no tuviera atmósfera, los rayos visuales se propagarían por estas tangentes y el observador vería el sector de la Tierra que está limitado por el círculo menor B - B'. Sin embargo Tierra está rodeada por la atmósfera, cuya densidad disminuye paulatinamente con la altura. Por consiguiente los rayos visuales del ojo del observador pasan por la capas de la atmósfera que tienen diferentes densidades, donde se refractan, es decir, se desvían.

En la figura19 se puede observar que el rayo visual pasará por la curvatura A' a C. Por curvaturas similares pasarán también los rayos visuales del observador en otras direcciones y éste verá el sector de la superficie de la Tierra limitado por el círculo menor C - C' que es el horizonte visible del observador. Dicho observador ve este círculo en forma de una línea, donde aparentemente el cielo se une con el mar.

El fenómeno de refracción de los rayos visuales se llama **refracción terrestre**. Bajo el efecto de este fenómeno refracción terrestre el observador ve el horizonte a la distancia AC, que es la distancia del horizonte visible del observador (D_e).

Para la determinación de la distancia del horizonte visible en el mar (D_e), determinemos primeramente el largo del segmento A' B del triángulo A' o B, en el cual OB = R (radio de la Tierra), OA' = R + e (e=altura del ojo del observador).

Representemos A' B por D_T

$$A'B^2 = A'O^2 - OB^2$$

Sustituyendo en esta expresión los valores de las magnitudes que la componen obtenemos:

$$D_T^2 = (R+e) - R^2 = R^2 + 2Re + e^2 - R^2 = 2Re + e^2 =$$

$$= 2Re\left(1 + \frac{e}{2R}\right).$$

Como la altura del ojo del observador es muy pequeña en comparación con el radio de la Tierra R, la expresión e/2R tiende a cero y se puede despreciar, entonces:

$$D_T^2 = 2Re \quad \text{ó} \quad D_T = \sqrt{2Re}$$

Debido a que la altura del ojo del observador es pequeña, se puede plantear que:

$$A'B = AB,$$

es decir, $AB = D_T = \sqrt{2Re},$

donde D_T - distancia teórica del horizonte visible.

Bajo el efecto de la refracción terrestre el observador ve al horizonte más alejado en la distancia:

$$\Delta D = BC$$

El valor BC depende del coeficiente de la refracción terrestre x y se determina por la expresión:

$$BC = K\sqrt{2Re}$$

donde $K = \frac{X}{2}$

El valor medio del coeficiente de la refracción terrestre es x = 0,16, por consiguiente K = 0,08.

Entonces: $BC = 0{,}08\sqrt{2Re}$

De esta forma la distancia verdadera del horizonte visible se determina por la expresión:

$$AC = De = D_T + \Delta = \sqrt{2Re} + 0{,}08\sqrt{2Re}$$

ó

$$D_T = 1{,}08\sqrt{2Re}$$

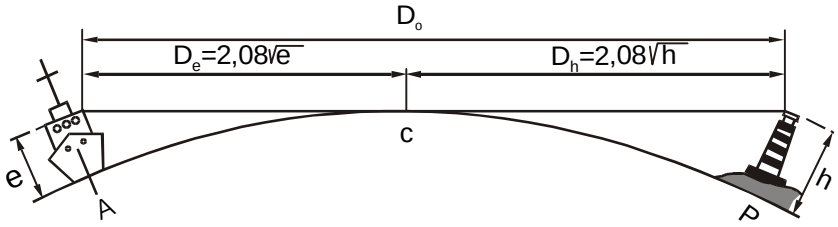


Fig.20 Distancia de visibilidad de los objetos

Para obtener la distancia del horizonte visible en millas es necesario expresar los valores R y e también en millas; entonces:

$$D_e = 1{,}08\sqrt{2x3437{,}7\frac{e}{1852}} = 2{,}08\sqrt{e},$$

$$D_e = 2{,}08\sqrt{e}, \qquad (11)$$

donde:

D_e - distancia real del horizonte visible en millas.

e - altura del ojo del observador en metros.

La expresión (10) para la determinación de D_e es válida sólo cuando la atmósfera es transparente, es decir , para un tiempo despejado sin nieblas, lluvias, etc.

El valor de D_e se puede determinar por la fórmula (10) y por la tabla 22 -a de la tabla TUN

1.9 Distancia de la visibilidad de los objetos en la mar

El rayo visual del ojo del observador A' al tocar la superficie de la Tierra en el punto c continuará propagándose. Si en su propagación el rayo se encuentra con un objeto, el observador verá este objeto (Fig. 20).

De esta forma, el observador que se encuentra en el punto A y que tuvo una altura de su ojo, verá al objeto de altura h que se encuentraen el punto P. La distancia AP desde el observador hasta el objeto visto por él se llama **distancia de visibilidad del objeto** D_o.

En la figura 20 se ve que:

$$D_o = D_o + D_h \qquad (12)$$

donde:

D_e _ distancia del horizonte visible del observador, que tiene una altura e de su ojo.

D_h - distancia del horizonte visible desde la altura del objeto.

De la misma forma que encontramos D_e:

$$D_h = 2{,}08\sqrt{h} \qquad (13)$$

Por consiguiente:

$$D_t = 2{,}08\sqrt{e} + 2{,}08\sqrt{H}$$

ó

$$D_t = 2{,}08\left(\sqrt{e} + \sqrt{H}\right) \qquad (14)$$

El valor calculado por la expresión (12) de la distancia de visibilidad de los objetos D_o se llama **distancia geográfica (geométrica)** de visibilidad de los objetos. Esta distancia depende de las alturas del ojo y del objeto. Este valor es real sólo para la atmósfera transparente.

La distancia geográfica de visibilidad de los objetos se puede calcular por la fórmula (13) o por la tabla 22 de las tablas TUN. Para entrar en esta tablas es necesario conocer la altura del ojo y la altura del objeto h. Los valores hallados se suman y el resultado será D_o.

Es más complejo determinar D_o para las horas oscuras del día. Aquí la visibilidad disminuye para los objetos que no tienen luz propia y la distancia de visibilidad se determina principalmente por la sensibilidad del observador. La sensibilidad del ojo del observador en este caso, disminuye considerablemente, lo que conlleva a una gran disminución de la distancia de visibilidad de los objetos.La principal característica de la distancia de visibilidad en las horas oscuras del día es la distancia de visibilidad de las luces en el mar.

De noche, cuando la atmósfera es transparente, la distancia de visibilidad de las luces se llama **distancia optica de visibilidad.**

La distancia óptica depende de la intensidad de la fuente de luz, de su color y demás características. Cuanto más potente sea la fuente de luz, mayor será su distancia de visibilidad. La luz de color blanco se ve a mayor distancia que las luces rojas y verdes; y las luces constantes tienen mayor visibilidad que las luces intermitentes.

La distancia óptica de visibilidad se calcula por gráficas especiales o se determina en la práctica por observaciones.

1.10 Distancia de visibilidad de los objetos indicada en las cartas

En las cartas náuticas en otros publicaciones aparece la distancia de visibilidad de señales marítimas balizamientos. Esta distancia está calculada para una altura del ojo del observador igual a 5 m. (Fig. 21).

Por lo que ;

$$D_t = 2{,}08\left(\sqrt{h} + \sqrt{5}\right). \qquad (15)$$

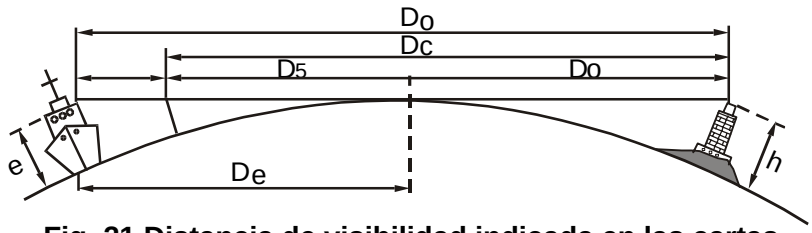


Fig. 21 Distancia de visibilidad indicada en las cartas

Si la altura del ojo del observador es desigual a 5 m, para determinar la distancia de visibilidad al valor que aparece en la carta, se le debe sumar la corrección ΔD es decir:

$$D_t = D_e + \Delta D$$

de donde,

$\Delta D = D_t - D_e$ corrección en distancia. Sustituyendo los valores de D_t y D_e, obtenemos:

$$\Delta D = 2{,}08\left(\sqrt{e}+\sqrt{h}\right) - 2{,}08\left(\sqrt{h}+\sqrt{5}\right) =$$

$$= 2{,}08\sqrt{e} - 2{,}208\sqrt{5},$$

ya que,

$$2{,}08\sqrt{5} = 4{,}7,$$

entonces,

$$\Delta D = 2{,}08\sqrt{e} - 4{,}7$$

En el caso cuando la distancia geográfica y la distancia óptica de visibilidad de los faros o baliza son desiguales, en las cartas se señala la menor de ellas.

Ejemplo 1: Determinar la distancia del horizonte visible del observador D_e para la altura del ojo $e = 9$ m.

Solución: Para determinar la distancia del horizonte visible utilizamos la fórmula:

$$D_e = 2{,}08\sqrt{e}$$

Sustituyendo el valor de e obtenemos:

$$D_e = 2{,}08\sqrt{9} = 2{,}08x3 = 6{,}24 \text{millas}.$$

Ejemplo 2: Determinar la distancia del horizonte visible del observador si su ojo tiene una altura de 14,5 m.

Solución: En la tabla 22-a de las tablas TUN determinamos que la distancia del horizonte visible para un observador con e =14,5 m:

$$D_e = 7{,}9 \text{ millas}$$

Ejemplo 3: Calcular la distancia de visibilidad de un objeto de altura $h = 43$ m para un observador que tiene una altura de su ojo $e = 17$ m.

Solución: En la tabla 22 de la TUN determinamos D_h=13,6millas y D_e=8,6millas, los valores obtenidos los sumamos y obtenemos:

$$D_t = D_e + D_h = 13,6 + 8,6 = 22,2 \text{ millas}$$

Ejemplo 4: En la carta aparece la distancia geográfica de visibilidad de un objeto.

$$D_c = 18\text{millas}$$

Determinar la distancia de visibilidad del objeto D_t si la altura del ojo del observador e =13 m.

Solución:

1. En la tabla 22 - a de la TUN encontramos D_e para la altura del ojo del observador:

$$e = 13\text{metros}, \quad D_e = 7,5 \text{ millas}$$

2. Hallamos la corrección ΔD para la distancia de visibilidad que aparece en la carta.

$$\Delta D = D_e - 4,7 = 7,5 - 4,7 = 2,8 \text{ millas}$$

3. Determinamos la distancia de visibilidad del objeto por la fórmula:

$$D_t = D_c + \Delta D = 18 + 2,8 = 20,8 \text{ millas}$$

Ejemplo 5: En la carta aparece un faro con una distancia de visibilidad D_c=23 millas. Determinar la distancia de visibilidad total del faro si la altura del ojo del observador es de 3 m.

Solución:

1. En la tabla 22 - a de las tablas TUN hallamos D_e para la altura del observador.

$$e = 3\text{metros}, \quad D_e = 3,6\text{millas}$$

2. Determinar la corrección para la distancia que aparece en la carta:

$$\Delta D = D_e - 4,7 = 3,6 - 4,7 = -1,1\text{millas.}$$

3. Determinemos la distancia de visibilidad por la fórmula:

$$D_t = D_c + \Delta D = 23 + (-1,1) = 21,9 \text{ millas.}$$

Ejercicios propuestos:

1) Determinar la distancia del horizonte visible del observador si su ojo tiene una altura de 17,5 m.

Respuesta: 8,7m

2) Calcular la distancia de visibilidad de un objeto de altura h = 27,5 m para un observador que tiene una altura de su ojo e = 21,8 m.

Respuesta: 20,6 m

3) En la carta aparece la distancia geográfica de visibilidad de un objeto D_c= 21millas:

Determinar la distancia de visibilidad del objeto D_T si la altura del ojo del observador e = 13 m.

Respuesta: 23,8 m

5) El buque navegó desde un punto cuyas coordenadas son φ_1= 41°28,0N, λ_1= 66°25,0W hasta el punto con coordenadas φ_2= 26°53,0N, λ_2= 89°36,0W.

Determinar $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$ y . Representar gráficamente los resultados.

Respuesta: $\Delta\varphi$= 14°35,0S, $\Delta\lambda$= 156°01,0E

6) El buque partió desde el punto con coordenadas φ_1= 34°36,0N, λ_1= 77°18,0W y llegó al punto de destino con coordenadas φ_2= 52°15,0N, λ_2= 12°43,0E.

Determinar $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$. Representar gráficamente los resultados.

Respuesta: $\Delta\varphi$= 17°39,0S, $\Delta\lambda$= 90°01,0E

7) El buque realizó una travesía desde el punto A cuyas coordenadas son φ_1=57°09,0N, λ_1= 112°38,0W hasta el punto B con coordenadas φ_2= 15°35,0N, λ_2= 117°41,0W.

Determinar $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$. Representar gráficamente los resultados.

Respuesta: $\Delta\varphi$= 41°34,0S, $\Delta\lambda$= 121°41,0W

8) Un buque con el objetivo de cumplir una misión efectuó una travesía desde el punto A cuyas coordenadas son φ_1= 19°38,0S, λ_1= 118°43,0E hasta el punto B de coordenadas φ_2= 62°28,0N, λ_2= 036°20,0W.

Determinar $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$. Representar gráficamente los resultados.

Respuesta: $\Delta\varphi$= 82°06,0N, $\Delta\lambda$= 155°03,0W

9) φ_1= 32°27,0S; $\Delta\varphi$= 41°30,0N
λ_1= 118°43,0E; $\Delta\lambda$= 39°43,0W

Calcular φ_2 y λ_2..

Respuesta: φ_2= 09°03,0N, λ_2= 79°13,0E.

10) φ_1= 13°33,0E; $\Delta\varphi$ = 31°26,0S
λ_1= 87°28,0W; $\Delta\lambda$ = 126°19,0W

Calcular φ_2 y λ_2.

Respuesta: φ_2= 17°53,0S; λ_2 = 154°21,0W

11) φ_2= 68°58458,0N; $\Delta\varphi$ = 29°06,0N
λ_2 = 111°48,0E; $\Delta\lambda$ = 106°09,0E

Calcular φ_1 y λ_1

Respuesta: φ_1= 39°52,0N; λ_1 = 5°39,0E

12) φ_2= 14°37,0E; $\Delta\varphi$ = 16°51,0S
λ_2 = 96°320W; $\Delta\lambda$ = 76°14,0E;

Calcular φ_1 y λ_1

Respuesta: φ_1= 2°14,0N; λ_1 = 172°46,0W

CAPITULO II

DETERMINACIÓN DE DIRECCIONES EN EL MAR

Capítulo II

DETERMINACIÓN DE LAS DIRECCIONES EN EL MAR

2. Sistema de direcciones en el plano del horizonte verdadero

Los planos del meridiano verdadero y el primer vertical al cortarse con el plano del horizonte verdadero forma las líneas: N-S del meridiano verdadero y E-W del primer vertical (figura 5). Estas líneas determinan cuatro direcciones principales en el plano del horizonte verdadero: N, S, E Y W y dividen este plano en cuatro cuadrantes: NE; SE; SW y NW.

Existen varios sistemas para la medición de las direccioneas en el plano del horizonte verdadero.

Sistema de cuartas

En este sistema existen cuatro direcciones o puntos cardinales o principales: N, E, S, W de los cuales se parte para obtener el resto de las direcciones del sistema. Esto se logra de la siguiente forma:

- Cada una de las cuatro partes originadas por los puntos cardinales se divide a la mitad obteniéndose cuatro nuevas direcciones conocidas como **colaterales**, que son: NE, SE, SW y NW.

- De este modo el horizonte queda dividido en ocho partes, las cuales, al dividirla a su vez a la mitad, dan lugar a ocho nuevas direcciones, las intercardinales, que son : NNE, ENE, ESE, SSW, WSW, WNW y NNW.

- Por tanto tenemos 16 direcciones: cuatro cardinales, cuatro colaterales y ocho intercardinales, pero como este sistema consta de 32 direcciones y faltan 16, estás últimas se obtiénen dividiendo a la mitad las partes anteriormente halladas hasta obtener la cuarta. Por lo antes expuesto tene mos que:

$$1 \text{ Cuarta} = \frac{360}{32} = 11°15'$$

La forma en que se dan las direcciones en este sistema es;

N1/4 NE, NE1/4 NNE, etc lo que se lee respectivamente norte una cuarta al noreste, noreste una cuarta al norte noroeste.

Este sistema surgió con la navegación a vela por la costumbre de nombrar a los vientos por el punto del horizonte de donde soplan, de aquí el nombre de Rosa de los Vientos, que se le da en ocasiones.

En la actualidad está en desuso, por ser poco exacto (su exactitud es de ± 11°25') y se emplea limitadamente, para indicar la dirección del viento y de las corrientes.

Sistema cuadrantal

La aparición de los buques de vapor y el desarrollo en general de la navegación, trajo como consecuencia que el sistema de cuartas resultara insuficiente para navegar con precisión. Este derivó en la aparición del sistema cuadrantal, en el que el horizonte verdadero se divide en cuatro cuadrantes por las

líneas NS y EW: NE, SE, SW y NW. Como inicio de la medición (0°) se tomá la mitad norte (N) o Sur (S) del meridiano verdadero y se mide hacia el este o hacia el oeste de 0° a 90° en cada cuadrante independiente (Fig 23).

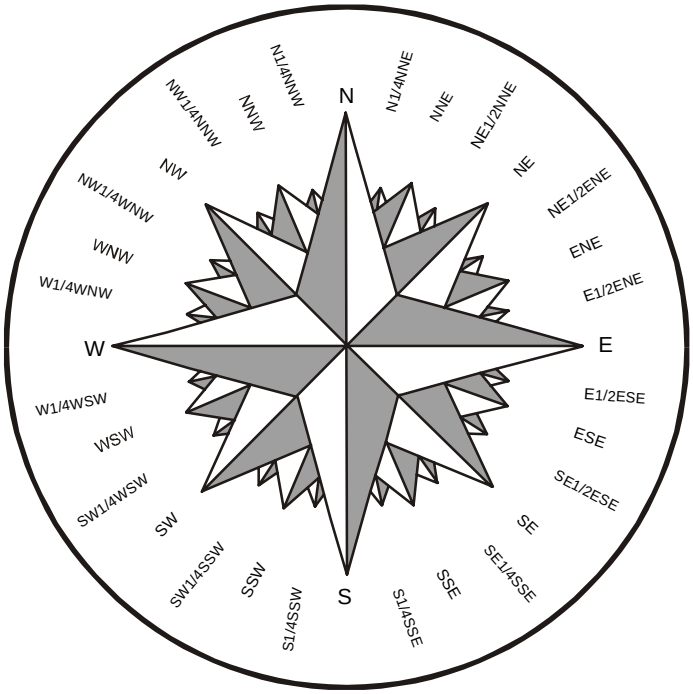


Fig. 22 Sistema cuadrantal de medición de direcciones

En la actualidad este sistema solo se utiliza para solucionar por trigonometría esférica los problemas de navegación ortodrómica y astronomía.

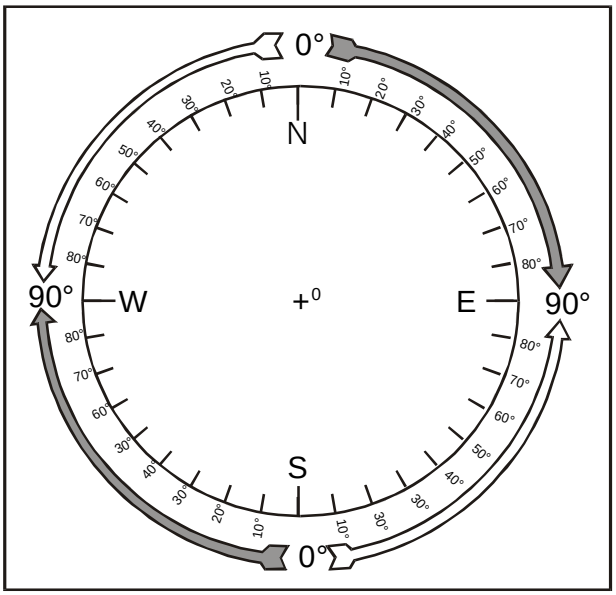


Fig.23 Sistema cuadrantal de medición de direcciones

- En el cuadrante NE desde el N hacia el E y de 0° a 90°

- En el cuadrante SE desde el S hacia el E y de 0° a 90°

- En el cuadrante SW desde el S hacia el W y de 0° a 90°

- En el cuadrante NW desde el N hacia el W y de 0° a 90°

Para evitar los valores multinuméricos cuando se escribe la dirección se señala el cuadrante donde ésta está situada.

Ejemplo: 60° NE; 30°SW; 45°NW; 55°SE.

Conversión del sistema circular al sistema cuadrantal de direcciones

1. Las direcciones de 0° a 90° en el sistema circular conservan en su conversión el valor numérico y reciben la denominación NE.

Ejemplo 35° →35°NE;70° →70°NE (Fig.24).

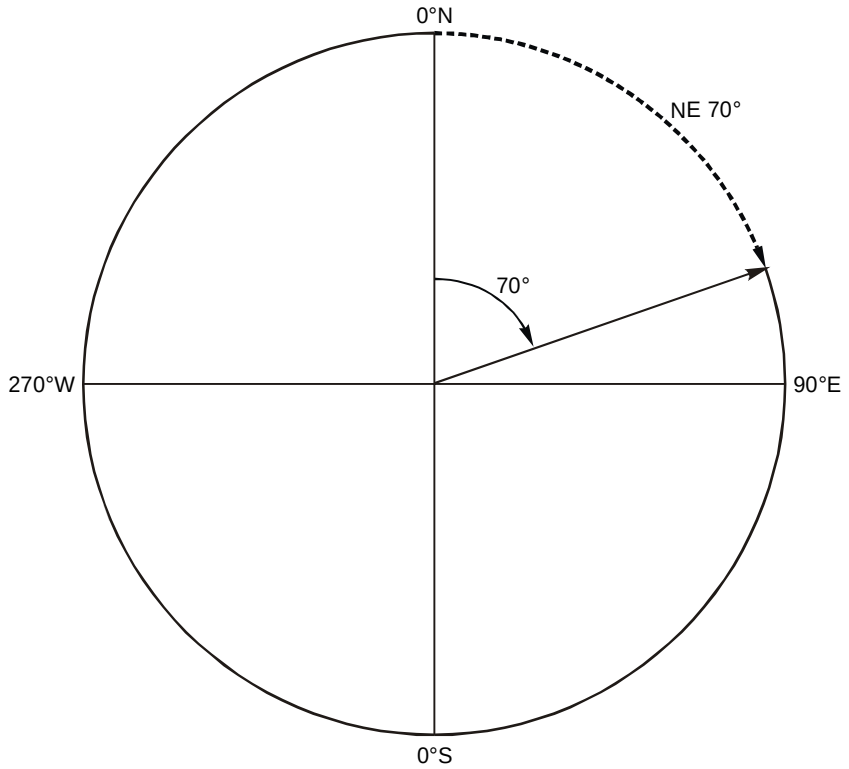


Fig. 24

2. En la conversión de dirección del sistema circular de 90° a 180° al sistema cuadrantal es necesario restar sus valores de 180° y al resultado obtenido darle la denominación SE.

Ejemplo 130° →50°SE; 155 → 25°SE; 140° → 40°SE (Fig.25).

3. Para la conversión de direcciones del sistema circular comprendidas entre 180° y 270° al sistema cuadrantal, es necesario restarle a la dirección circular 180° y el resultado obtenido darle la denominación correspondiente: SW

Ejemplo: 220° → 40°SW; 250° →70°SW (Fig 26).

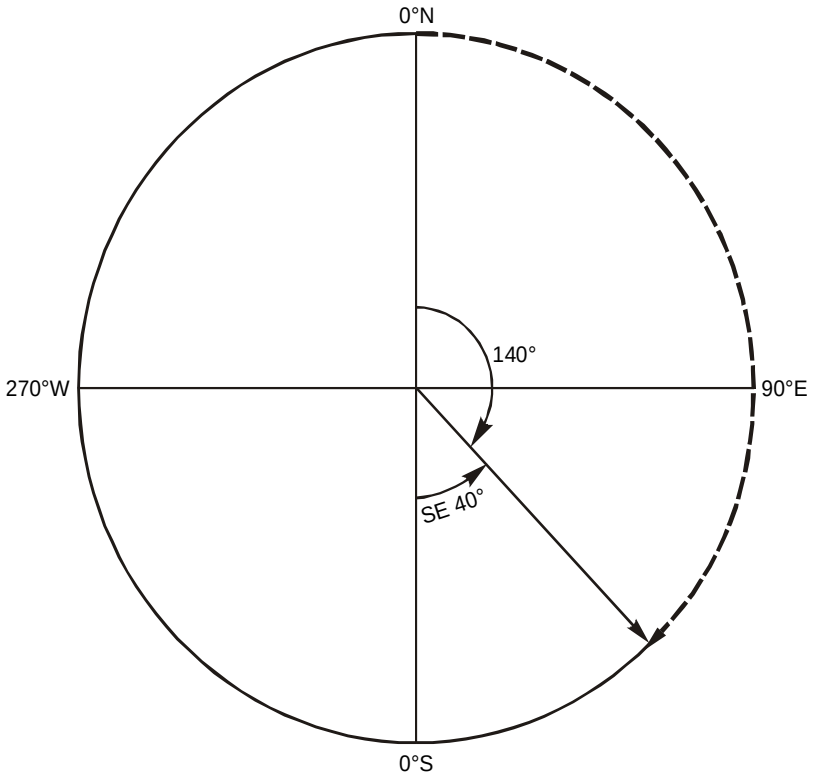


Fig. 25

4. Para la conversión de direcciones del sistema circular comprendidas entre 270° y 360° al sistema cuadrantal, se debe restar la dirección circular de 360° y el valor obtenido darle la denominación NW.

Conversión de direcciones del sistema cuadrantal en direcciones del sistema circular

1. Para convertir direcciones del cuadrante NE del sistema cuadrantal al sistema circular, es necesario dejar los valores numéricos anteriores y despreciar la denominación .

Ejemplo: 65°NE →65°; 24°NE →24°.

2. Cuando se convierten direcciones del cuadrante SE del sistema cuadrantal a direcciones del sistema circular, es necesario restar el valor numérico de 180° y dejar el resultado sin denominación.

Ejemplo: 40°SE →140°; 75°SE →105°.

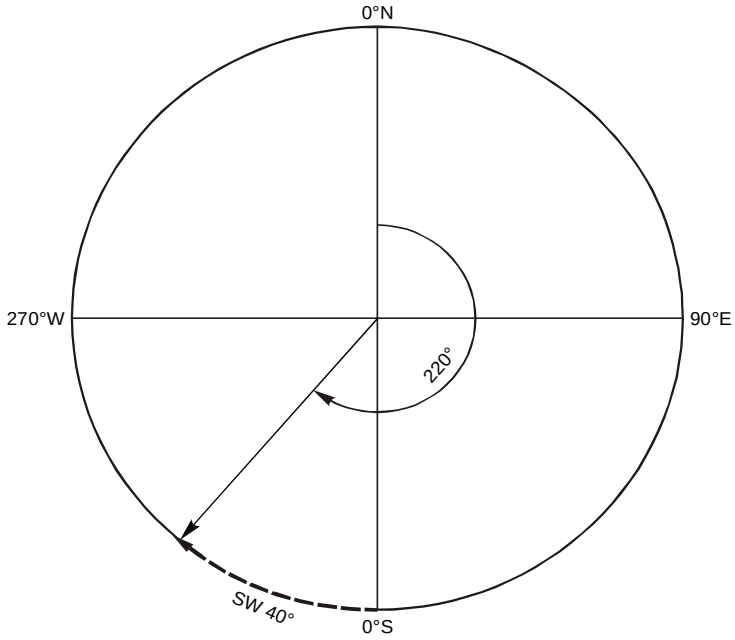


Fig. 26

3. Para la conversión de direcciones SW del sistema cuadrantal en direcciones del sistema circular, es necesario sumarle la dirección dada 180° y tomar el resultado sin denominación.

Ejemplo: 70° SW → 250°; 20°SW → 200°.

4. Cuando se convierten direcciones del cuadrante NW del sistema cuadrantal en direcciones del sistema circular, es necesario restar la dirección dada de 360° y dejar el resultado sin denominación.

Ejemplo: 50° NW → 310°; 35° NW → 325°

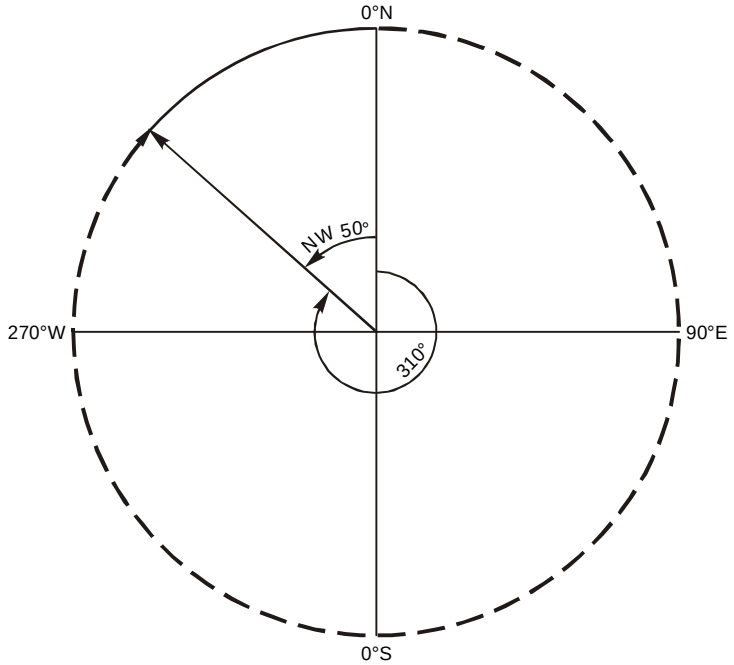


Fig. 27

Ejemplo 1: Convertir al sistema cuadrantal las siguientes direcciones.

a) 40°; b) 130°; c) 245°; d) 320°.

Solución:

a) $40° \rightarrow 40°NE$; b) $130° \rightarrow 50°SE$

c) $245° \rightarrow 65°SE$; d) $130° \rightarrow 40°NW$

Ejemplo 2: Realizar la conversión de las siguientes direcciones cuadrantales al sistema circular.

a) 60°NE; b) 30°SE; c) 50°; d) 80°NW.

Solución:

a) $60°NE \rightarrow 60°$; b) $30°SE \rightarrow 150°$

c) $50°SW \rightarrow 320°$; d) $80°NW \rightarrow 280°$

Sistema semicircular

Este sistema se utiliza para resolver algunos de los problemas que se presentan en la navegación electrónica y astronomía náutica (Fig 28).

En el sistema semicircular el plano del horizonte verdadero se divide en dos partes de 180° cada una, por la línea N-S. Como comienzo de la medición de direcciones (0°) se toma la mitad norte o sur del meridiano. La medición se realiza desde N o S hacia el este u este de 0° a 180° (Fig. 28) para evitar las direcciones multinuméricas, a cada dirección se le da un rótulo diferente acompañada por el valor numérico. El orden establecido del rotulado de las direcciones es el siguiente:

- Primero se escribe la letra de la dirección donde comienza la medición, N o S.

- Se escribe el valor numérico de la dirección en grados.

- Al final se señala la dirección hacia donde se realiza la medición de las direcciones: E u W.

Ejemplo: N 125°E ; S 45°W

Sistema circular (Sexagesimal)

El sistema circular, surge como consecuencia de la necesidad de eliminar las devestanjas que presentan los sistemas anteriormente descritos. Estas desventajas se traducen en el hecho de que las direcciones se miden en diferentes sentidos y se designan con letras y cifras.

Sin embargo en este sistema, las direcciones se miden desde la parte norte del meridiano verdadero, al que corresponde el valor 0° hasta 360°; siempre en el sentido de las manesillas del reloj.

En general, en la actualidad todos los navegantes realizan sus calculos utilizando el sistema sexagesimal, como por ejemplo, para la determinación de la dirección del movimiento del buque y la dirección hacia los puntos de referencia (faros, balizas, cayos, etc), a su vez las escalas de las Ayudas Electrónicas a

la Navegación estan divididas en grados de este sistema (girocompás, radar, radiogonómetro, etc).

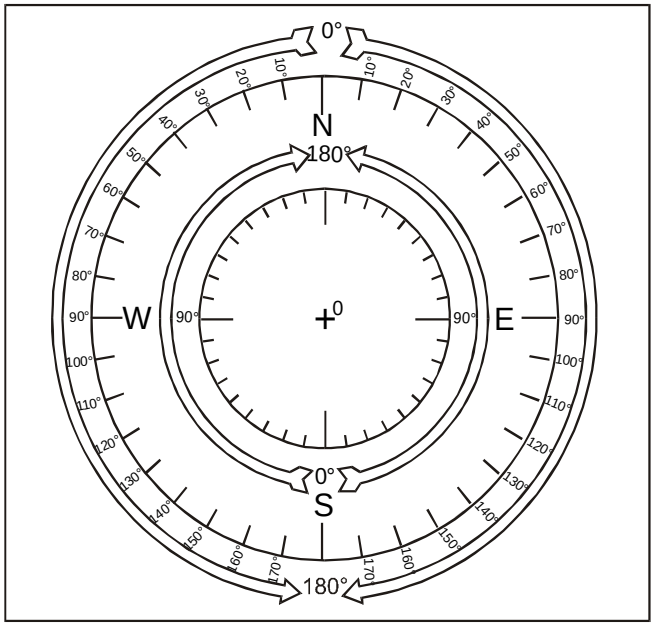


Fig.28. Sistema semicircular de medición de direcciones

En el sistema circular de medición de las direcciones, el plano del horizonte verdadero se divide en 360° (Fig. 29). En este sistema como comienzo de la medición (0°) se toma la parte norte del meridiano verdadero. La medición de las direcciones se realiza desde el 0° hacia la derecha , es decir, desde la parte norte del meridiano verdadero en dirección del movimiento de las manecillas del reloj hasta 360°. En navegación este sistema se utiliza para la determinación de la dirección del movimiento del buque y la dirección hacia los objetos costeros, etc. Este sistema circular de medición es el principal.

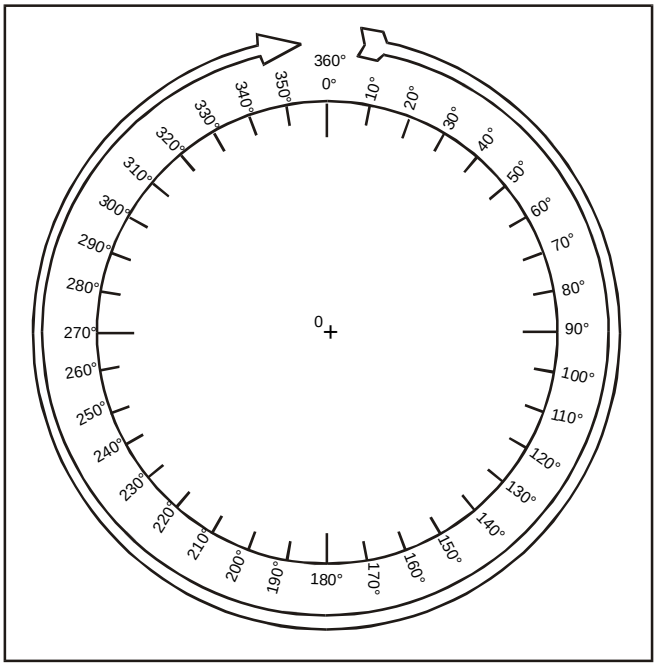


Fig. 29. Sistema circular de medición de direcciones

2.1 Rumbos verdaderos, marcaciones verdaderas y marcaciones relativas

Para la solución de las tareas que se presenta en la navegación es necesario saber determinar la dirección de movimiento del buque (rumbo) y la dirección hacia hacia los objetos costeros (marcaciones).

La dirección de movimiento del buque se determina por su rumbo verdadero Rv. Se denomina **rumbo verdadero al ángulo en el plano del horizonte verdadero, formado entre la parte norte del meridiano** verdadero y el plano diametral del buque. **Plano diametral del buque** se llama al plano vertical que pasa por su eje longitudinal de simetría. El plano al cortarse con el plano del horizonte verdadero forma la línea de rumbo del buque.

De esta forma **el rumbo verdadero Rv** es el ángulo formado entre la parte norte del meridiano verdadero y la línea de rumbo del buque (Fig.30).

La dirección hacia un objeto visible se determina por la marcación verdadera Mv

Marcación verdadera Mv: se llama al ángulo en el plano del horizonte verdadero formado entre la mitad norte del meridiano verdadero y la dirección hacia el objeto.

El plano vertical que pasa por el ojo del observador y el objeto se llama **plano visual**. Este último al cortarse con el plano del horizonte verdadero forma la línea de marcación que es a su vez la dirección hacia el objeto. La dirección inversa a la marcación verdadera se llama **marcación verdadera inversa MIv**.

$$MIv = Mv \pm 180° \ (+ 180° \text{ Si } Mv < 180° \text{ y } - 180° \text{ Si } Mv > 180°)$$

En determinados casos es más cómodo determinar la dirección hacia el objeto con relación al plano diametral del buque, es decir, la marcación relativa Mr.

Marcación relativa (Mr): Es el ángulo entre el plano diametral del buque y la dirección hacia el objeto (Fig.30)). La marcación relativa se mide de 0° a 180° a partir del plano diametral desde la proa hacia babor o estribor.

La marcación relativa que se mide hacia estribor se llama **marcación relativa de estribor** Mr (Er) y la marcación relativa que se mide hacia babor se llama marcación relativa de babor Mr Er.

En algunos casos la marcación relativa se mide en el sistema circular, de 0° a 360°. La medición se realiza desde proa en sentido de las manecillas del reloj.

La marcación relativa en el sistema circular se utiliza para la determinación de las radiomarcaciones, en la introducción de este parámetro en los dispositivos calculadores y para otras tareas.

La marcación relativa en el sistema circular se simboliza por LMr -lectura de la marcación relativa. La dependencia entre las marcaciones relativas y la lectura de la marcación relativa se determina por las expresiones siguientes:

$$LMr = Mr \ (Er)$$

$$LMr = 360° - Mr \ (Br)$$

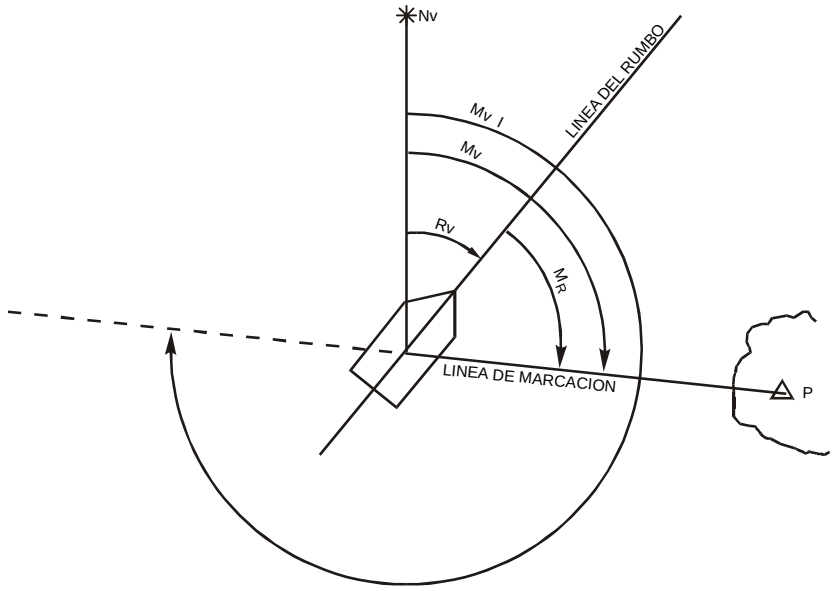


Fig. 30 Rumbo verdadero, marcación verdadera y marcación relativa

La dirección perpendicular al plano diametral del buque se denomina **través.** Los objetos que se encuentran en marcaciones relativas Mr = 90° a babor o estribor, se encuentran en el través.

De la figura 31 a y b vemos que se puede establecer determinada relación entre Rv, Mv y Mr.

Mv = Rv + Mr (Er)

Mr = Rv- Mr (Br)

En la solución de ejercicios de navegación está establecido, que a las marcación relativa de babor se le agregua el signo menos (-) y a las marcaciones relativas de estribor el signo más (+), entonces la relación que existe entre Mv, Rv y Mr, se expresa por la fórmula algebraica:

Mv = Rv + Mr (17)

Por lo que:

Rv = Mv - Mr

Mr = Mv - Rv

La marcación verdadera del través se calcula por la fórmula: $M_v = R_v + (\pm 90°)$; + 90° cuando el objeto está a estribor ; - 90° cuando el objeto está a babor).

Ejemplo1: Rv = 120,0°; Mr(Er)= 45°. Determinar Mv y MvI.

Solución:

Mv = Rv + Mr; Mv = 120° + 45° = 165,0°

MvI = Mv - 180°; MvI = 165° + 180° = 345,0°

Ejemplo 2: Rv = 245,0°; Mr(Br) = 60,0°. Determinar Mv y Mvl .

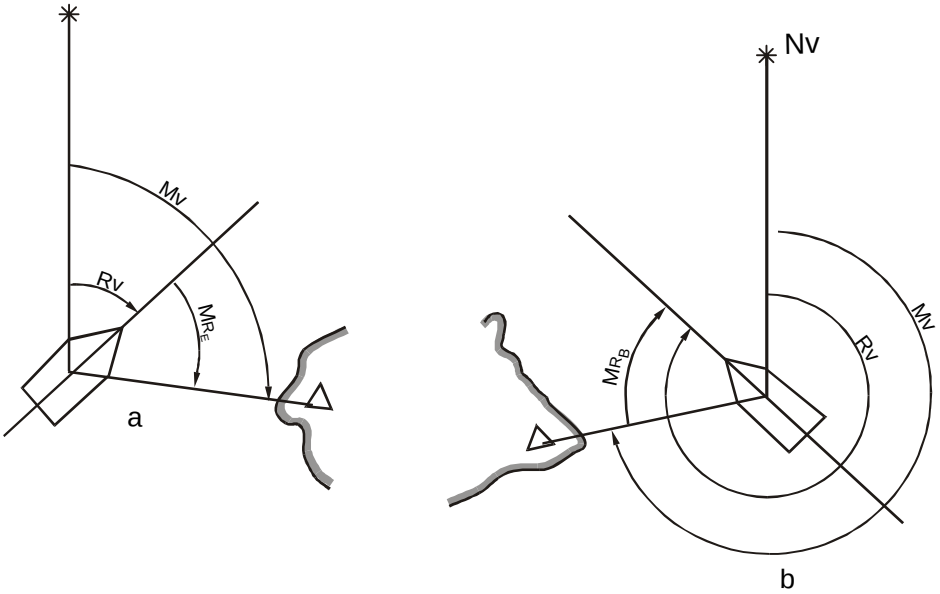


Fig. 31 Relación entre Rv, Mv y Mr

Solución: Mv = 245,0°+ (-60°) = 185,0°

Mvl = 185°-180° = 5,0°

Ejemplo 3: R_v = 30,0°; M_r B_r = 70°. Determinar Mv y Mvl .

Solución: Mv = Rv + Mr; Mv = 30° + (-70°) = 40,0°, ya que Mv no puede tener valor negativo, el resultado negativo obteniendo lo restamos de 360°:

Mv = 360° - 40° = 320,0°

Mvl = 360° - 180° = 140,0°

Ejemplo 4: Rv = 340°; Mr Er = 50,0°. Determinar Mv y Mvl

Solución: Mv = Rv + Mr = 340° + 50° = 390°. La Mv no puede ser mayor de 360°, por eso al resultado obtenido es necesario restarle 360°:

Mv = 390° - 360° = 30,0°;

Mvl = 30° + 180° = 210°

Ejemplo 5: Rv = 30,0°; Mv = 340,0°. Determinar Mr.

Solución: Mr = Mv - Rv; M_r = 340,0°- 30,0° = 310,0°

El resultado es mayor de 180°. Para obtener una Mr menor de 180° es necesario restar el resultado de 360° y agregarle la denominación de babor.

2.2 Breve caracterización de los equipos utilizados para la determinación de direcciones en el mar

Los buques poseen equipos especiales para la determinación de direcciones, tales como girocompases, compases magnéticos y giroazimutes. Todos estos equipos determinan la dirección del meridiano verdadero, con relación al cual se miden las direcciones.

- El **girocompás**: es un equipo electromecánico complejo, basado en la propiedad del giróscopo de conservar invariable en el espacio la dirección inicial de su eje de rotación.

Si se sitúa el eje de tal giróscopo en el plano del meridiano verdadero, su eje constantemente señalará hacia el norte.

Con resultado de la rotación terrestre el plano del meridiano verdadero constantemente rota en el espacio, variando su dirección. Acausa de ello, el eje del giróscopo, aparentemente, se inclina respecto al plano del meridiano verdadero.

Para que el eje del giróscopo siempre señalé la dirección del meridiano verdadero, éste posee un meca nismo especial que lo lleva y lo mantiene en el plano del meridiano, convirtiéndolo en girocompás. La parte principal del girocompás es el elemento sensible, compuesto por un sistema de dos giróscopos.

El eje principal del elemento sensible es el eje del girocompás, el cual señala la dirección del meridiano verdadero.

Conociendo la dirección del meridiano verdadero es posible, con relación a él, determinar el rumbo verdadero y la dirección hacia los objetos que rodean el buque. La lectura del girocompás, a través de un sistema de transmisión eléctrica, se transmite a indicadores especiales de rumbo (repetidores). Los repetidores dedicados a la medición de las marcaciones se complementan con alidadas.

Compás magnético: Su funcionamiento se basa en la propiedad de una aguja magnética libremente suspendida que se sitúa en la dirección de las líneas magnéticas.

La parte principal del compás magnético es el elemento sensible, compuesto por un sistema de agujas magnéticas. El sistema de agujas magnéticas del elemento sensible por sus característias, es similar a una aguja magnética de gran calidad. En lo sucesivo le llamaremos al elemento sensible **aguja magnética.**

La aguja magnética del compás se coloca en estuches metálicos y puede girar libremente alrededor de su eje vertical. Bajo la acción del campo magnético se orienta en la dirección de las líneas magnéticas de este campo.

La dirección de estas líneas magnéticas no coincide con la dirección del meridiano verdadero, por lo que la aguja magnética del compás no señala la dirección del meridiano verdadero. Lógicamente, las direcciones medidas con el compás magnético no serán direcciones verdadera. Para la obtensión de direcciones verdaderas, es necesario corregir las direcciones obtenidas con el compás, con correcciones conocidas en el buque.

El **compás giromagnético** es la combinación del compás magnético y el giróscopo.

El elemento sensible del compás giromagnético es el sistema de agujas magnéticas. Bajo la acción del

campo magnético, él se sitúa en la dirección de las líneas magnéticas.

El giróscopo le da estabilidad al elemento sensible.

En los buques de altas velocidades, en las maniobras y en el balanceo, surgen aceleraciones en el elemento sensible, por lo que la posición de éste se hace inestable y las lecturas del compás constantemente varían.

Para la compensación de la influencia de las aceleraciones se utiliza un giróscopo que estabiliza la posición del elemento sensible. En una posición normal, cuando el eje del elemento sensible coincide con la dirección de las líneas magnéticas, el eje del giróscopo coincide también con estas líneas.

Como resultado de la rotación terrestre, el eje del giróscopo se desvia de la posición normal: aparece la desconcordancia entre el eje del giróscopo y el eje del elemento sensible. Esta discordancia conecta a un mecanismo especial, que hace regresar al eje del giróscopo a la posición inicial. De esta forma el eje del giróscopo todo el tiempo está en concordancia con el eje del elemento sensible.

Cuando el eje del elemento sensible se desvia de la posición normal por las aceleraciones, surge de igual forma la discordancia. Esta discordancia conecta, de forma similar a la anterior, a un mecanismo especial, que hace que el eje del giróscopo coincida con el eje del elemento sensible. Pero como el movimiento del elemento sensible no duran mucho tiempo, el giróscopo no llega a desviarse, siguiendo al elemento sensible. Como resultado el eje del giróscopo realiza solamente pequeñas oscilaciones alrededor de la posición normal, señalando de forma estable su dirección. La lectura del rumbo en este equipo se realiza por la posición del eje giróscopo.

Se llama **giroazimutes** al equipo giroscópico que conserva la dirección dada inicialmente.

Si el eje principal del giroazimut se orienta en el plano del meridiano, éste conservará esta dirección. Para que el giroazimut constantemente señale la dirección con relación al meridiano verdadero, con ayuda del corredor azimutal se calcula el alejamiento del meridiano verdadero y en la lectura del giroazimut. se introduce una corrección.

Sin embargo calcular exactamente el alejamiento del eje del giroazimut de la dirección dada es imposible. Bajo la acción de las fuerzas de fricción y otras causas, el eje del giroazimutes de todas formas, se desplaza de la dirección dada. Este alejamiento se llama **deriva del giroazimut**. Como resultado de la deriva surgen errores que se incrementan con el tiempo de trabajo del giroazimut. Esto conlleva a la necesidad de comparar constantemente las lecturas del giroazimut con otros equipos, o de lo contrario, utilizar el giroazimut por períodos de tiempo limitados.

La única característica positiva del giroazimut es que en él no influyen las fuerzas de inercia que surgen en las maniobras y balanceo del buque.

2.3 Determinación de direcciones en el mar con ayuda del girocompás

Bajo la acción de las fuerzas de fricción e inercia que actúan en el girocompás, su eje principal no se orienta en el plano del meridiano verdadero, sino que se desvía de éste en determinado ángulo. El plano vertical en el cual se coloca el eje del girocompás, se llama **plano del meridiano giroscópico.**

El plano del meridiano giroscópico al cortarse con el plano del horizonte verdero del observador, forma la línea del meridiano giroscópico o la línea del meridiano del compás Na - Sa.

El ángulo que se forma en el plano del horizonte verdadero entre la parte norte del meridiano verdadero y la parte norte del meridiano giroscópico se llama **corrección del girocompás** Δg (Fig. 32) y se representa por la letra Δ (delta) del alfabeto griego.

Si el meridiano giroscópico se desvia del meridiano verdadero hacia el este (derecha) la corrección del girocompás se considera positiva, y si se inclina hacia el oeste, se considera negativa.

Las direcciones medidas con relación al meridiano giroscópico son direcciones giroscópicas.

El ángulo formado entre la mitad norte del meridiano giroscópico y el plano diametral del buque se llama **rumbo aguja giro** Rag (Fig. 33). El rumbo aguja giro se mide siempre de 0° a 360° a partir de la mitad norte del meridiano giroscópico hacia la derecha.

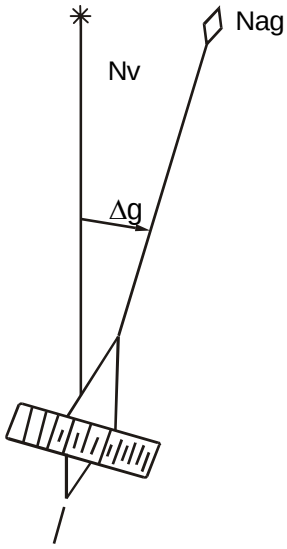


Fig. 32.Corrección del girocompás

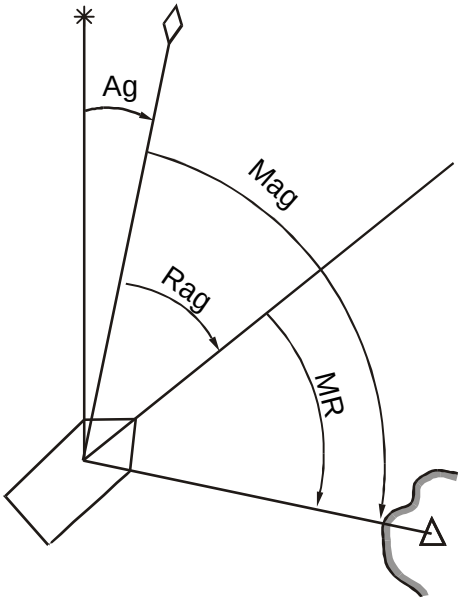


Fig. 33. Dirección giroscópica en el girocomás

El ángulo entre la mitad norte del meridiano giroscópico y la dirección hacia el objeto se llama marcación **aguja giro** Mag y se mide siempre de 0° a 360°.

En base al análisis de la figura 33 se puede escribir que:

$$Mag = Rag + Mr; \quad Rag = Mag - Mr; \quad Mr = Mag - Rag$$

De acuerdo a la figura 33 se puede establecer la relación que existe entre las direcciones verdaderas y las direcciones giroscópicas:

$$Rv = Rag + \Delta g$$
$$Mv = Mag + \Delta g \qquad (18)$$

$$Rag = Rv - \Delta g$$
$$Mag = Mv - \Delta g \qquad (19)$$

$$\Delta g = Rv - Rag$$

$$\Delta g = Mv - Mag \qquad (20)$$

Cuando se resuelvan ejercicios con estas fórmulas se debe tener en cuenta que son fórmulas algebraicas. La corrección Δg , en ellas, se toma con su signo correspondiente.

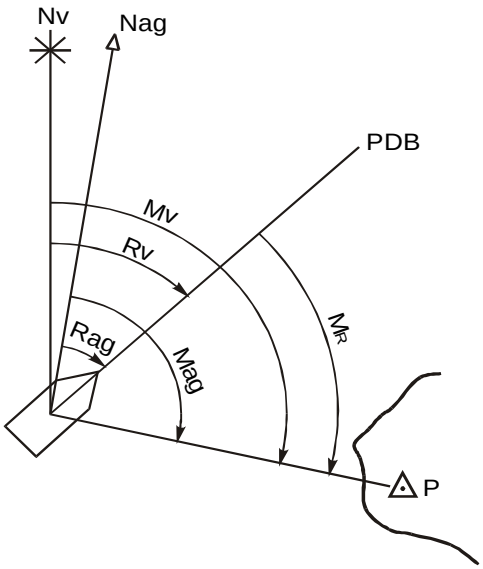


Fig.34 Relación entre las direcciones verdaderas y las direcciones giroscópicas

La corrección del girocompás en el buque se determina por observaciones especiales.

Ejemplo 1: Rv = 134,0°; Δg= + 2,0° Determinar Rv

Solución: Rv = Rag + Δg; Rv= 134,0° + (+ 2,0°) = 136,0°

Ejemplo 2: Rag = 215,0°; Δg = - 1,0° Determinar Rv

Solución: Rv = Rag + Δg; Rv = 215,0° + (- 1,0°) = 214,0°

Ejemplo 3: Rag = 1,0°; Δg = - 2,0°. Determinar Rv

Solución: Rv = Rag + Δg; Rv= 1,0° + (- 2,0°) = -1,0°

Cuando se obtiene el Rv con valor negativo, es necesario restar su valor absoluto de 360°

Rv = 360° - 1° = 359,0°

Ejemplo 4: Rv = 324,0°; Rag = 326,0. Determinar Δg

Solución: Δg = Rv - Rag; Δg = 324,0°- 326,0 = - 2,0°

Ejemplo 5: Rv = 1,0°; Rag = 359,0°. Determinar Δg (Al rumbo verdadero se le debe sumar 360° (360°+1°)

Solución: Δg = Rv - Rag; Δg = 361° - 359,0° = +2

2.4 Determinación de la corrección del girocompás

El conocimiento de la corrección del girocompás es un aspecto de vital importancia para el navegante ya que esto permite corregir las direcciones indicadas por el mismo, obteniendo las direcciones verdaderas (rumbos y marcaciones) que serán ploteadas en las cartas, a su vez permite aplicar los métodos expuestos anteriormente durante los trabajos relacionados con el compás magnético.

Los métodos más empleados en la determinación de la corrección del girocompás (Δg) son los siguientes:

a) Por marcaciones (azimutes) a los astros

b) .Por marcaciones a una enfilación.

a) Por marcaciones a una enfilación se procede como sigue:

Para determinar la corrección del girocompás por este método, en el momento en que el buque corta la enfilación, se toma la marcación aguja giro (Mag) con la alidada y el repetidor del girocompás comparándose posteriormente con la maracación verdadera (Fig. 35);

$$\Delta g = Mv - Mag$$

b) Por marcaciones (azimutes) a los astros

En este método sólo mensionaremos los procedimientos empleados para determinar el Δg, ya que el calculo de la marcación (azimut) verdadera se explica detalladamente en el Cuaderno de Astronomía Náutica. Este método debe ser empleado cuando la altura del astro no sobrepasa los 30°

- Determinar el Δg por azimutes al Sol (para altura observada menor de 30°) caso general (Fig. 36).

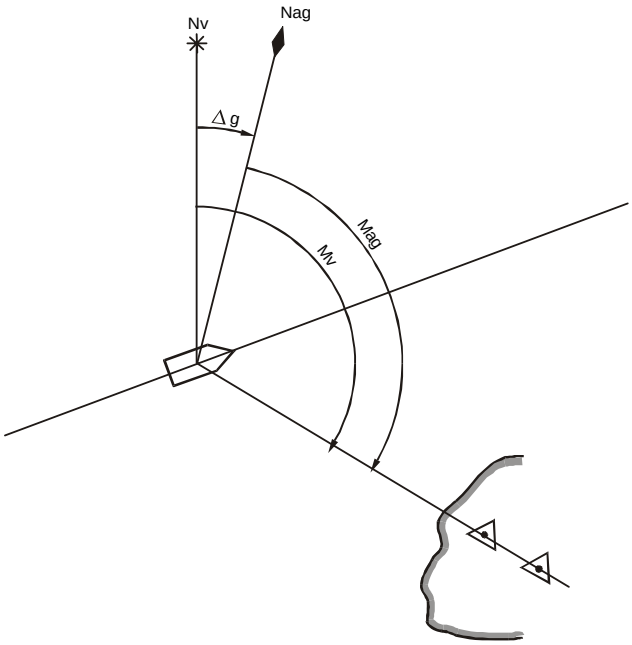


Fig. 35 Determinació del Δg por marcación a una enfilación

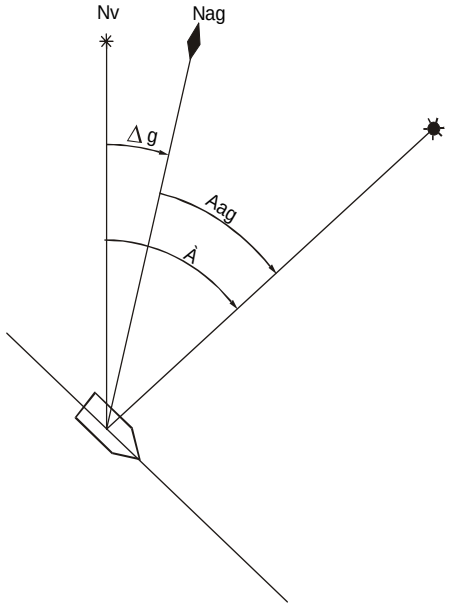


Fig. 36 Determinació del Δg por azimut a los astros

- En el orto u ocaso

En el momento en que el Sól se encuentra a un semidiámetro sobre el horizonte se mide el azimut aguja giro.

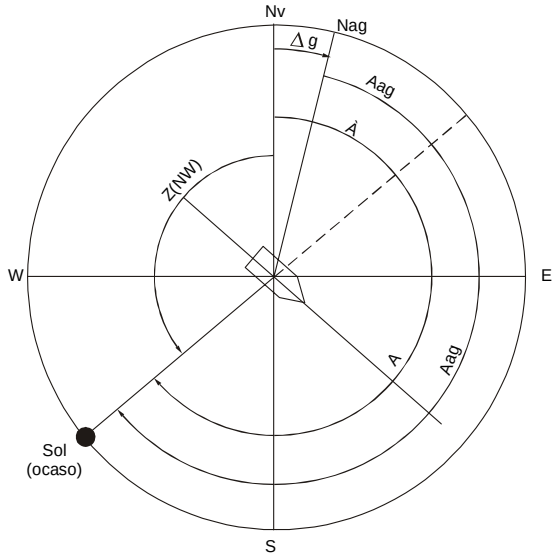


Fig.37 Representación gráfica de la determinación del Δg por azimutes al Sol en el ocaso

En la figura vemos que :

A - azimut del Sol en el ocaso

Z (NW) - ángulo azimutal en el ocaso

- Para calcular el azimut se aplica la fórmula:

A = 360 - Z (NW)

- Calculo del Δg

$\Delta g = A - Aag$ (59)

- Utilizando la estrella Polar.

Ejemplo 1: Supongamos que se ha determinado el azimut a la estrella A = 001°, Aag = 359°.

Calcular el Δg.

Solución: En este caso al azimut de la estrella polar se le suman 360° y después se realiza la operación. (Fig. 38a).

$A = 001° + 360°$
$A = 361°$
$\Delta g = A - Aag$
$= 361° - 359°$
$\Delta g = + 2,0°$

Ejemplo 2: Se ha calculado el azimut a la Polar, A = 358,5°; Aag= 359°. Determinar Δg.

Aplicando directamente la fórmula obtenemos que: (Fig.38b)

$\Delta g = A - Aag$
$=358,5° - 359°$
$\Delta g = - 0,5°$

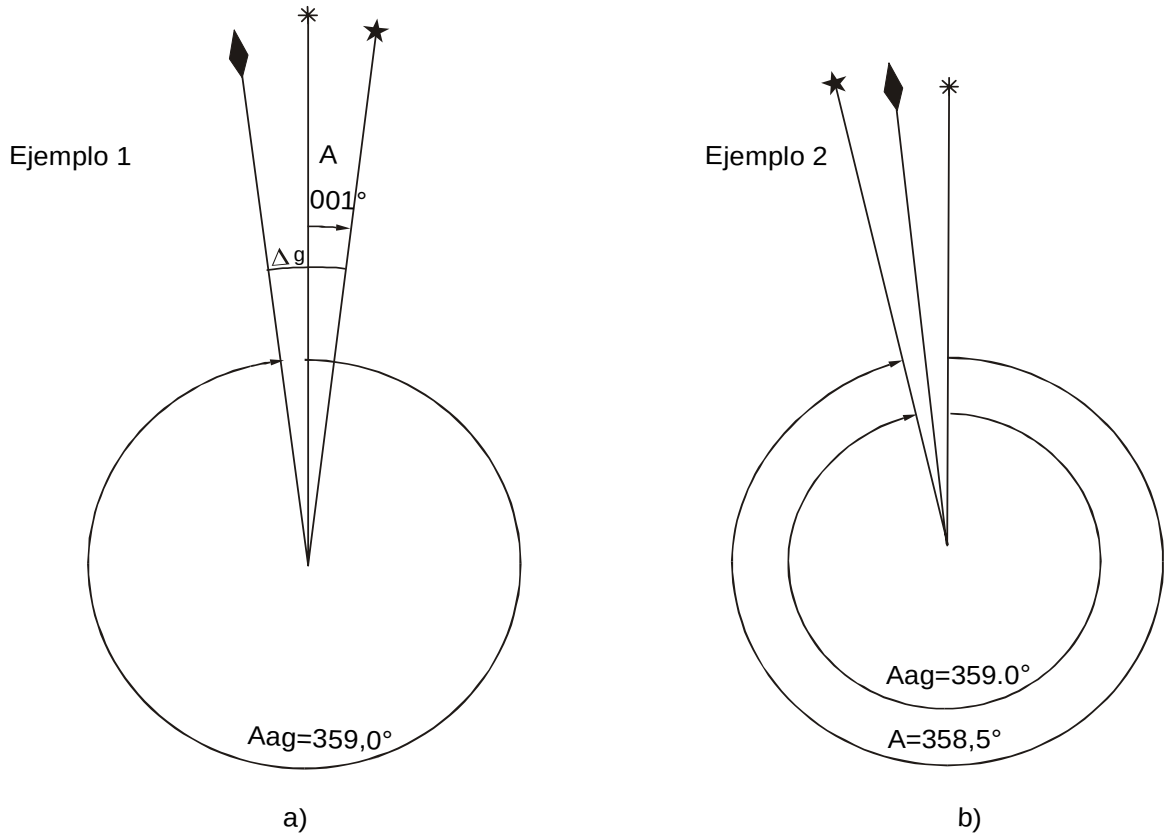


Fig. 38 Determinación del Δg por azimut a la estrella Polar

Cuando se obtiene un resultado mayor de 180°, es necesario restar su valor absoluto de 360° y al resultado de Δg cambiar su signo inverso:

$$\Delta g = 360{,}0° - 358{,}0° = + 2{,}0°$$

2.5 Determinación de direcciones con el compás magnético

1. Nociones generales sobre el magnetismo terrestre y sus elementos

En el espacio que rodea el globo terraqueo en la superficie terrestre, en sus entrañas y por debajo del agua se observa un campo magnético, el cual se denominó **campo magnético terrestre**. La ciencia ha establecido que existen varias fuentes de campos magnéticos en laTierra, por una parte este campo está condicionado con procesos que ocurren en la propia Tierra, en sus entrañas y por otro lado, ello es ocacionado por causas de origen cósmico y estrechamente ligado con la actividad del Sol.

Por tanto la Tierra se comporta como un inmenso imán y sus dos polos magnéticos (Fig. 39) que aun cuando están relativamente proximos a los geográficos no coinciden con ellos. Uno de los polos está situado al norte de canadá aproximadamente en los 73°N y 96°W y el otro en la Antártida, hacia los 70°S y 150°E.

Las líneas de fuerza del campo magnético de la Tierra salen del Polo Sur Magnético y entran en el Polo Norte Magnético.

Se ha considerado que en el Polo Norte Magnético de la Tierra se concentra el magnetismo sur y que en el Polo Sur se concentra el magnetismo norte.

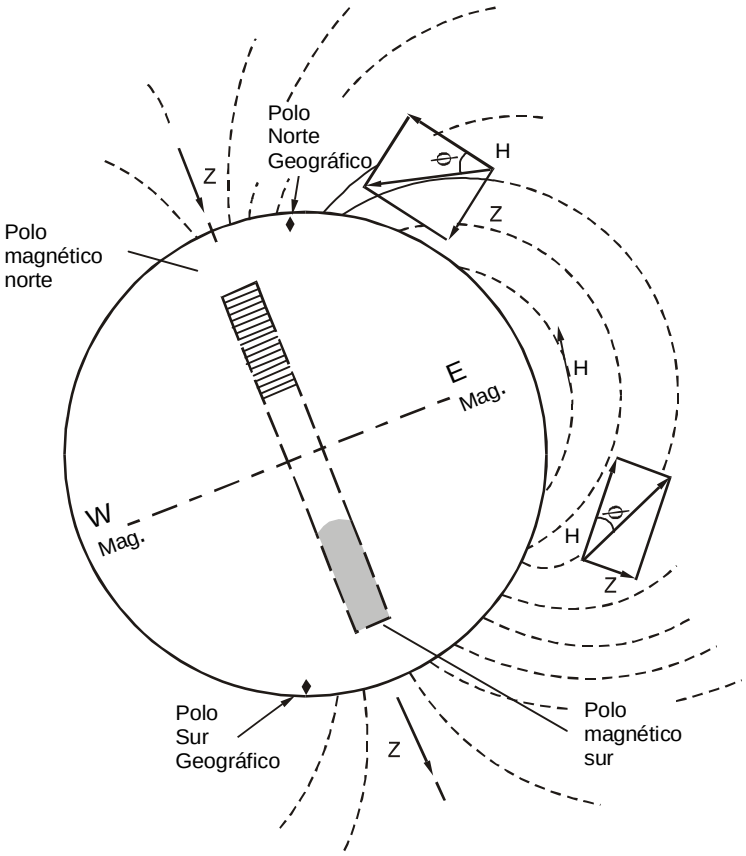


Fig. 39. Campo magnético terrestre

El campo magnético de la Tierra en cada uno de sus puntos se caracteriza por su intensidad, es decir, la fuerza con que actúa sobre el polo magnético, igual a la unidad.

El vector de intensidad del campo magnético de la Tierra en cualquier punto está dirigido por la tangente a la línea magnética de fuerza.

Ya que las líneas de fuerza del campo magnético de la Tierra no son paralelas a su superficie, los vectores de intensidades de este campo magnético forman determinado ángulo con el plano horizontal (Fig. 39).

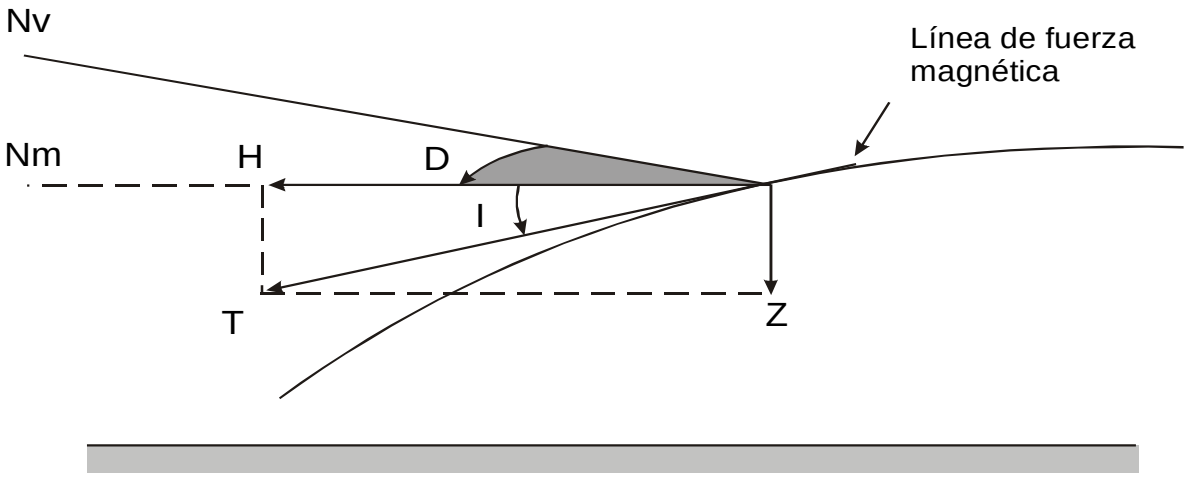


Fig. 40 Fuerzas del magnetismo terrestre

El vector de la intensidad se puede descomponer en dos componentes:

Horizontal $H = T \cos I$; Vertical $Z = T \operatorname{sen} I$ (22)

El ángulo entre el vector de la intensidad del campo magnético T y el plano horizontal se llama Inclinación Magnética I.

Los valores de la inclinación magnética y declinación magnética estan mostradas en la Figuras 41a y 41b.

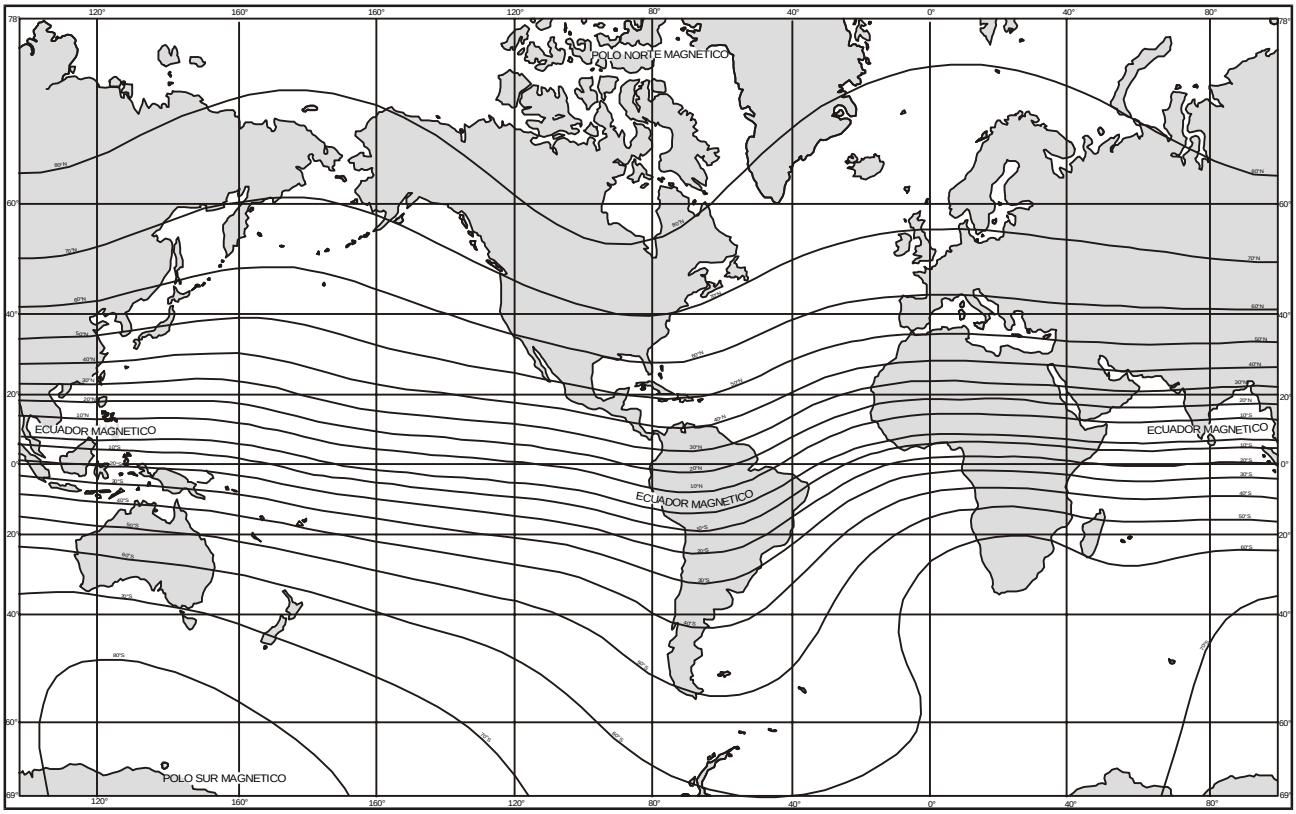


Fig. 41a Carta de inclinación magnética.

Las líneas de fuerza del campo magnético no coinciden con la dirección de los meridianos. El vector de la intensidad del campo magnético forma con el plano del meridiano verdadero determinado ángulo (d).

De esta forma una aguja magnética libremente suspendida se coloca formando determinado ángulo I con relación al plano horizontal y un ángulo (d) con relación al meridiano verdadero (Fig. 42 y 43).

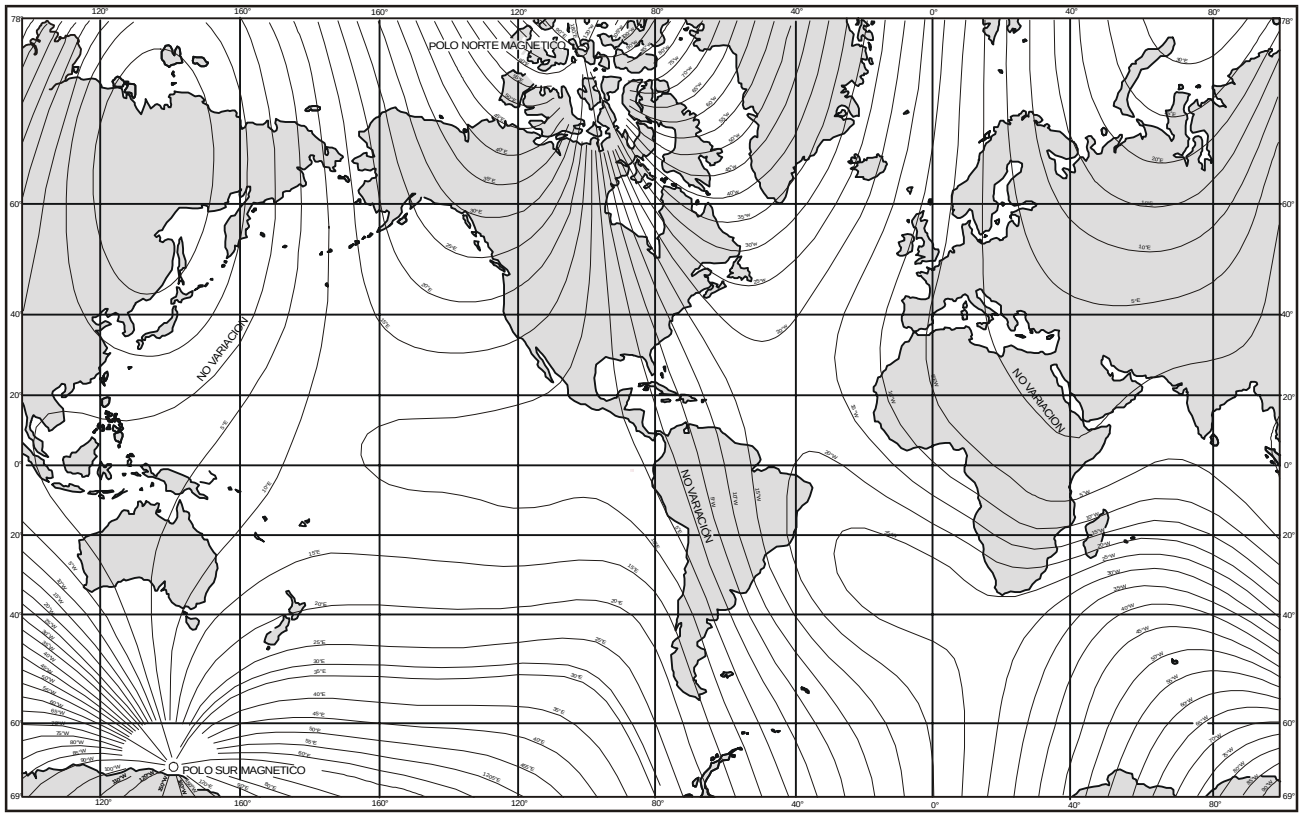


Fig. 41b Carta de declinación magnética

El plano vertical que pasa a través del vector de la intensidad del campo magnético T, se llama plano del **meridiano magnético** y su intersección con el horizonte verdadero forma la **línea del meridiano magnético o meridiano magnético N_m - S_m.**

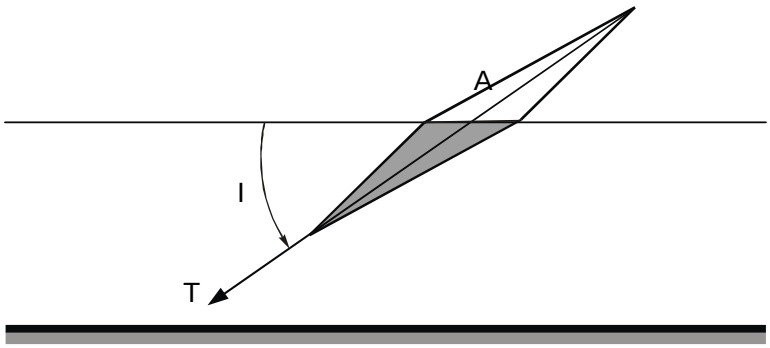


Fig. 42 Inclinación Magnética

De esta forma la aguja de un compás magnético colocado en la costa o en un buque magnético, se sitúa en la dirección del meridiano magnético formando el ángulo (d) con el meridiano verdadero. Las magnitudes H, T, Z, I y d se denominan **elementos de magnetismo terrestre.**

H - Componente horizontal de intensidad del campo magnético de la Tierra. Bajo la acción de esta fuerza la aguja del compás magnético se sitúa en el plano del meridiano magnético, de acuerdo a la fórmula:

$$H = T \cos I,$$

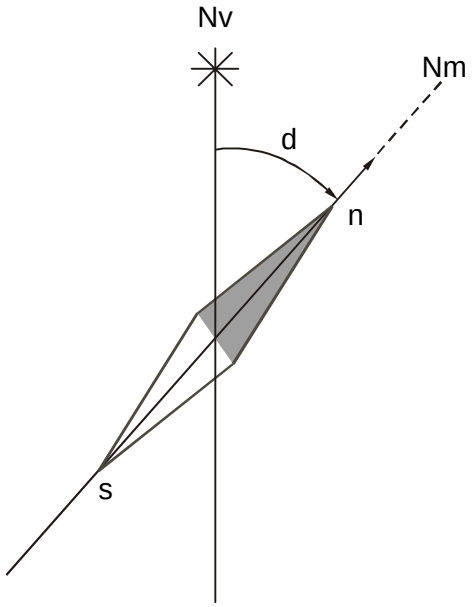


Fig. 43 Declinación magnetica

Se puede plantear que en las zonas de los polos magnéticos, I = 90°; H = 0°. En estas zonas no existe fuerza alguna que oriente a la aguja magnética, por lo que el compás magnético no funciona. En la superficie de la Tierra hay puntos donde I = 0°, H = T. La línea, en la superficie de la Tierra, en cada uno de cuyos puntos I = 0° se llama **ecuador magnético.**

Z - Componente vertical de intensidad del magnetismo terrestre. Esta fuerza inclina a la aguja magnética con relación al plano horizontal. En base a la fórmula Z =T sen I se puede decir que en los polos magnéticos, I = 90°, Z = T y en el ecuador magnético I = 0°, Z = 0°.

I - Inclinación magnética. El valor de la inclinación magnética en distintos puntos de la Tierra es diferente. En el ecuador magnético I = 0°.

Si en un punto dado de la Tierra el extremo norte de la aguja magnética se inclina hacia abajo respecto al plano horizontal , entonces I se considera positiva (+), si por el contrario si se inclina hacia arriba, se considera negativa (-).

d- Declinación magnética. La declinación magnética es diferente en distintos puntos de la Tierra. Para la navegación la declinación magnética tiene gran importancia (Fig. 41b).

El valor de los elementos del magnétismo terrestre en distintos puntos de la Tierra se da en cartas especiales para estos elementos.

En estas cartas aparecen las líneas que unen los puntos de iguales valores para los elementos del magnétismo terrestre.

Las líneas que unen los puntos con igual declinación magnética se llaman **isógonas**.

Las isógonas que unen los puntos de declinaciones magnéticas iguales a cero, se llaman **líneas agónicas**.

Las líneas que unen los puntos con igual inclinación se llaman **isoclinas.**

2.6 Declinación magnética

Como ya se ha señalado, en la navegación, la declinación es el elemento del magnétismo terrestre que más importancia tiene.

Si el meridiano magnético se encuentra al este del meridiano verdadero la declinación será E y se considera positivo (+) (Fig. 44).

Si por el contrario el meridiano magnético se encuentra hacia el oeste del meridiano verdadero, la declinación magnética (d) será W y se considera negativa (-)

El valor y el signo de la declinación magnética, en un punto dado de la superficie de la Tierra, se determina por las cartas de los elementos del magnétismo terrestre, y en aquellos puntos, donde están trazadas las isógonas, se se determina por las cartas de isógonas.

Si el punto donde se requiere determinar la declinación, se encuentra en la isogóna, la declinación del punto será igual a la declinación de la isógona. Si el punto se encuentra entre dos isógonas, la declinación se determina por la interpolación lineal.

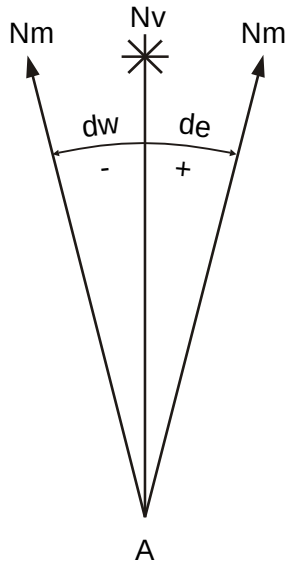


Fig. 44. Declinación Magnética.

En la figura 45 se muetran dos isógonas:

- Isógona a - a con d = 5,0°

- Isógona b - b con d = 10,0°

Para determinar la declinación del punto K es necesario medir, con ayuda de una regla, la distancia entre isógonas (3cm) y la distancia del punto K a la isógona más cercana (1cm). La determinación de la declinación se reduce a resolver la proporción.

5° - 3 cm

X° - 1 cm $\qquad X = \frac{5x1}{3} = 1,7°$

d_k = 5,0° + 1,7° = 6,7°E.

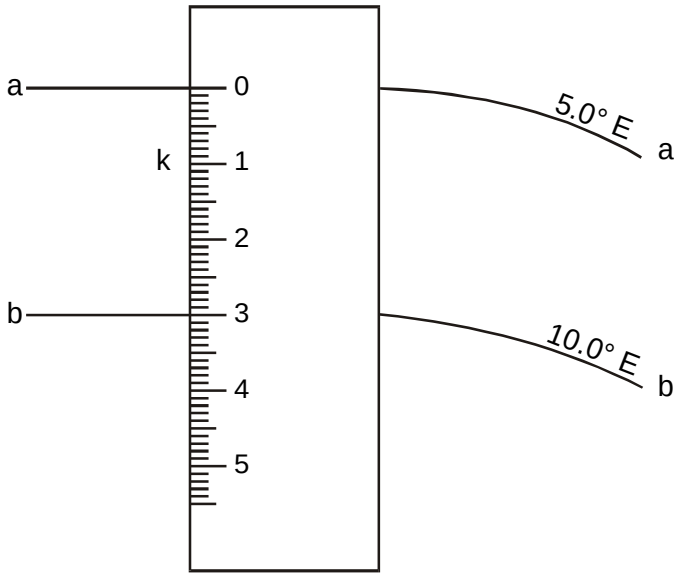


Fig. 45 Interpolación de la declinación magnética

De acuerdo a las observaciones se ha determinado que el campo magnético terrestre es variable, donde varían, además, los elementos del magnetismo terrestre y entre ellos la declinación magnética.

Las variaciones de la declinación magnética son diferentes por su carácter.

a) Variaciones periódicas.

A las variaciones periódicas de la declinación magnética se relacionan:

- Variaciones diarias - Por su magnitud son pequeñas y en la práctica no se tienen en cuenta.

- Variaciones anuales - Variación de la declinación durante el año. Por su pequeñez, de igual forma no se consideran.

- Variaciones seculares - Variación que sufre la declinación de año en año.

Las variaciones seculares de la declinación magnética se caracterizan, en el momento dado, por la variación en un año.

La variación de la declinación magnética en un año se llama **variación anual.**

De acuerdo al análisis de la variación secular de la declinación magnética, se ha determinado que en un año la declinación puede variar hasta 0,2°. La declinación en un punto dado puede aumentar o disminuir. Se entiende por aumento o disminución, el aumento o disminución del valor absoluto de la declinación, independiente de su signo.

En algunos casos se puede afirmar que el valor de la variación anual de la declinación magnética durante determinados años, es constante.

Para la utilización de las cartas de isógonas, en la determinación de la declinación magnética, es necesario conocer para que año fueron trazadas éstas. Si el año en que se navega no coincide con el año de trazado de las isógonas es necesario actualizar la declinación al año de navegación.

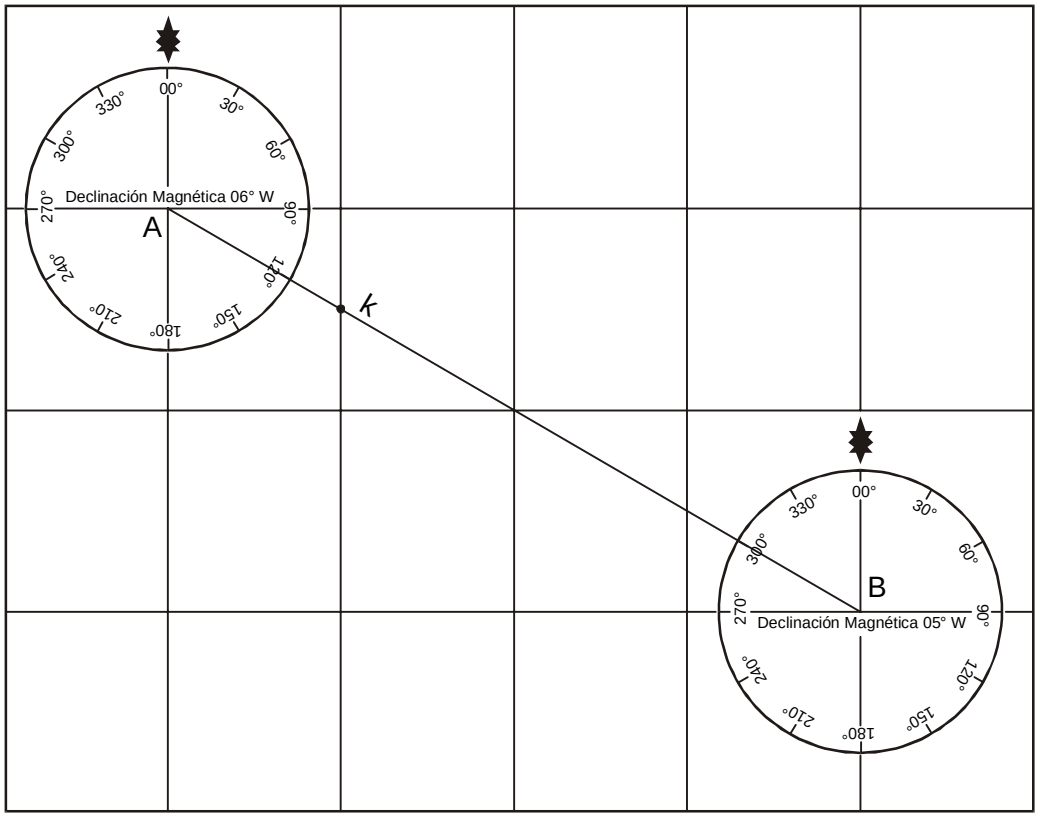


Fig. 46 Interpolación de la declinación magnética

En las cartas náuticas el valor de la declinación, con su respectiva denominación se escribe junto al título si ésta es constante para toda el área de la carta o en diferentes puntos de la carta si la declinación es diferente en cada punto. Cuando se tiene en la carta varios puntos con el valor de la declinación se puede realizar la interpolación para los puntos intermedios.

Conociendo el año de navegación y el año para el cual fue determinada la declinación se calcula el valor de la variación de la declinación por la diferencia de estos años. Esta diferencia se suma a la declinación dada si esta aumenta y se resta si esta disminuye.

Ejemplo, en el título de la carta aparece que la declinación fue determinada para el año 1985, la disminución anual es de 0,1°, el buque navega en el año 2000 y se encuentra en el punto K de la carta (Fig. 46) Determinar la declinación en este punto para el año 2000.

En la carta, en los puntos A y B, aparecen los valores de la declinación magnética. Interpolando determinamos la declinación en el punto K: d = 5,7°W. Esta declinación es para el año 1985, es necesario llevarla al año 2000, es decir el año de navegación.

La diferencia de años n = 2000 - 1985 = 15 años y la disminución anual es de 0,1°determinar la disminución de la declinación en 15 años;

$$\Delta d = 0{,}1°, \quad 15 = 1{,}5°$$

El valor determinado de la disminución se le resta al valor de la declinación en el año 1985, y obtenemos:

$$d_{00} = 5{,}7° - 1{,}5° = 4{,}2°; \quad d_{85} = 4{,}2°W.$$

En las cartas de nueva edición, así como en las cartas inglesas, españolas, etc se emplean otras formas de representación de la declinación magnética y su variación anual.

Ejemplo. Carta 11545 (De Cayo Avalo a los Cayos de San Felipe). Calcular la declinación en las coordenadas φ = 21°15,0'N λ= 82°45,0' para el año 2002.

Solución

1) Interpolación por coordenadas. (En este caso la efectuaremos por diferencia de longitud) (Fig. 47).

$$\lambda_1 = 83°15{,}0'W$$

$$\lambda_2 = 82°\ 22{,}6'W$$

$$\Delta\lambda = -\ 83°15' - (-82°22{,}6')$$

$$-\ 83°15' + 82°22{,}6$$

$$\Delta\lambda = -\ 42{,}4'$$

En 42,4' (sin considerar el signo) la declinación varió 2°20 - 1°50 = 30' en el punto K la declinación será aplicando la regla de tres.

$$42{,}4' \rightarrow +30'$$
$$15' \rightarrow x$$

$$X = \frac{15x30'}{42{,}4} = 11'$$

Por tanto la declinación para el punto K será 1°50' + 11 = 2°01'

$$d_{98} = -\ 2°01'$$

Generalmente este paso el navegante lo realiza mediante una simple interpolación visual.

2) Actualización de la declinación

$$d_{98} = 2°01'W = -\ 2°01'$$

Incremento anual 8'W

Incremento para el año 2002

$\Delta d = 8 \times 4' = 32'$

$d_{00} = d_{98} + \Delta d$

$= 2°01 + 32' = 2°33'W$

$d_{00} = 2{,}5°W$

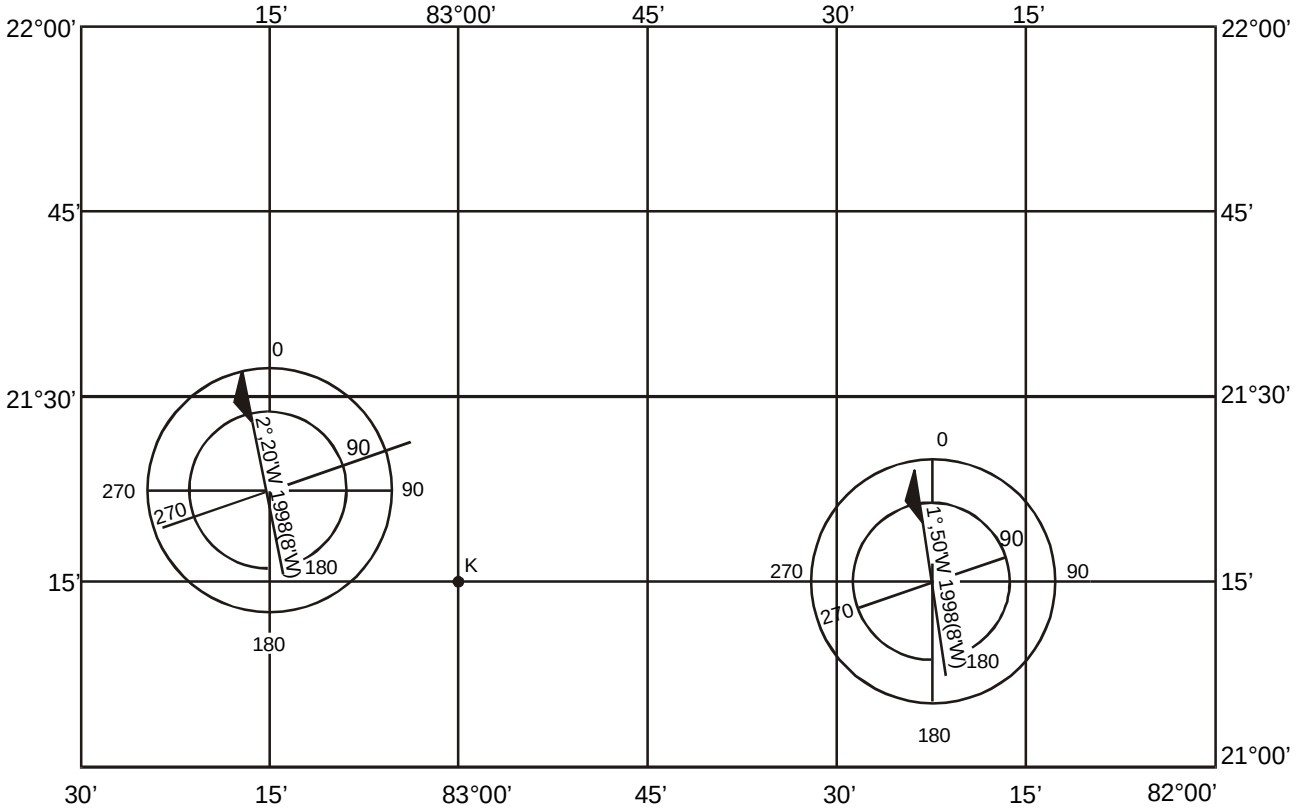


Fig. 47 Interpolación de la declinación magnética

b) Variaciones periódicas. Variaciones irregulares

Además de las variaciones regulares, la declinación está expuesta a las variaciones irregulares. A tales variaciones se relacionan las tormentas y anomalías magnéticas.

En distintas regiones del mar la inclinacion del compás magnético se diferencia bruscamente de la declinación magnética. En tales regiones la declinación no es constante y varía en determinados límites. Esta variación brusca de la declinación en determinadas regiones se llama **anomalía magnética**.
Se llama **tormenta magnética** a la variación sorpresiva, brusca y desorganizada de los elementos del magnetismo terrestre y entre ellos la declinación magnética.

Las tormentas magnética se observan con frecuencia en las zonas polares. Éstas surgen inesperadamente y pueden durar largo tiempo.

Durante las tormentas magnéticas la declinación varía rápidamente en límites considerables. La aguja del compás magnético realiza oscilaciones y no señala la dirección del meridiano magnético, es por ello

que utilizar el compás durante las tormentas magnéticas es imposible. El surgimiento y desaparición de las tormentas magnéticas está relacionado con la acción de la actividad solar.

2.7 Direcciones magnéticas

Las direcciones medidas con relación al meridiano magnético se llaman **direcciones magnéticas**. (Fig. 48).

El ángulo en el plano del horizonte verdadero, formado entre la mitad norte del meridiano magnético y el plano diametral del buque se llama **rumbo magnético** (Rm), y se mide a favor de las manecillas del reloj de 0° a 360°.

El ángulo entre la mitad norte del meridiano magnético y la direccción hacia un objeto se llama **marcación magnética** (Mm) y se mide en sentido horario de 0° a 360°.

Comparando las direcciones verdaderas (Fig. 49) con las direcciones magnéticas (Fig. 48) se puede determinar la relación que existe entre ellas, (Fig. 50).

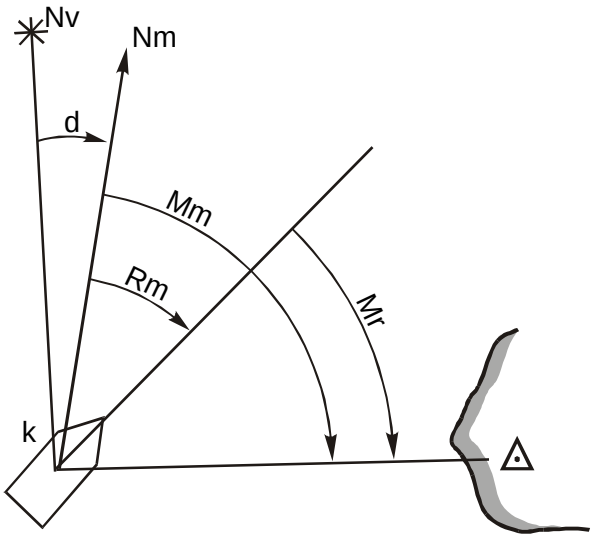


Fig. 48 Direcciones magnéticas

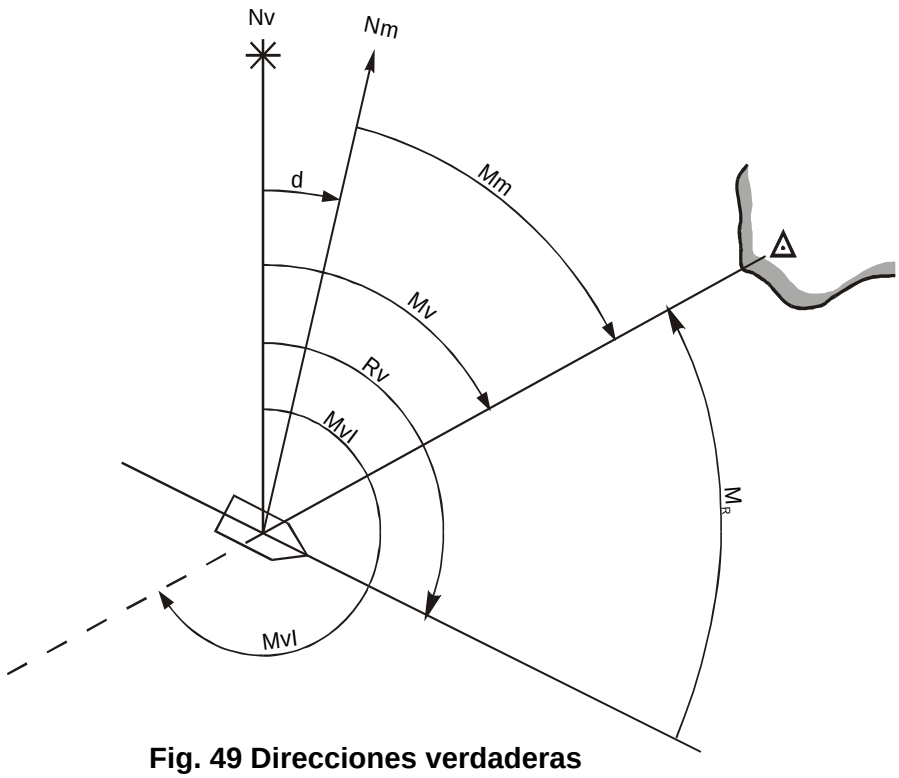


Fig. 49 Direcciones verdaderas

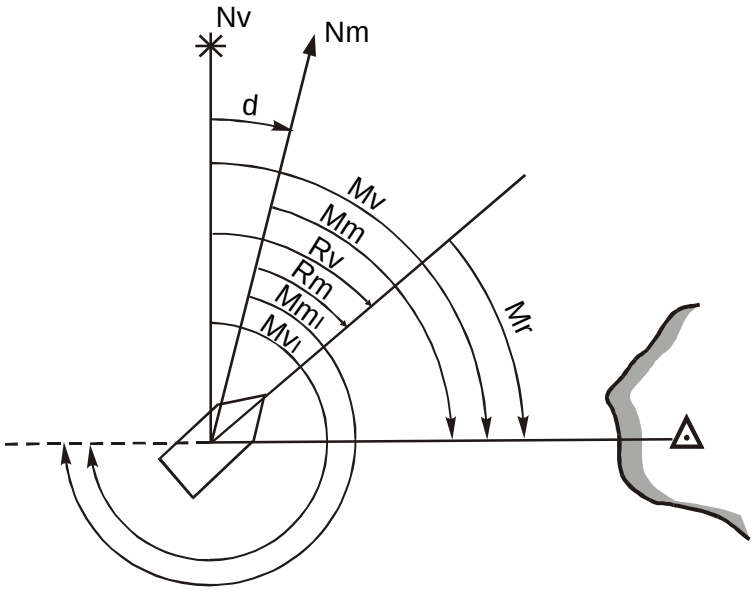


Fig.50 Conversión y corrección de direcciones verdaderas y magnéticas

$R_v = R_m + d$;		$R_m = R_v - d$;	
$M_v = M_m + d$;	(23)	$M_m = M_v - d$;	(24)
$M_{vI} = M_{mI} + d$;		$M_{mI} = M_{vI} - d$;	

donde MmI - Lectura de la marcación magnética inversa.

Por analogía con la ecuacóin (17) obtenemos que:

$$Mr = Mv - Rv = Mm - Rm$$

Las fórmulas (23) y (24) son fórmulas algebraicas y en ellas la declinación (d) se sustituye con su signo.

2.8 Desvío del compás magnético

Sobre la aguja del compás magnético instalado en Tierra, lejos de las masas magnéticas y las fuentes potentes de energía eléctrica o en un buque no magnetizado, actúa solamente el campo magnético trerrestre. Bajo la acción de este campo la aguja se orientará en la dirección del meridiano magnético.

El casco de los buques modernos se construye de acero de alta resistencia que posee propiedades magnéticas. Además, en los buques se instalan máquinas eléctricas, las cuales al funcionar forman potentes campos magnéticos.

El vector de la intensidad del campo magnético propio del buque en el lugar de instalación del compás no coincide en dirección con el vector de intensidad del campo magnético de la Tierra.

Los campos magnéticos de la Tierra y el buque se suman y forman el campo magnético resultante, bajo cuya influencia se encuentra la aguja del compás magnético y se orienta en una dirección que no coincide con la dirección del meridiano magnético.

El plano vertical que pasa por el eje magnético de la aguja del compás instalado en el buque, se llama **plano del meridiano aguja del compás**.

La intersección del plano meridiano aguja con el plano del horizonte verdadero forma la **línea del meridiano aguja** N_a - S_a.

El ángulo entre las mitades norte del meridiano magnético y el meridiano aguja se llama desvío del **compás magnético**.

El desvío se representa por la letra griega δ (delta).

Si el meridiano aguja se desvia hacia el este del meridiano magnético, el desvío será este y se considera positivo (+) y si se desvia hacia el oeste, será oeste y se considera negativa (-).

Cuando coinciden los meridianos magnético y aguja, el desvío será igual a cero. El desvío se mide a partir de la mitad norte del meridiano magnético hacia el este o el oeste de 0° a 180°. La magnitud y signo del desvío depende del módulo y dirección del vector de intensidad del campo magnético del buque T_b.

El giro del del buque a un nuevo rumbo origina la variación de la magnitud y dirección del vector de la intensidad del campo magnético, por lo que se puede asegurar que el desvío depende del rumbo del buque.

Cuando el buque se traslada de una región a otra, aún cuando navega a rumbo constante, varía tanto el vector intensidad del campo magnético de la Tierra T como el vector de la intensidad del campo mag-

nético del buque, pero estas variaciones no son proporcionales, por lo que varía el vector de la intensidad del campo magnético resultante, que actúa sobre la aguja del compás. Esto a su vez, origina la variación del desvío.

Por consiguiente el desvío depende tambien de la región en que se navegue.

Además de las causas señaladas, el desvío depende del estado magnético del casco del buque. La variación del campo magnético de éste puede ser originada por las sacudidas del buque durante los disparos de artillería, por el traslado de los cuerpos metálicos, por la variación del estado magnético del casco durante las reparaciones, etc. Al variar el estado magnético del casco del buque variará el desvío.

Cuando el campo magnético del buque es fuerte origina un desvío de gran magnitud y el compás comienza a trabajar de forma inestable. Si la influencia del campo magnético del buque sobre la aguja del compás magnético es mayor que la influencia del campo magnético de la Tierra, el compás deja prácticamente de trabajar y no se puede utilizar. En este caso es necesario disminuir la influencia del campo magnético del buque, es decir compensar el desvío, disminuirlo hasta su valor mínimo.

La compensación del compás se realiza con ayuda de los imanes de compensación. Con un sistema de estos imanes colocados cerca del compás, se crea un campo magnético de igual magnitud pero de sentido opuesto al del buque.

Cuando se realiza la compensación, la aguja del compás queda solamente bajo la influencia del campo magnético de la Tierra y debe orientarse en la dirección del meridiano magnético.

Sin embargo compensar totalmente el compás no se logra y queda después de la compensación el tal llamado **desvío residual.**

El desvío residual se determina por métodos especiales, sobre los que se hablará más adelante.

2.9 Direcciones de agujas

En los buques modernos la aguja del compás magnético se sitúa en el plano del meridiano aguja, las direcciones que se determinan por el compás magnético son **direcciones agujas.**

El ángulo, formado en el plano del horizonte verdadero entre la mitad norte del meridiano aguja y el plano diametral del buque se denomina **rumbo aguja magnético** (Ram). Este se mide de 0° a 360° en sentido horario a partir de la mitad norte del meridiano aguja (Fig. 51)

El ángulo formado entre la mitad norte del meridiano aguja y la dirección inversa al objeto se llama **marcación aguja magnética inversa** (MamI).

$$MamI = Mam + 180°$$

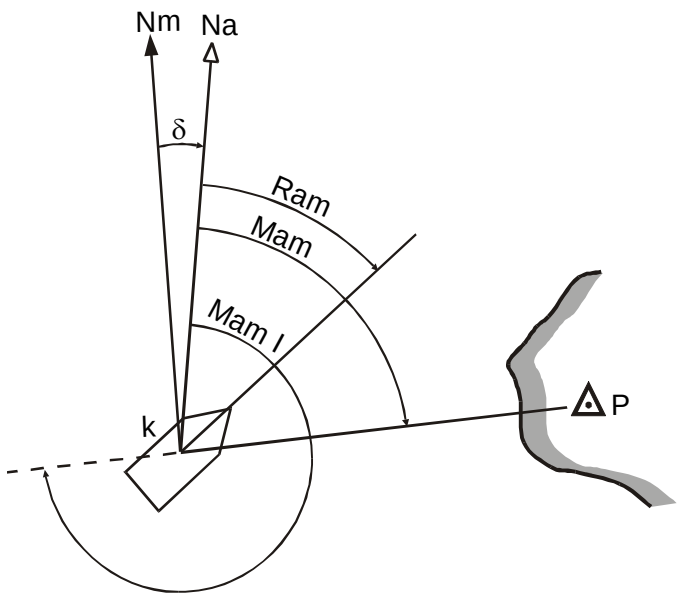


Fig.51 Direcciones agujas

Midiendo desde el buque las direcciones agujas y conociendo el desvío del compás magnético se puede determinar las direcciones magnéticas. La dependencia que existe entre estas direcciones se determina por la figura 52.

$$Rm = Ram + \delta \qquad (25) \qquad\qquad Ram = Rm - \delta \qquad (26)$$

$$Mm = Mam + \delta \qquad\qquad Mam = Mm - \delta$$

Las fórmulas (25) y (26) son fórmulas algebraicas. Para resolver problemas con su ayuda es necesario sustituir d con su signo. En la figura 48 se puede observar que:

$$Mr = Mm - Rm = Mam - Ram \qquad (27)$$

2.10 Corrección total del compás magnético. Conversión de direcciones agujas en verdaderas y viceversa

Con ayuda del compás magnético se determinan direcciones agujas pero en las cartas de náutica se determinan sólo direcciones verdaderas.

Para la conversión de direcciones verdaderas en direcciones agujas y viceversa se utiliza la corrección total del compás magnético (Fig 53). El ángulo formado en el plano del horizonte verdadero entre la mitad norte del meridiano verdadero y la mitad norte del meridiano aguja se llama **corrección tota**l del compás magnético (₵).

Si el meridiano aguja se encuentra al este del meridiano verdadero la corrección total (₵) será positiva (+) y si el meridiano aguja se encuentra al oeste del meridiano verdadero la corrección total será negativa ₵ (-).

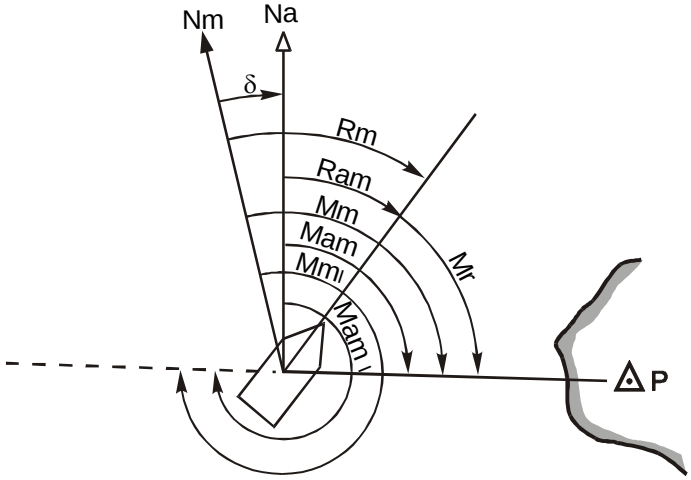


Fig. 52 Relación entre las direcciones magnéticas y agujas

La corrección total se mide desde la mitad norte del meridiano verdadero hacia el este o el oeste de 0° a 180° y es igual a la suma algebraica de la declinación (d) y el desvío (δ).

$$\text{₵} = d + \delta \qquad (28)$$

En la figura 53 se puede observar que:

$$Rv = Ram + d + \delta,$$

donde

$$d + \delta = \text{₵},$$

entonces

$$Rv = Ram + \text{₵} \qquad (29)$$

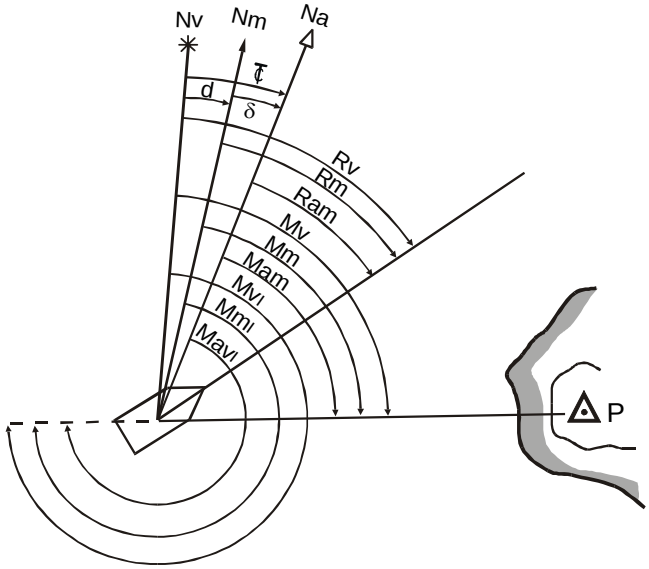


Fig. 53 Relación entre las direcciones verdaderas, magnéticas y agujas

Una expresión análoga se puede obtener para la conversión de las marcaciones agujas a verdaderas.

$$Mv = Mm + d; \qquad Mm = Mam + \delta;$$

por consiguiente:

$$Mv = Mam + d + \delta$$

$$Mv = Mam + ₵ \qquad (30)$$

Las fórmulas (29) y (30) son fórmulas algebraicas, en ellas es necesario sustituir los valores, d y δ con sus signos.

Fórmulas para la conversión de direcciones agujas y magnéticas en direcciones verdaderas y viceversa.

$Rv = Rm + d$	$Rm = Ram + \delta$	$Rv = Ram + ₵$
$Mv = Mm + d$	$Mm = Mam + \delta$	$Mv = Mam + ₵$
$Rm = Rv - d$	$Ram = Rm - \delta$	$Ram = Rv - ₵$
$Mm = Mv - d$	$Mam = Mm - \delta$	$Mam = Mv - ₵$
$d = Rv - Rm$	$\delta = Rm - Ram$	$₵ = Rv - Ram$

2.11. Determinación del desvío y corrección total del compás magnético.

Para realizar la conversión de las direcciones agujas en verdaderas y viceversa es necesario conocer el valor de la declinación, el desvío y la correccíon total del campo magnético

El valor de la declinación se tomade las cartas. El desvío y la corrección total del compás se determina por observaciones especiales.

El aspecto relacionado con la determinación del desvío y los métodos empleados, lo abordaremos en el capítulo subsiguiente. Una vez determinado el desvío y conocida y actualizada la declinación se puede obtener la corrección total ($₵ = d + \delta$), no obstante en ocaciones cuando se está alejado de la costa (mar abierto) es necesario determinar la corrección total por observaciones a los astros fundamentamente al Sol y la estrella Polar, aspectos estudiados en el epigrafe IX-1.1 (Cap.IX) cuaderno de Astronomía Náutica.

Como se expuso anteriormente, el desvío del compás depende del rumbo. Por eso no nos podemos limitar a determinar el desvío para un solo rumbo. El desvío se determina para 8 rumbos agujas equidistantes (0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° y 315°) por los métodos explicados en el capítulo III y basándose en estos datos se elabora la tablilla de desvios (tabla 2.1), que será utilizada por el navegante en la solución de los problemas de conversión y corrección de direcciones.

El desvío del compás se selecciona en la tabla de acuerdo al (Ram) conocido, por ejemplo Ram =120°; δ = - 4,0°.

Si el rumbo aguja no coincide con el valor de la tabla, se debe realizar una interpolación lineal simple. En el caso cuando el rumbo aguja no se conoce y es necesario determinar el desvío, entonces su valor se halla utilizando el rumbo magnético.

Ejemplo 1: El buque debe hacer Rv = 065,0°. Se exige determinar el rumbo aguja magnético, correspondiente al rumbo verdadero dado, la declinación en la región de navegación es d = 5,0°E.

Tabla 2.1

Ram	δ	Ram	δ
0°	+2,3°	180°	+1,7°
10	+1,7	190	+0,7
20	+1,3	200	+0,3
30	+1,0	210	+1,3
40	+0,5	220	+2,0
50	+0,0	230	+2,7
60	-0,7	240	+3,5
70	-1,5	250	+4,0
80	-2,0	260	+4,3
90	-2,7	270	+4,5
100	-3,3	280	+4,5
110	-3,7	290	+4,9
120	-4,0	300	+4,0
130	-4,3	310	+3,7
140	-4,0	320	+3,5
150	-3,7	330	+3,0
160	-3,3	340	+2,7
170	-2,5	350	+2,5

Para la solución del ejercicio es necesario:

- Calcular el rumbo magnético:

$$Rm = 65{,}0° - (+5{,}0°) = 60{,}0°$$

Tomar el desvio de la tabla para el rumbo magnético calculado:

$$\delta = +0{,}7°$$

- Calcular el rumbo aguja magnético:

$$Ram = Rm - \delta = 60{,}0° - (-0{,}7°) = 60{,}7°$$

En la prática, con frecuencia, se utiliza la expresión de dependencia entre el desvio y el rumbo aguja. Con ayuda de los datos de la tabla 2.1 se traza la curva del desvio (Fig. 54). La utilización de este gráfico es muy cómodo ya que se elimina la necesidad de la interpolación.

Ejemplo 2: Determinar el valor del Ram utilizando la curva del desvio.

Solución: Ploteamos el punto1 el valor de Ram en la línea horizontal. Desde el punto ploteado se traza una vertical hacia la curva y en su intersección se marca el punto 2. Desde este punto se traza una perpendicular y se determina en su intersección el punto 3 en el cual se lee el valor del desvio δ = -0,7°. Para que sea más fácil la utilización del gráfico, esto debe efectuarse en un papel milimitrado.

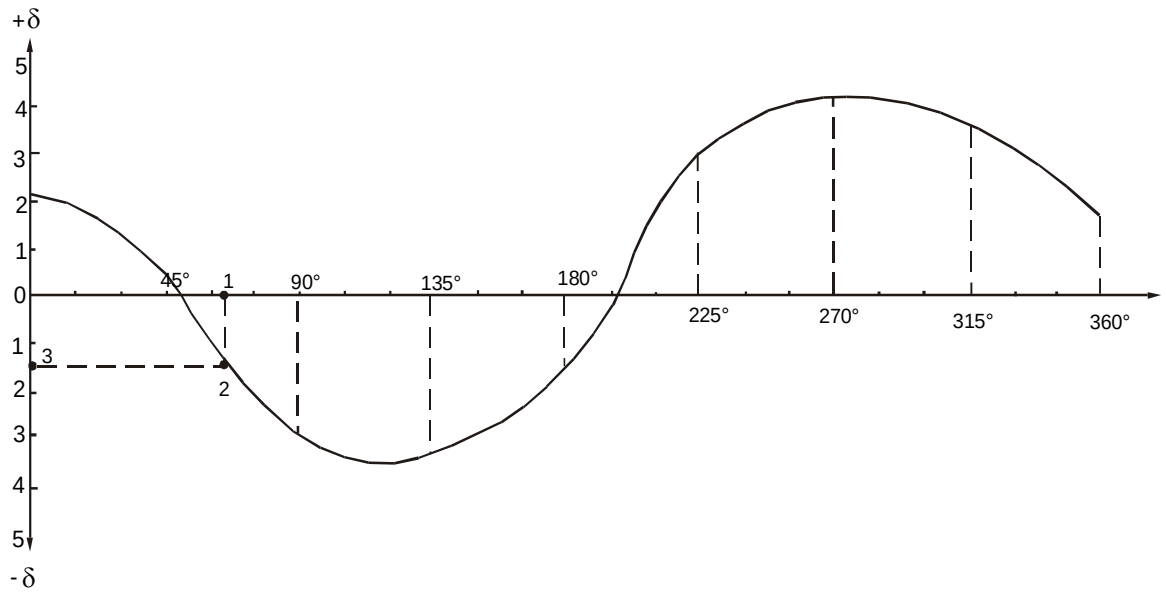


Fig. 54 Gráfica del desvio

La solución del ejemplo anterior es válida cuando los desvíos residuales son pequeños como aparece en la tablilla de desvío (Tabla 2.1). En caso contrario si los desvíos tienen valores apreciables como los mostrados en la tabla 2.2, (debido a que no se ha podido efectuar la compensación inmediata del compás magnético), pero que los valores de dichos desvíos no exceden de los 20° se procederá del siguiente modo (método de la doble interpolación):

a) Calcule el rumbo magnético por la fórmula Rm= Rv - d

b) Entre en la tablilla con Rm como argumento y determine el desvio (δ_1)

c) Calcule el rumbo aguja magnético (Ram_1) aplicando la fórmula Ram_1= Rm - δ_1

d) Entre en la tablilla con Rm_1 y determine nuevamente el desvio (δ_2)

e) Calcule el rumbo aguja magnético (Ram_2) por la fórmula Ram_2= Rm -δ_2. Este será el rumbo aguja buscado magnético.

Ejemplo 3: Un buque navega a Rv = 086° se da la orden de navegar por el compás magnético por estar el girocompás F/S. Determinar el rumbo aguja magnético correspondiente al rumbo verdadero dado.

La declinación en la zona de navegación es d = 3,0° E.

Solución:

a) Cálculo del Rm

Rm = Rv - d = 86°- (+3,0°)
Rm = 083°

b) Entramos en la tablilla con Rm (tabla 2.2) con Rm = 083° y determinamos el desvio (δ_1).

Interpolando

$$80° \rightarrow +14{,}5° \quad \rightarrow 10° \rightarrow 3° \rightarrow x = 9/10 = 0{,}9$$
$$83° \rightarrow x \qquad 3° \rightarrow x$$
$$90° \rightarrow +11{,}5°$$

δ_1=+13,6°

c) Calculamos Ram_1

Ram_1= Rm - δ_1

=83,0°- (+13,6°)

Ram_1= 69,4°

d) Entramos en la tablilla de desvio nuevamente pero con Ram_1= 69,4°

Interpolando

$$60° \rightarrow +18{,}9° \quad \rightarrow 10° \rightarrow 1{,}8° \rightarrow x = 9{,}4/1{,}8 = 1{,}7$$
$$69{,}4° \rightarrow x \qquad 9{,}4° \rightarrow x$$
$$70° \rightarrow +17{,}1°$$

δ_2=+17,2°

e) Calculamos Ram_2

Ram_2= Rm - δ_2

=83,0°- (+17,2°)

Ram_2= 066,8°

Para comprobar el resultado, entremos en la curva de desvio (Fig. 55) con Ram_2= 066,8° y obtenemos.

δ_2=+17,2° que es el resultado obtenido en d).

Ejemplo 4: En la carta la declinación es d=3,0°W para el año 1955, anualmente aumenta 0,02°.

Determinar la declinación en en el año 1975.

Solución: a) Determinamos la diferencia de años:

n=1975 -1965 = 10 años.

b) Calculamos la variación de la declinación en 10años.

d=0,02 x10 0,2°

$d_{75} = d_{65} + \Delta d$

$d_{75} = 3{,}0° + 0{,}2° = 3{,}2°W.$

Es importante recordar, que el aumento o disminución de la declinación significa un aumento o disminución del ángulo entre el meridiano magnético y el meridiano verdadero, independiente a su denominación este u oeste.

Ejemplo 5: La declinación magnética en la carta d = 4,5° E para el año 1990. la disminución anual es de 0,3°. Determinar la declinación para el año 2003.

Solución: n = 2003 - 1990 =13 años:

$\Delta\delta = 0{,}3 \times 20 = 0{,}39° \approx 0{,}4°$

$d_{03} = d_{90} - \Delta d$; $d_{90} = 4{,}5° - 0{,}4° = 4{,}1°$ E.

Ejemplo 6: La declinación magnética en la carta d = 0,3° E para el año 1981. La disminución anual es de 0,4°. Determinar la declinación para el año 2001.

Solución: n =2001 - 1981 = 20 años:

$\Delta d = 0{,}4° \times 20 = 0{,}8°$;

$d_{01} = d_{81} - \Delta d$; $d_{01} = 0{,}3° - 0{,}8° = 0{,}5°W.$

Observación: En este ejemplo la declinación al disminuir llegó a cero y luego pasó hacia el oeste.

Ejemplo 7: La declinación magnética para el año 1995 en la carta es d = 0,0°. El aumento anual hacia el este es de 0,05° y la disminución oeste es de 0,05°. Determinar la declinación en el año 2002:

n = 2002 -1995 = 7 años;

$\Delta d = 0{,}05° \times 7{,}35° \approx 0{,}4°$

$d_{02} = d_{95} - \Delta d$; $d_{95} = 0° - 0{,}4° = 0{,}4°W.$

Es necesario tener en cuenta que cuando la declinación es 0,0° en la carta aparecen la variación este y oeste en el año.

Tabla 2.2

Ram	δ	Ram	δ
0°	+10,0°	180°	-5,5°
10	+14,1	190	-5,9
20	+16,1	200	-6,3
30	+19,0	210	-6,8
40	+20,0	220	-7,6
50	+19,9	230	-8,7
60	+18,9	240	-9,9
70	+17,1	250	-10,9
80	+14,5	260	-11,9
90	+11,9	270	-12,5
100	+ 8,3	280	-12,5
110	+ 5,3	290	-11,9
120	+ 2,3	300	-10,5
130	- 0,1	310	-12,5
140	- 2,6	320	-5,8
150	- 3,4	330	-1,6
160	- 4,6	340	+2,2
170	- 5,1	350	+2,2

Para resolver ejercicios basta tener la variación en una dirección. En el ejemplo anterior tomamos la disminución anual hacia el este. Si tomáramos el aumento hacia el oeste obtendríamos el mismo resultado.

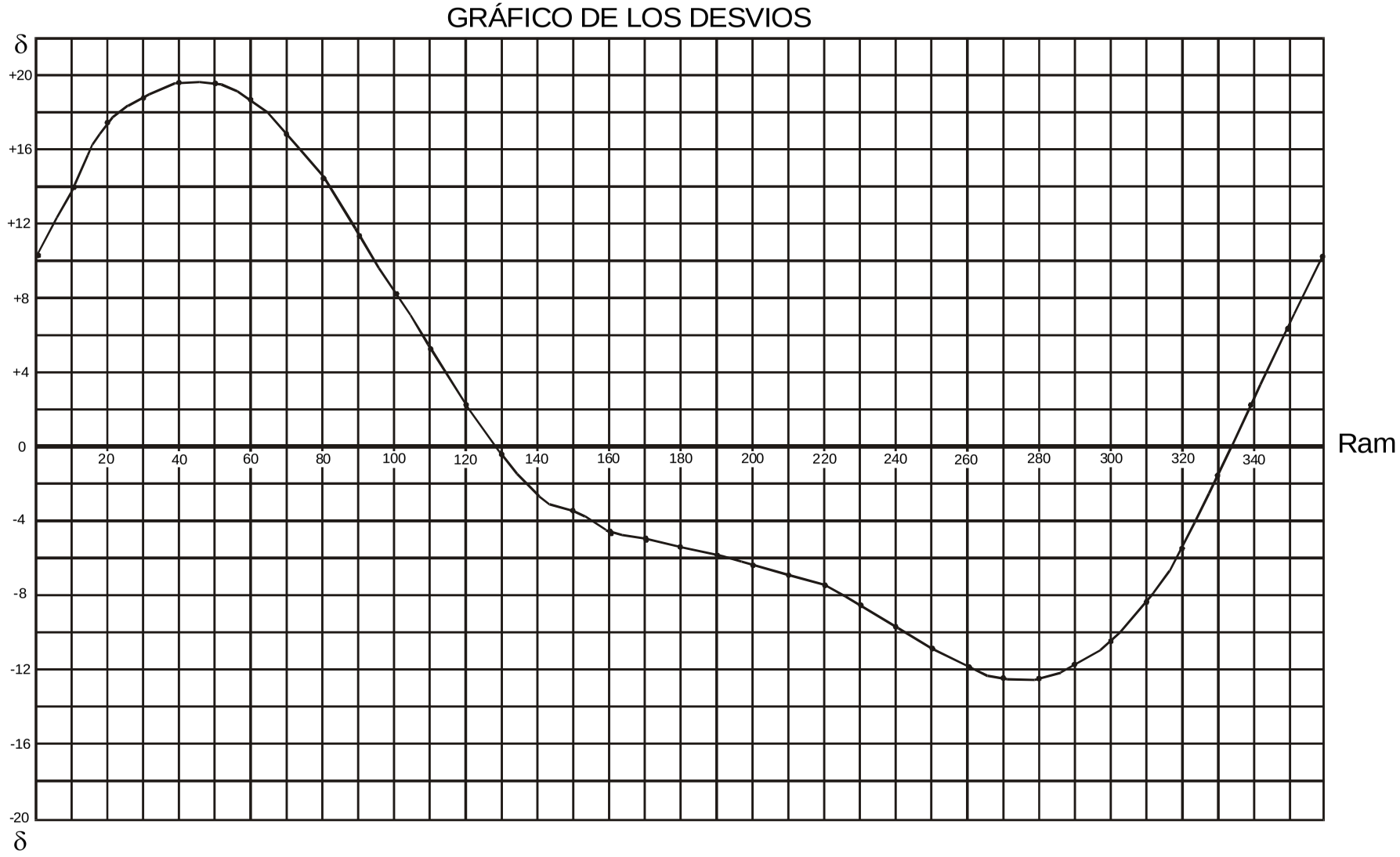


GRÁFICO DE LOS DESVIOS
δ
+20
+16
+12
+8
+4
0
-4
-8
-12
-16
-20
δ
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
320
340
Ram

Fig. 55.

Ejemplo 8: Rv = 230,0°; Mr = 40° Br, d = 5,0° W

Determinar Rm y Mm

Solución: Rm = Rv - d; Rm = 230,0°- (-50°) = 235,0°

Mm = Rm + Mr; Mm = 235,0°+ (-40,0°) = 195,0°

Ejemplo 9: d = 5,0° E; δ = -2,0°

Determinar ₵

Solución: ₵ = d + δ; ₵ = 4,0°+ (–2,0) = +2,0°

Ejemplo 10: d = 6,0° W; ₵ = -3,0°

Determinar δ

Solución: δ = ₵ – d; δ = -3,0°- (-6,0°) = + 3,0°

Ejemplo 11: Rm = 140,0°, ₵ = -3,0°; d = 5,0°E; Mr = 40° Er

Determinar Ram, Mam, Rv, Mv

Solución: δ = ₵ – d; δ = -3,0°- (+5,0°) = - 8,0°

Ram = Rm - δ; Ram = 140,0°+ (-8,0°) = 148,0°

Mam = Ram - Mr; Mam = 148,0°+ 40,0° =188,0°

Rv = Ram - ₵; Rv = 148,0° - 3,0° = 145,0°

Mv = Mv + Mr; Mv = 145,0°+ 40,0° =185,0°

Ejercicios propuestos

1) Rv = 335,0°; C = 70° Br; d = 4,5° W

Determinar Rm y Mm

Respuesta: Rm = 339,5°, Mm = 269,5°

2) Ram = 185,0°; d = 4,0° E (Utilice la tablilla 2.1).

Determinar Rv y δ

Respuesta: Rv = 190,2°, δ = +1,2

3) Rv = 120,0°; Mv =225°; d = 7,6° E

Determinar Mr, Rm, δ y ₵

Respuesta: Mr = 105° Er, Rm = 112,0°, δ = +2,3°, ₵ = +9,9°

4) d = 5,8° W; Rv = 303,0°

Determinar Rm, δ y ₵.

Respuesta: Rm = 308,0°, δ = +3,7°, ₵ = -2,1°E

5) Rv =115,0°

a) Cacular las Mv de los puntos notables cuando se encuentren por babor y estribor.

b) Cacular las MvI correspondientes.

c) Determinar Ram, δ y ₵.Si d=3,5°E (Utilice la tablilla de desvio 2.1).

Respuesta: Mv_1 =205°, Mv_1= 025°, MvI_1 =205°, MvI_1 =025°, Rm = 105,2°, δ = +6,3°, ₵ = +9,8°E

6) Mam = 263°, Ram = 117,5°, d = 7,2°W.

a) Determinar Mm, Mv, MvI, Mr, δ y ₵. (Utilice la tablilla 2.1).

b) Calcular el Rv en el momento del través por babor.

c) Representar gráficamente el resultado.

Respuesta: Mm =259,1°, Mv =251,8°, MvI = 071,8°, Mr = 105° Er, δ = +6,3°, ₵ = –11,2°, Rv = 341,9°

7) Un buque navega por el girocompás, el Rv=312,0°, transcurridas 24 horas de navegación el GC se pone F/S. El capitán ordena al 3er oficial realizar los cáculos para gobernar por el compás magnético. La declinación magnética de la zona es de 8,2°E.

Determinar que rumbo debe indicar el compás magnético para mantener Rv =312,0°.

Respuesta: Ram = 313,1°

CAPITULO III

COMPENSACIÓN DEL COMPÁS MAGNÉTICO

Capítulo III

COMPENSACIÓN DEL COMPÁS MAGNÉTICO.

3. Compás magnético. Definición

El compás magnético está destinado para indicar ininterrumpidamente el rumbo aguja magnético del buque, para determinar las marcaciones a los puntos de referencia de la costa y los astros así como para tomar marcaciones relativas. En esencia consiste en una o varias agujas imantadas (sistema magnético) colocadas paralelamente, e intaladas de forma que puedan girar libremente en el plano horizontal, orientándose en virtud de la acción del campo magnético terrestre. (Fig. 35)

A bordo actuan sobre ella otros campos magnéticos, siendo su orientación la resultante de éstos y del campo magnetico terrestre. El efecto ocacionado por la inclinación de las líneas de fuerzas magnéticas se elimina colocando el centro de suspensión más alto que el de gravedad.

3.1. Construcción del sistema magnético. Las agujas se colocan dentro de unos estuches, en la parte inferior de un ligero disco de mica, plástico o sustancia análoga, llamado rosa. Normalmente se fraccionan en varias agujas mas delgadas de diferentes longitudes y cuyos polos estan distribuidos en una circunferencia (para eliminar el desvío de orden superior) con centro en el centro de la rosa, con lo que se aumenta su momento magnética. La rosa esta dividida en 360°.

El conjunto de la rosa e imanes tiene en su centro un disco o dado metálico, el chapitel (joya), por donde se apoya en un eje vertical terminado en una punta muy afilada (estilo), pudiendo de esta forma girar horizontalmente (Fig. 56).

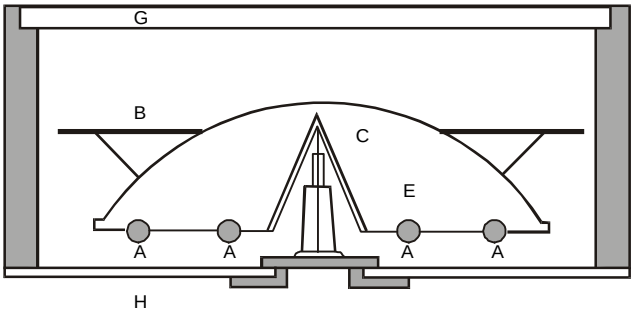


Fig. 56. Rosa de compás magnético.

La rosa, chapitel y estilo están alojados en el mortero, que consiste en un recipiente metálico de forma circular con una tapa de cristal que la cierra herméticamente. El mortero está instalado dentro de la **bitácora**, uniéndose a ella por medio de una suspensión cardán y antivibratoria.

En el interior del mortero y en los extremos de un diámetro están grabados de trazo verticales, los cuales deben coincidir con el plano diametral del buque (PDB) determinando la **línea de fe.**

El líquido, para reducir el peso efectivo y por tanto la fricción sobre el estilo, disminuyendo las oscilaciones de la rosa del compás. El líquido usado en los compases modernos es un aceite especial denominado varsol, se usa porque su viscosidad permanece razonablemente constante a baja temperatura. En los compases antiguos se emplean una mezcla de alcohol y agua destilada.

La combinación del flotador y el líquido reduce el peso real de la rosa del compás entre un 97% y un 98%.

La necesidad de eliminar casi toda la fricción es evidente ya que al aproximarse el compás magnético a los polos magnético, la fuerza directriz disminuye, haciendo más débil el momento que tiende a orientar el sistema magnético con la fuerza antes mencionada.

La bitácora se fija a la cubierta en el plano diametral del buque en un lugar donde existen pocas vibraciones. En la parte superior lleva el cubichete para proteger el mortero, con un sistema de iluminación, para el alumbrado de la rosa.

En la parte de la proa la bitácora lleva un estuche metálico para el alojamiento de la barra Flinders. Lateralmente, a la altura del mortero, tiene dos soprtes para las esferas cuadrantales. En su parte frontal suele llevar un clinómetro para medir las escoras y en su interior hay unos alojamientos para los imanes compensadores. Tanto estos como el imán de escora, que está en la vertical del centro de la rosa, se tiene acceso por una puerta o registro de la bitácora.

3.2 Momento magnético. Momento giratorio

Tomemos una aguja magnética de longitud 2l, la cual puede girar alrededor de un eje vertical. Esta aguja imantada reacciona ante la influencia de la componente horizontal del campo magnético terrestre (H) de acuerdo a su momento magnético, que es igual al producto de la masa magnética de la aguja por su longitud 2ml. Por lo que sobre los polos de la aguja actuarán las fuerzas + mH y - mH (Fig. 58). Ambas fuerzas actuan en el plano del meridiano magnético siendo iguales en valor absoluto, pero de sentidos opuestos. De esta forma, sobre la aguja que se encuentra en el campo magnético homogéneo de la Tierra, siempre estarán aplicadas los fuerzas + mH y - mH.

Supongamos que la aguja se desvia un ángulo (α) respecto al plano del meridiano (línea Nm - Sm) (Fig. 58), ante esta situación el par de fuerzas (+mH y - mH) creará el momento giratorio P. Su magnitud se expresa por el producto de una de las fuerzas por el brazo del par.

$$P = mHAB \qquad (30)$$

donde:

$$AB = 2l \text{ sen } \alpha \qquad (31)$$

Sustituyendo en la fórmula anterior obtenemos:

$$P = 2ml\ H \text{ sen } \alpha \qquad (32)$$

ó

$$P = MH \text{ sen } \alpha \qquad (33)$$

(M = 2ml - momento magnético de la aguja).

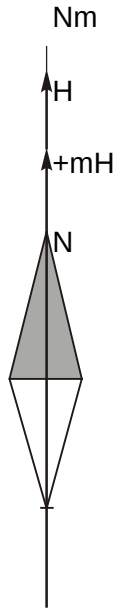


Fig. 57 Aguja magnética

Bajo la acción del momento giratotio P la aguja se orienta en el plano del meridiano magnético. Pero segun la aguja se aproxima a la línea Nm Sm el momento giratorio que causa el giro se va debilitando y desapareciendo completamente cuando la aguja ns se alinea con Nm Sm, por lo tanto cualquier fricción en el estilo causariá que la aguja quedara inmovíl (estancamiento) en algun punto próximo a la dirección Nm Sm.

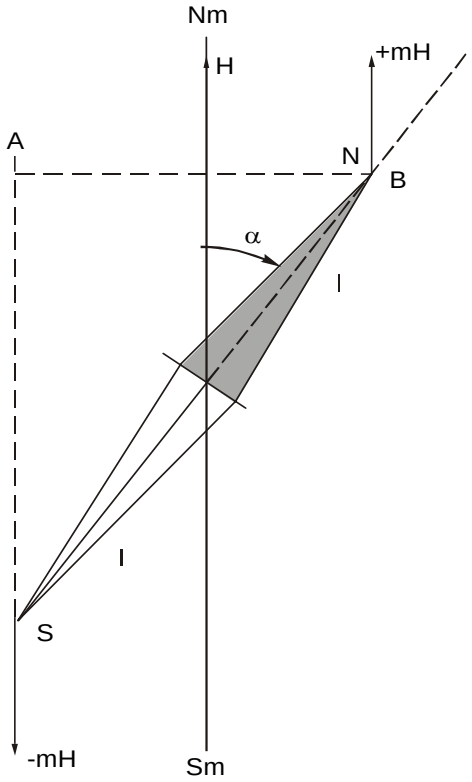


Fig. 58 Aguja magnética desviada en el ángulo α

La aceleración angular del movimiento giratorio viene dado por la fórmula.

$$W = \frac{mlH \operatorname{sen} \alpha}{I} \qquad (34)$$, siendo I el momento de inercia de la aguja.

El período de oscilación es igual a:

$$T = \pi \sqrt{\frac{1}{mlH}} \qquad (35)$$

3.3 Sensibilidad y estabilidad. Son las características fundamentales de una buena aguja.

La sensibilidad supone que la aguja acusará los cambios de rumbos aun cuando sean pequeños. Al girar el buque arrastra a la aguja que se separa del meridiano y que tiende a volver a él por su momento director MLH sen (α). Debido a la resistencia (fricción del estilo y chapitel (joya) líquido etc) se mantendrá en reposo con una separación del meridiano (α). En ese momento la resistencia al giro es igual al momento giratorio P= MH senα. Este ángulo α debe ser lo suficientemente pequeño para que no afecte a la exactitud del rumbo que se lleva. Generalmente se expresa por la fórmula:

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{R}{MH} \qquad (36)$$

donde: R - momento de fricción.

La estabilidad supone que el rumbo que indica la aguja no se verá afectado - o muy poco - por efectos externos. La falta de estabilidad puede ser de origen mecánico o magnético.

El cumplimiento de las dos condiciones anteriormente expuestos se puede resumir en los puntos siguientes:

a) Las agujas deben tener gran momento magnético (sistema de aguja magnética y generalmente 4 ó 6).

b) Centro de gravedad y suspensión próximos

c) Peso reducido (materieles ligeros, flotador)

d) Mínima resistencia al giro (estilo duro, afilado e inoxidable; chapitel duro y ligero)

e) Período de oscilación grande y diferenciado del balance del buque.

f) Momento de inercia grande (peso en la periferia de la rosa) e igual en todos los sentidos.

La falta o deficiencia de algunos de ellos son causa de poca sensibilidad o estabilidad. Siendo motivados por otras causas como:

- Compensación del desvío de escora defectuosa o imán de escora muy cerca de la aguja.

- Componente horizontal del magnetismo terrestre débil. Esto puede ser debido a que se navegue en altas latitudes o a que la bitácora este instalada en un lugar rodeado de masas metálicas ferromagnéticas.

- Instalación eléctrica defectuosa en sus proximidades.

- Imantación anormal del buque (carga magnética, rayo, etc.)

3.4 Comprobación del compás magnético

1. Sensibilidad. Se anota el rumbo que indica el compás. Se desvía la aguja hacia la derecha con un imán pequeño, retirándolo rápidamente, dejándola oscilar hasta que se detenga. El rumbo indicado no debe diferir en más de 0,2° del anterior. Esta operación se repite desviando la aguja hacia la izquierda. Es conveniente efectuarla con determinada frecuencia y más aun cuando el buque navega en altas latitudes, donde la componente horizontal del campo mganético terrestre es débil. La relación entre la componente del lugar (H) y un punto determinado (H_1) viene dado por la expresión

$\frac{H}{H_1} = \frac{T_1^2}{T^2}$ en la que T y T_1 son, respectivamente, los períodos de oscilación en cada uno de estos lugares.

Por medio de la fórmula anterior se puede comprobar aproximadamente si la aguja tendrá sensibilidad suficiente al aumentar la latitud del buque.

Para ello se lleva el compás a tierra a un lugar, desprovisto de sustancias magnéticas. Se mide el período de oscilación T y con este valor y los de H y H_1 dados por una carta isodinámicas horizontales se calcula T_1. Debajo de la aguja y coincidiendo los centros, se coloca horizontalmente un imán con su polo norte en dirección del norte magnético y se acerca o aleja hasta lograr que el período de oscilación sea T_1.

De esta forma se ha logrado crear un campo magnético de intensidad H_1.

Ejemplo: Comprobar si la aguja de un buque, cuyo período en un lugar donde H = 0,21O_E es T = 15 seg tendrá sensibilidad suficiente en otro de H_1 = 0,15O_E.

Solución: $\frac{0,21}{0,15}=\frac{T_1^2}{15^2}$

$$T_1^2 = 225\,\frac{0,21}{0,15}$$

$$T_1=\sqrt{225\,\frac{0,21}{0,15}}=17,7\text{seg}$$

$$T_1=17,7\text{seg.}$$

3.5 Determinación del período de oscilación

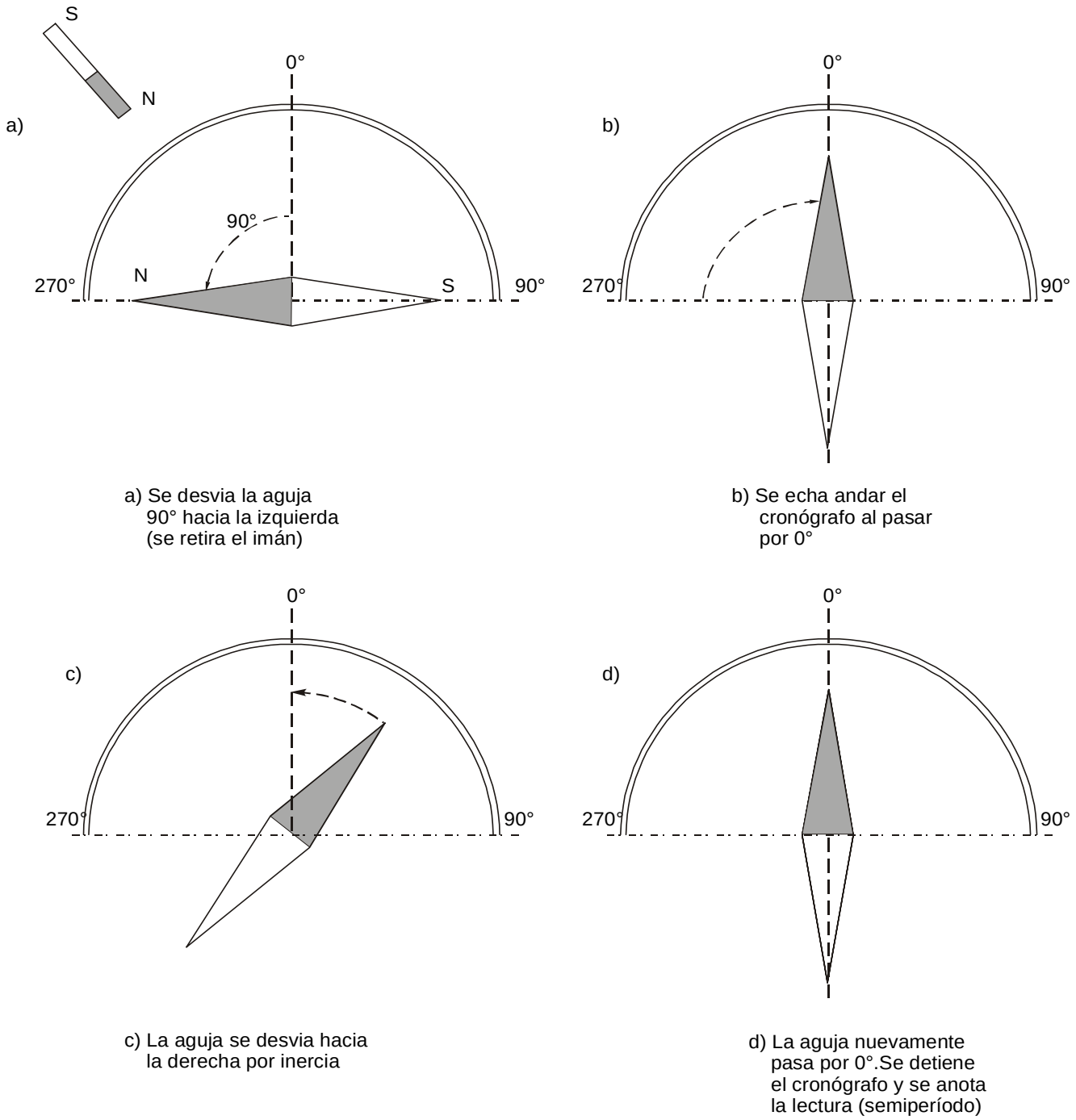
-Se procede a colocar el imán en las codiciones señaladas anteriormente y se tantea hasta que el periodo sea 17,7s. A continuación se hace la prueba de sensibilidad.

En vista de que las oscilaciones de la rosa del compás en el líquido rápidamente se amortigua, en la práctica se determina el semiperíodo de las oscilaciones. El mortero del compás se coloca en la horquilla de un trípodo instalado lejos de materiales magnéticos. Girando la horquilla se lleva la lectura 0° a la línea de fe de la rosa. Al mortero se le acerca un imán, y se desvía la rosa en 90° hacia la izquierda o derecha (Fig, 59). Se retira rápidamente el imán y en el momento en que la división 0° pasa por la línea de fé, se pone en marcha un cronógrafo (cuentasegundos), deteniéndose cuando por segunda vez la lectura. 0° pasa por la línea de fé, al moverse en sentido opuesto.

Estas operaciones se repiten al desviar la aguja en sentido opuesto (hacia la derecha).

En correspondencia con las condiciones tecnícas específicas de cada compás magnético el período de las oscilaciones de la rosa tienen un valor determinado.

Por Ejemplo el período de oscilaciones del compás magnético UKP - M debe ser 11,5 ±1,5 seg para H = 0,15 O_E.



a) Se desvia la aguja 90° hacia la izquierda (se retira el imán)

b) Se echa andar el cronógrafo al pasar por 0°

c) La aguja se desvia hacia la derecha por inercia

d) La aguja nuevamente pasa por 0°.Se detiene el cronógrafo y se anota la lectura (semiperíodo)

Fig.59 Determinación del período de oscilación

El valor permisible del semiperíodo de oscilaciones en el lugar de observación se calcula por la fórmula.

$$\frac{T}{2} = \frac{4{,}5 \pm 0{,}6}{\sqrt{H}}$$

donde: H - valor de la componente horizontal del campo magnético tomado de la carta.

Supongamos por ejemplo, que en el punto de observación H = 0,28 O_E, el semiperíodo de oscilación permisible será:

$$\frac{T}{2} = \frac{4,5 \pm 0,6}{\sqrt{0,28}} = 8,5 \pm 1,1 \text{seg}$$

Si el semiperíodo de oscilación se encuentra fuera de los límites permisibles (7,4 - 9,6 seg), el mortero debe ser reparado.

En el compás KMO - T el semiperíodo de oscilación de la rosa debe ser 25 ± 1,5 seg, para H = 0,15 O_E y temperatura + 20°. El valor de este período se calcula por la fórmula:

$$T = \frac{9,7 \pm 0,6}{\sqrt{H}}$$

El valor de T calculado se compara con el semiperíodo multiplicado por dos, obtenido de las observaciones.

3.6 Momento de inercia. En el caso que este dato no lo suministre la fábrica, es necesario determinarlo de la siguiente forma:

- Se lleva el compás a tierra, lejos de materiales magnéticos. Se mide el período de oscilaciones de la aguja T.

- Se destapa el mortero y con unas pinzas se coloca en la periferia de la rosa, simétricamente repartidas, unas monedas de pequeño peso o otro objeto análogo. Hecho esto se vuelve a medir el período T_1.

- Se calcula el momento de inercia por la fórmula:

$$I = \frac{T^2}{T_1^2 - T^2} I_1 \qquad (37)$$

siendo I_1 el momento de inercia añadido (suma de los productos - masa por el radio al cuadrado).

Ejemplo: Se mide el período de oscilaciones de una aguja, T = 16 seg. y después de colocar sobre ella 8 piezas de 0,5 gr a 7,5 cm del centro de la rosa, se vuelve a medir el período T_1 = 21 seg.

Calcular el momento de inercia.

$$I_1 = \Sigma\, mr^2 = 8 \times 0,5 \times 7,5^2 = 225$$

$$T^2 = 16^2 = 256$$

$$T_1^2 = 21^2 = 441$$

$$T_1^2 - T^2 = 185$$

$$I = \frac{256}{185} x 256 = 354,25 \text{ UCGS.}$$

3.7 Momento magnético

Fórmulas para calcular el momento magnético de la aguja:

$$ml = \frac{\pi^2 I}{T^2 H} \qquad (38)$$

$$ml = \frac{\pi^2 I_1}{\left(T_1^2 - T^2\right) H} \qquad (39)$$

La primera se utiliza cuando el valor de I es conocido y la segunda cuando se requiere obtener directamente el momento magnético.

Ejemplo: En un lugar desprovisto de sustancias magnéticas, donde $H = 0{,}227 O_E$ se mide el período de oscilación de una aguja $T = 11{,}5$ seg. Se colocan 4 piezas de 1 gr a 7,5 mm del centro de la rosa y se vuelve a medir el período $T_1 = 12{,}3$ seg. Calcular el momento magnético.

Solución: $I_1 = 4 \times 1 \times 7{,}5^2 = 4 \times 56{,}25 = 225$

$T = 11{,}5$ seg $\quad T^2 = 132{,}25$

$T_1 = 12{,}3$ seg $\quad T_1^2 = 151{,}29$

$T_1^2 - T^2 = 19{,}04$

$$I = \frac{T^2}{T_1^2 - T^2} I_1 = \frac{132{,}25}{19{,}04} 225 = 1562{,}83$$

$I = 1562{,}8$ UCGS

Cálculo de ml

1) Empleando la fórmula (38)

$$ml = \frac{\pi I}{T^2 H} = \frac{9{,}87 x 1562{,}83}{132{,}25 x 0{,}224} =$$

$ml = 520{,}68$

2) Directamente

$$ml = \frac{\pi I}{\left(T_1^2 - T^2\right)} = \frac{9{,}87 x 225}{19{,}04 x 0{,}224} = \frac{2220{,}66}{4{,}26}$$

$ml = 520{,}68$

3.8 Revisiones, observación y cuidado

Se llevarán a cabo por el navegante .

1) Eliminar las burbujas. Comprobar el estado de las juntas.

2) No se debe dejar el compás a la interperie excepto en los casos imprescindibles. Colocar el cubuchete, especialmente cuando se navegue por zonas muy calurosas.
3) No dar golpes a la bitacóra.

4) Desmontar el mortero o la rosa cuando se vayan a efectuar trabajos que supongan vibraciones o golpes en las proximidades de la bitacóra. Hacer lo mismo cuando el buque vaya a estar atracado varios meses

3) No dar golpes a la bitacóra.

4) Desmontar el mortero o la rosa cuando se vayan a efectuar trabajos que supongan vibraciones o golpes en las proximidades de la bitacóra. Hacer lo mismo cuando el buque vaya a estar atracado varios meses

5) Revisar la suspensión cardán y su engrase. Comprobar la horizontalidad del mortero con un nivel.

6) Los estilos de respeto se conservarán con vaselina neutra que se quita con un lienzo fino al instalarla. Tener cuidado de que no queden hilachas y lo mismo se observará al limpiar la rosa o el mortero.

7) Comprobar que las lecturas en los trazos de la línea de fé difieren exactamente en 180°

8) Llevar el libro en el que consten las características de fabricación, las halladas a bordo, fecha de las revisiones y en general todos los trabajos relacionados con compás.

3.9 Campo magnético del buque

Durante la construcción o reparación capital de un buque , éste adquirirá magnetismo permanente al golpeteo y vibraciones mientras el buque premanezca estacionario en el campo magnético de la Tierra. Después de ser botado al agua, el buque perderá algo de su magnétismo original como resultado de la vibración y golpes variando el campo magnético y eventualmente llegará a ser más o menos estable las condiciones magneticas. El magnetismo que retiene es el magnetimo permanente del buque.

El hecho de que el buque tenga magnetismo permanente no significa que este no pueda adquirir magnetismo inducido cuando es colocado en el campo magnético terrestre. El magnetismo inducido en una pieza dada de hierro dulce está en función de la intensidad del campo, de su orientación en el campo magnético, así como de las propiedades físicas y dimensiones del mismo. Este magnetismo inducido debe ser sumado o restado del magnetismo permanente ya que está presente en el buque, dependiendo del aproamiento del mismo respecto al campo magnético terrestre. Los hierro mas dulces, son los que más rápidos perderán el magnetismo cuanto estos sean retirados de este campo.

El magnetismo de varias estructuras de un buque que tiende a variar como resultado del desplazamiento, vibraciones o envejecimiento, pero que no lo altera inmediatamente debido precisamente al magnetismo inducido, es denominado **magnetismo subpermanente.**

Este magnetismo en cualquier instante, es parte del magnetismo permanente del buque, y consecuentemente debe ser corregido con imanes permanentes.

Esta es la principal cusa de la variación del desvío en un compás magnético.

La subsiguiente referencia respecto al magnetismo permanente se referirá al magnetismo permanente aparente, el cual incluye en su composición el magnetismo permanente y el subpermanente.

Por tanto un buque tiene una combinación de magnetismo permanente, subpermanente e inducido o variable.

Por consiguiente la condición del magnetismo permanente aparente del buque está sujeto al cambio de la despermeabilización, choques excesivos, soldaduras y vibraciones.

El magnetismo inducido del buque varía en dependencia del campo magnético terrestre y el aproamiento del buque en este campo.

3.10 Compensación magnética

Una barra de hierro dulce, colocada y orientada paralela al campo magnético terrestre H, tendrá un polo norte inducido en el extremo dirigido hacia el Polo Norte geográfico y un polo sur inducido hacia el Polo Sur geográfico (Fig. 60a)

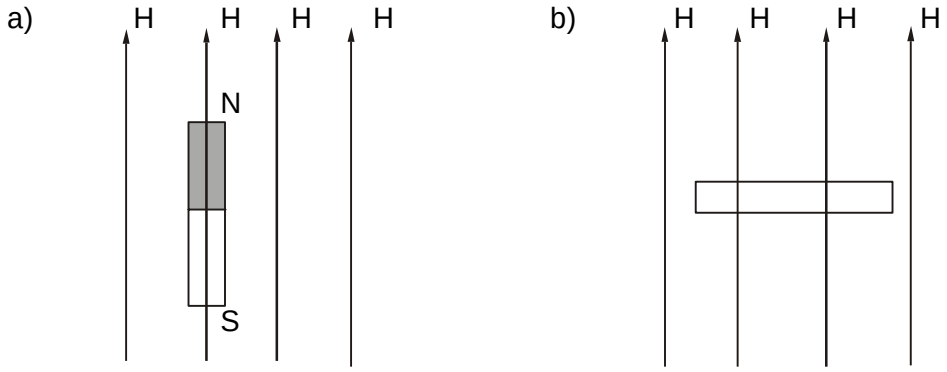


Fig. 60 Posición de la barra de hierro dulce en un campo magnético uniforme horizontal

Si esta misma barra la colocamos en una dirección perpendicular a este campo (Fig. 60b) no tendrá magnetismo inducido debido a que su orientación en el campo es tal que no habrá tendencia hacia la magnetización longitudinal siendo despreciable la immantación transversal (esta imantación tes aproximadamente 56 veces menor que la longitudinal).

Si la barra es alineada en alguna dirección horizontal entre las dos direcciones las cuales crean un máximo o un mínimo, en esta se inducirá cierta cantidad de magnetismo que dependerá del ángulo de orientación.

Si una barra similar es situada en posición vertical en latitudes norte de forma que esté alineada con la componente vertical del magnetismo terrestre Z, la barra tendrá el polo sur inducido en el extremo superior y el polo norte inducido en el extremo inferior.
Estas propiedades del magnetismo inducido será inversas en el hemisferio sur.

La cantidad de inducción horizontal o vertical en tales barras o en buques cuya construcción sea equivalente a la combinación de éstas, variará con la intensidad del campo magnético terrestre H y Z, el aproamiento y la escora del buque.

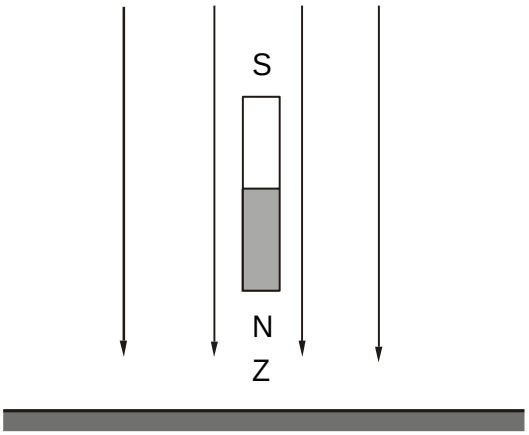


Fig. 61 Posición de la barra de hierro dulce en un campo magnético uniforme vertical

En resumen el compás magnético es afectado por la influencia de tres campos:
- Campo magnético terrestre.

- Campo magnético permanente (debido a los hierros duros del buque)

- Campo mganético inducido (debido a los hierros dulces del buque)

Estos campos hacen desviar la aguja del compas del meridiano magnético, por esta razón **en el compás magnético deben ser compensado los campos magnéticos permanente e inducido del buque de forma que su operación se aproxime a la de un buque completamente desmagnetizado.**

Las condiciones magnética del buque (se determina el valor del coeficiente del blindage - λ) crea en el compás, desvios y sectores de inactividad (estancamiento de la rosa del compás) e inestabilidad.

3.11 Correctores utilizados para la compensación del compás magnético

Partiendo del principio general de la compensación, se puede plantear que si el desvío es producido por los hierros duros (desvios debido al magnetismo permanente - desvio semicircular y de escora), entonces éste se compensa con hierros duros y si el desvio es creado por los hierros dulces, este se compensa con los hierros dulces (magnetismo inducido - desvio cuadrantal).

Para la compensación del compás se utilizan los siguientes elementos correctores:

Imanes: Corrigen parte del desvio semicircular. Existen diferentes tipos de imanes, los cuales se clasifican por su longitud y su sección transversal, lo cual depende del fabricante del equipo.

Los de respeto se tendrán guardados en sus estuches o cajas a distancia de la bitacóra, de forma que estén juntos los del mismo tamaño y con los polos alternativamente cambiados.

Las de distintos tamaño, no deben estar en contacto. Durante un largo período de tiempo pierden parte de su imantación por lo que deberán ser renovados.

En la bitacóra se colocan perfectamente centrados en unos alojamientos especiales que tiene ésta en el plano transversal y longitudinal. Cuando se utilizan más de un imán, todos deben ser colocados con los polos de igual color hacia el mismo lado.

Existen bitácoras que tienen unos alojamientos enumerados para los mismos, y en otra son móviles a fin de acercarlos o alejarlos de la aguja sin necesidad de maniobrar con ellos. En las del primer tipo la numeración está hecha de tal forma que de acuerdo con ella se pueda calcular previamente el desvio que compensará un imán, o pareja, colocado en su alojamiento. En la práctica es más comodo proceder por tanteo; sin que por ello sufra la compensación. Después de ésta se anotará siempre la posición en que se han quedado los imanes registrándolo en el "Libro del Oficial Compensador" (Historial de la Aguja).

Esferas (barras): Corrigen el desvío cuadrantal. Son de hierro dulce, y con diametros que varian entre los 114 y 305 mm, fijándose en unos soportes que llevan empernados las bitácoras en la línea E_R - B_R. Excepcionalmente estarán instalados en la línea P_R - P_P o formando un ángulo con estas líneas.

Se debe tener cuidado con el magnetismo residual que puedan adquirir ya que no existen hierros dulces puros.

Los soportes llevan unas ranuras que permiten variar su distancia a la rosa del compás, debiendo ser exactamente igual para las dos esferas. Esta se determina generalmente por tanteo. Las esferas deben ser colocadas lo mas alejada posible de la aguja con el objetivo de reducir lo más posible el desvío de inducción debido a la imantación de los correctores de hierra dulce por la aguja, para ello se deben seleccionar las dimensiones apropiadas de estos correctores y situarlos a la distancia apropiada del centro del compás.

Existen buques donde se encuentran instalados compases donde los correctores de hierro dulce tienen forma de barras con sección transversal circular o rectangular. En este caso es aconsejable calcular el valor del coeficiente por los valores de los desvios en los rumbos NE, SE, SW y NW o tomando las marcaciones a estos mismos rumbos. Esto es válido también para las esferas.

Barra Flinders: Corrige parte del desvío semicircular. Consiste en una barra de hierro dulce de 7,5 cm de diámetro, y 62 cm de longitud, seccionada en cinco pedazos de 2, 4, 8, 16 y 32 cm, teniendo otros tantos de madera, de iguales dimensiones, para suplementar a las anteriores dentro del estuche cilíndrico de metal donde se alojan a fin de que el extremo superior de la barra Flinders quede siempre a la altura del centro de la rosa del compás.

Este estuche va empernado a la bitácora en su parte de proa.
Al igual que con las esferas se tendrá cuidado con el magnetismo residual que puedan adquirir.

Magnetismo residual. Aun cuando las esferas y la barra Flinders son de hierro dulce, pueden llegar a adquirir un cierto magnetismo permanente por inducción de los imanes de la aguja y los de compensación.

Para comprobar su existencia se ponen las esferas en sus soportes los más cercano de las agujas del compás como sea posible. Se anota el Ram y primero con una esfera y posteriomenet con la otra, se gira de 90°en 90°, no debiéndose producir desviacíon ninguna en el rumbo que señalaba la rosa. (En el caso de las barras se colocan a 180° de su posición original). La mayor desviación permitida es de ± 0,7° y si fuera superior, es necesario eliminar el magnetismo permanente, lo que se logra calentando las esferas al rojo vivo y dejándolas enfriar lentamente.

3.12 Métodos para la determinación del desvío

a) Antes de determinar el desvío es necesario comprobar las normas planteadas en los puntos.

b) El buque deberá estar aproado al rumbo donde se determina el desvío como minímo durante 3 minutos, para que éste adquiera el magnetismo inducido correspondiente a este rumbo.

c) De ser posible se obtendrán los desvios cayendo sobre una banda y estando a cada rumbo el tiempo mínimo indicado en el punto anterior.

d) Se debe confeccionar el esquema de maniobra a realizar, indicando el orden de los aproamientos, para evitar perdida de tiempo.

e) Si se determina el desvío por comparación con el girocompás, debe hacerse los giros lo más lentamente posible al cambiar de un aproamiento a otro, a fin de reducir los errores iniciales provocados por la maniobra (cambio de rumbo o velocidad).

Esencia de la determinación del desvío

La escencia de la determinación del desvío consiste en comparar una dirección magnética con una aguja magnética.

El desvio puede ser determinado utilizando las siguientes formulas:

δ = Mm - Mam
δ = MmI - MamI
δ = Rm Ram

Mm - marcación magnética

MmI - marcación magnética inversa

Mam - Marcación aguja magnética

MamI - Marcación aguja magnética inversa

Rm - rumbo magnético

Ram - rumbo aguja magnético

δ - desvío

Métodos para determinar el desvío

Los principales métodos para determinar el desvío son los siguientes:

a) Por marcaciones a una enfilación

b) Por abanico de enfilaciones

c) Por comparación con el girocompás

Existen otros métodos como el de marcaciones (azimutes) a los astros, y que no abordaremos ya que este método ha sido objeto de estudio en el Cuaderno de Ejercicio de Astronomia Náutica.

En los métodos mensionados el desvio se determina en los cuatros rumbos cardinales y cuatro rumbos colaterales (8 rumbos - N, NE, E, SE, S, SW, W y NW).

Aunque como medida de control, el desvio puede determinarse en cualquier aproamiento para comparar su valor una vez confeccionada la tablilla de los desvios residuales

a) Por enfilaciones

Supongamos que en los límites de visibilidad se encuentra una enfilación y su dirección verdadera (*Mv*) está indicada en la carta, se desea determinar el desvio para cualquier rumbo aguja.

Antes del comienzo de la observación se debe tomar de la carta el valor de la Mv de la enfilación y la declinación magnética actualizada (d) para una región dada, con estos datos se calcula la marcación magnética de la enfilación por la fórmula

$$Mm = Mv - d$$

Se recomienda de ante mano confeccionar el esquema de maniobra (orden de realizar los rumbos) con el objetivo de ahorrar tiempo y motorrecursos así como garantizar la seguridad del buque durante las maniobras del mismo ya que en ocasiones estos trabajos se realizan en espacios reducidos (limitados por bajos y otros peligros a la navegación). Una de las posibles variantes de maniobra durante la determinación del desvío por una enfilación está mostrado en la fig. 62.
Al llegar a la zona escogida, aproamos el buque al Ram seleccionado y en el momento de cortar la línea de marcación tomamos la Mam de la enfilación, determinándose posteriormente el desvío por la fórmula:

$$\delta = Mm - Mam$$

Si se desea determinar el desvío para otro rumbo, es necesario aproar el buque por el compás magnético a este rumbo y de nuevo tomar la marcación en el momento de cortar la enfilación, después se calcula el desvío como se explicó anteriormente.

En el esquema de maniobra (Fig. 62) se puede observar que el buque está aproado en los cuatro rumbos principales (N, E, S y W) y cuatro rumbos colaterales (NE, SE, SW, y NW). Para expresar esto abreviadamente se dice que el buque está aproado en los ocho rumbos (N, NE, E, ... NW).

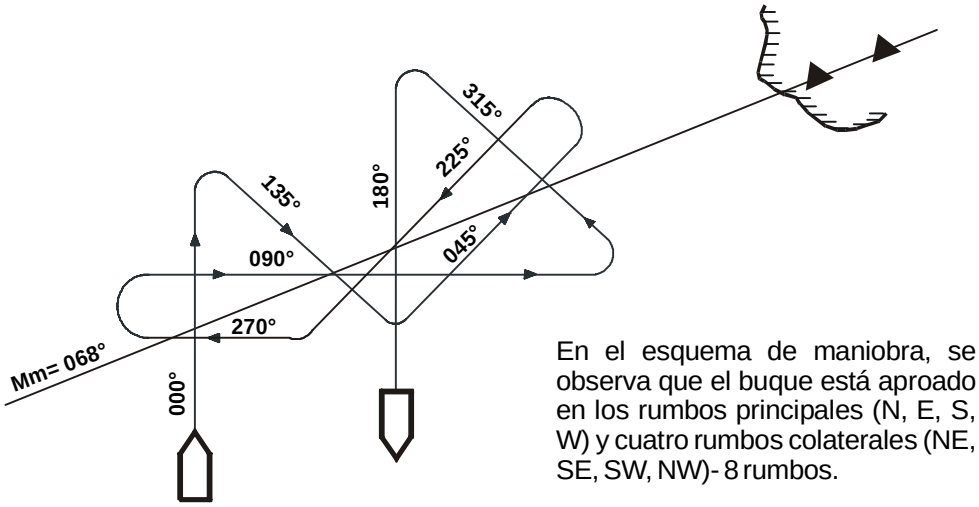


Fig. 62 Esquema de maniobra para la determinación del desvio a una enfilación

Las anotaciones de las marcaciones observadas y el cálculo de los desvíos se realizan según la Tabla 3.1.

Tabla 3.1

Rm	Mm	Mam	δ
000°	67,5°	68,9°	-1,4°
045°	67,5°	67,1°	+0,4°
: : :	: : :	: : :	: : :
345°	67,5°	67,9°	-0,4°

b) Por abanico de enfilaciones

En algunos puertos para facilitar los trabajos relacionados con la compensación del compás magnético, para elevar su exactitud y reducir el tiempo de su realización, están instalados los sistemas de señales de enfilaciones artificiales o naturales llamadas abanico de enfilaciones.
La determinación del desvío por abanico de enfilaciones se realiza en el siguiente orden: se aproa el buque por el compás magnético al rumbo deseado a poca velocidad, se toma la **Mam (MamI)** al cortar la línea de enfilación, anotando este valor y la **Mv**, posteriormente sin variar el rumbo se repite el trabajo durante el corte de las siguientes (2-4 líneas de enfilación) tomando en cada caso la Mam y la Mv correspondiente, se determina la **Mm** aplicando la declinación actualizada a la Mv y se calcula el desvío de cada observación por la fórmula:

$$\delta = Mm - Mam \quad ó \quad \delta = MmI - MamI$$

Para determinar el valor más probable se toma la media aritmética de tres a cinco desvíos observados en el rumbo dado. La consecutividad racional de los rumbos durante el trabajo con abanico de enfilaciones está mostrado en la fig. 63.

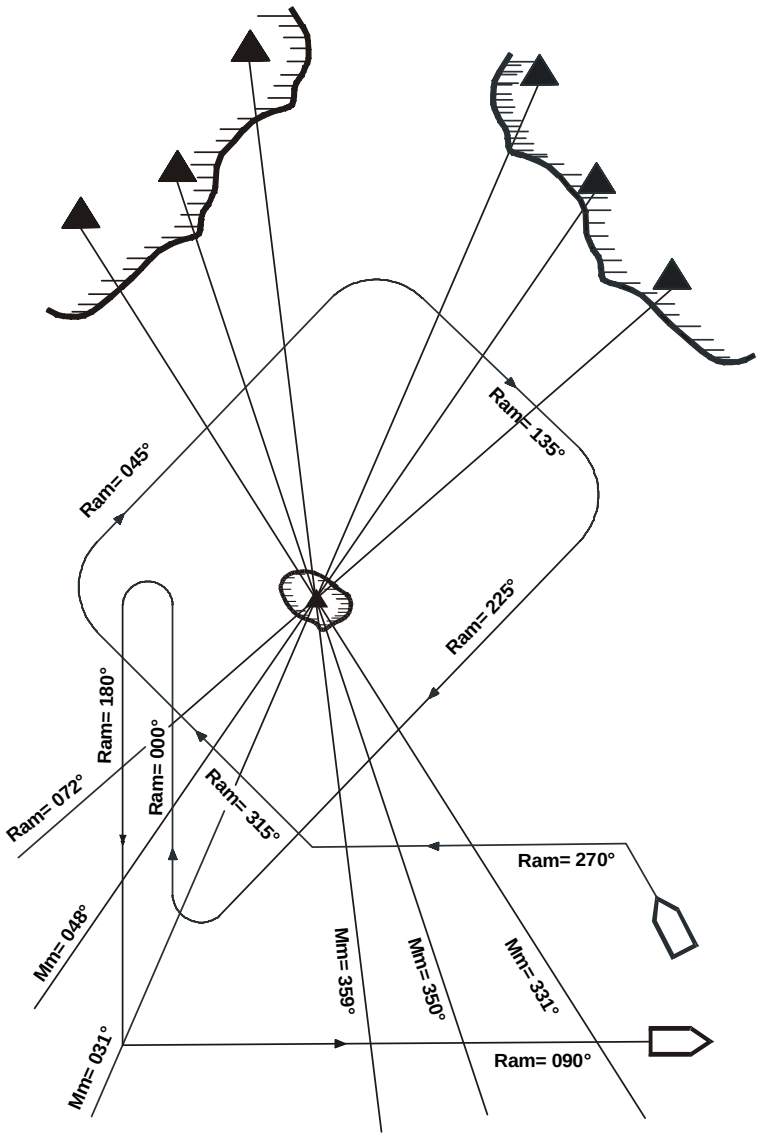


Fig.63 Esquema de maniobra para la determinación del desvio por varias enfilaciones

En la tabla 3.2 se muestra un ejemplo, donde se registran los resultados de las observaciones y el cálculo del desvío.

Tabla 3.2

Ram	Mv	d	Mm	Mam	d	Prom
000°	059°	-2,3°	061,3°	063,2°	-1,9°	-1,8°
	078°		080,3°	082,3°	-1,7°	
	093°		095,3°	097,1°	-1,8°	
090°	121°	-2,3°	123,3°	122,6°	+0,7°	+0,7°
	138°		140,3°	139,5°	+0,8°	
	162°		164,3°	163,7°	+0,6°	

c) Determinación del desvío por comparación con el girocompás

Este método puede ser utilizado parta determinar el desvío tanto en los compases magistrales como en los de gobierno, por ejemplo en los submarinos, en mar abierto o en condiciones de poca visibilidad. Ante esto la determinación del desvío puede efectuarse incluso cuando la corrección del girocompás (Δg) se desconoce.

Analicemos dos casos:

1. Cuando la corrección del girocompás es conocida y es constante

2. Cuando la corrección del girocompás se desconoce

1) Cuando la corrección del girocompás es conocida y es constante

Designemos el rumbo indicado por el girocompás por Rag, la corrección del girocompás Δg, el rumbo indicado por el compás magnético Ram y la corrección total del compás (₵). Para cualquier rumbo verdadero del buque se cumple que (Fig. 64):

$$Rv = Rag + \Delta g \qquad\qquad Rv = Ram + ₵$$

donde:

$$₵ = Rag - Ram + \Delta g$$

por tanto, conociendo el Rag, Δg y el Ram podemos calcular la corrección total del compás y restándole la declinación magnética d obtener el desvío (δ):

$$\delta = Rag - Ram + (\Delta g - d) \qquad (40)$$

La determinación práctica del desvío por comparación con el girocompás se cumplimenta de la forma siguiente:

– Se aproa el buque a **Ram** por el compás magnético

– Por espacio de 2-3 minutos se observan simultáneamente el **Ram** y el **Rag** por el compás y el girocompás respectivamente.

– Se realiza la comparación por la fórmula (40), obteniéndose el desvío para el rumbo magnético deseado.

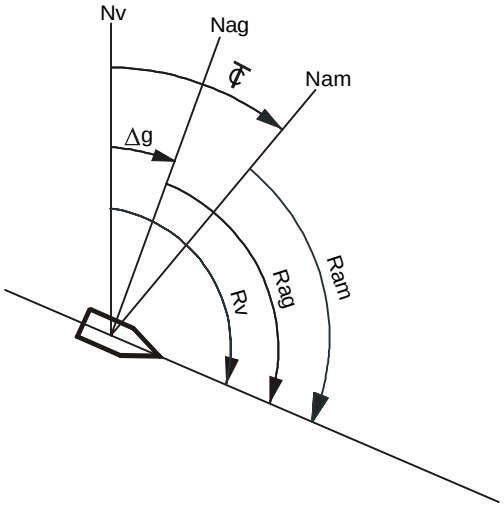


Fig. 64 Determinación del desvio por comparación del girocompás cuando el Δg se conoce.

Al realizar la comparación es conveniente obtener de 3 a 5 lecturas en el tiempo establecido y en la fórmula introducir el valor promedio del **Rag**.

La exactitud de determinación del desvío por el método analizado depende de la estabilidad de la corrección del girocompás. La práctica en el trabajo con los girocompases demuestra que su corrección no es constante y varía durante la maniobra del buque en dependencia de su velocidad y el valor del ángulo de giro. Durante la determinación resultante de estos elementos la maniobra puede hacer variar considerablemente la corrección del girocompás, en la Tabla 3.3 se registran los resultados de la comparación y el cálculo del desvío.

Tabla 3.3

Ram	Rag	Δg-d	Rm=Rag+Δg-d	δ
000°	001.4°	-0.9°	000.5°	+0.5°
045°	046.8°	-0.9°	045.9°	-0.9°
. .	.	.	.	.
. .	.	.	.	.
. .	.	.	.	.

2) Cuando la corrección del girocompás se desconoce

- Para aplicar este método comencemos por aproar el buque en los 8 rumbos agujas magnéticos, manteniéndose en cada uno de ellos por un intervalo de 2-3 minutos, observándose simultáneamente el rumbo por el compás magnético y el girocompás (el buque debe girar en un solo sentido, ya sea a estribor o babor).

- Se calcula la comparación R, o sea, la diferencia entre los rumbos indicado por el compás magnético y el girocompás.

$$R = Rag - Ram \qquad (41)$$

- Por la comparación R al igual que por las observaciones del desvío se calculan los coeficientes del desvío por el **FORMATO 3**. Con este método se puede determinar el desvío del compás magnético independientemente de que se conozca o no la corrección del girocompás.

Analicemos teóricamente el fundamento de este método. Supongamos que el buque está aproado a un rumbo arbitrario (Fig. 65) en el cual se ha observado simultáneamente los rumbos por el girocompás y el compás magnético, en un mismo momento, donde: R= Rag - Ram

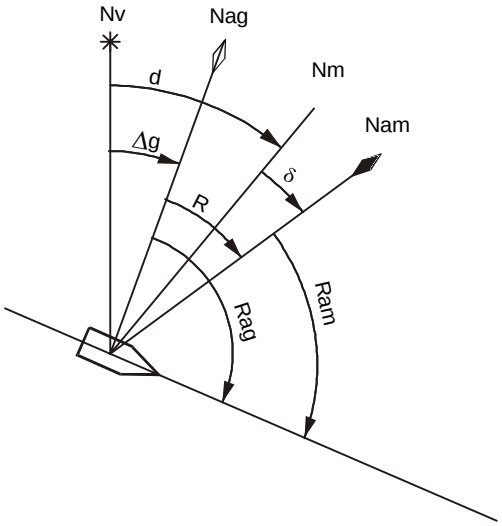


Fig. 65 Determinación del desvio por conparación del girocompás cuando el Δg se desconoce

A su vez la comparación R es la suma algebraica del desvío del compás magnético δ y la declinación magnética d menos la corrección del girocompás Δg.

$$R= (d-\Delta g) + \delta \qquad (42)$$

Sustituyendo el desvío δ por su valor (fórmula aproximada del desvío):

$$\delta= A+BSenRam+CCosRam+DSen2Ram+ECosRam \qquad (43)$$

Obteniendo:

$$R= (d-\Delta g)+A+BSen\ Ram+CosRam+DSen2Ram+ECosRam \qquad (44)$$

- La declinación magnética d en un lugar determinado de la superficie terrestre en un intervalo de tiempo es una magnitud constante, la corrección del girocompás Δg es constante para todos los rumbos, al igual que el coeficiente *A*, y por esta razón estas constantes se incluyen en una sola, designándola como *Ac*, o sea:

$$Ac = A + (d - \Delta g) \qquad (45)$$

Sustituyendo esta expresión en la fórmula del desvío (43), obtenemos que:

$$R= Ac+BSenRam+CosRam+DSen2Ram+ECos2Ram \qquad (46)$$

De la fórmula 46 se deduce que la comparación R se puede analizar como el desvío convencional del compás magnético respecto a las indicaciones del girocompás. De esta forma, si realizamos la comparación R de las lecturas de los rumbos Rag por el girocompás y Ram por el compás magnético en los ocho rumbos agujas magnéticos y lo tomamos convencionalmente durante los cálculos del desvío, entonces se puede calcular por el **FORMATO 3** los coeficientes Ac, B. C, D, y E y a su vez los coeficientes del desvío B, C, D y E serán calculados con la misma exactitud como si se hubieran calculado por las observaciones del desvío; pero en lugar del coeficiente *A* obtenemos *Ac* el cual se calcula por la fórmula:

$$Ac = A + (d - \Delta g).$$

Por consiguiente, si la declinación magnética d, actualizada para el año, es conocida, así como es conocido también Δg, entonces se puede calcular el coeficiente constante *A* del desvío.

$$A = Ac - (d - \Delta g)$$

Con los coeficientes del desvío calculados A, B, C, D y E, se calcula la tablilla de desvío por el **FORMATO 3**. Se debe tener en cuenta que en este caso no se pueden comparar los desvíos calculados con los observados en los mismos rumbos agujas magnético, ya que no se determinó el desvío sino la comparación *R*.

Si la corrección del girocompás se desconoce entonces para el cálculo de la tablilla del desvío se utiliza el coeficiente *A*, determinado en los cálculos anteriores, es decir, el valor del coeficiente *A* se toma del Manual Oficial del Compensador. En este caso la correción del girocompás se calcula por:

$$\Delta g = A - Ac + d$$

En este fundamento teórico hemos considerado que la corrección del girocompás Δg, es una magnitud constante para todos los rumbos.

Sin embargo en la práctica se observa, que durante la maniobra del buque al determinar el desvío debido a los giros, la corrección del girocompás puede variar. Para excluir los errores en la determinación del desvío, debido a las posibles variaciones de la corrección del girocompás, en la práctica se hace lo siguiente:

Se realiza la comparación en los ocho rumbos agujas magnéticos (por ejemplo, comenzando por; Ram_1= 000° ..... Ram= 315°) repitiéndose la misma en el primer rumbo (Ram_1= 000°), es decir, en el rumbo donde se comenzó el trabajo, por tanto, para determinar el desvío se deben realizar nueve comparaciones ($R_0 = Rag_1 - Ram_1$, $R_1 = Rag_2 - Ram_2$, $R_2 = Rag_3 - Ram_3$, ... $R_8 = Rag_9 - Ram_1$).

- Calculamos la magnitud general de variación de la comparación, para esto se halla la diferencia entre la primera comparación (R_0) y la última (novena), R_8

- Se determina la variación de la magnitud de la comparación (ΔR) para cada rumbo, para lo cual el valor general de la comparación ($R_0 - R_8$) se divide entre ocho (números de rumbos agujas magnéticos) y el obtenido específico se multiplica por el número ordenado de rumbo.

Ejemplo: Para el quinto rumbo (Ram=225°) el valor de la comparación será:

$$\Delta R_5 = \frac{\left(R_0 - R_8\right)}{8} 5$$

Las anotaciones y cálculos se realizan en un esquema confeccionado con anticipación (Tabla 3.4).La comparación sólo se realiza después que el buque gira al nuevo rumbo,manteniéndolo de 2 a 3 minutos.

Tabla 3.4

COMPAS MAGISTRAL N° 175					
Orden numérico de los rumbos.	**Rag**	**Ram**	**R**	ΔR	**R+ΔR**
I	II	III	IV=II+III	V	VI=IV+V
0	5,8°	0,0°	+5,8°	0,0°	+5,8°
1	47,6°	45,0°	+2,6°	-0,2°	+2,4°
2	96,9°	90,0°	+6,9°	+0,5°	+6,4°
3	145,4°	135,0°	+10,4°	-0,8°	+9,6°
4	186,8°	180,0°	+6,8°	-1,0°	+5,8°
5	228,6°	225,0°	+3,6°	-1,2°	+2,4°
6	277,6°	270,0°	+7,6°	-1,5°	+6,1°
7	326,2°	315,0°	+11,2°	-1,8°	+9,4°
8	7,8°	360,0°	+7,8°	-2,0°	+5,8°

Expliquemos con un ejemplo la ejecución práctica de la determinación del desvío por comparación con el girocompás

1. La corrección del girocompás Δg se desconoce. Para la determinación del desvío del compás magnético, el buque consecutivamente se aproa por el compás en los ocho rumbos agujas magnéticos, comenzando con el Ram= 000° (los Ram están anotados en la columna 3 de la tabla), después nuevamente se aproa al rumbo inicial Ram= 000° . En este ejemplo consideraremos que el buque está girando a estribor.

2. Después que el buque se mantiene por un intervalo de tiempo de 2-3 minutos en cada rumbo, se observa exactamente las indicaciones del girocompás (Rag), cuyos valores están anotados en la columna 2 de la tabla.

3. Calculamos la comparación R=Rag-Ram, las cuales están anotadas en la columna cuatro de la tabla (R_0,R_1,.....R_8).Por ejemplo, para la novena comparación (Ram=000°) observamos que ésta varió en -2°, (R_0-R_8) = 5,8° -7,8°= -2°, que es la magnitud general de variación de la comparación.

4. Calculamos la magnitud de variación de la comparación ΔR en cada rumbo (columna 5). Para esto la magnitud general de la variación de la comparación (R_0- R_8) se divide entre ocho, el cociente obtenido se multiplica por el orden numérico de rumbo (como se explicó anteriormente, el primer rumbo desde que se inició el trabajo, se le asigna el número de orden rumbo cero).

$$\Delta R = \frac{(R_0 - R_8)}{8} 2 = \frac{-2°}{8} 2 = -0{,}25x2 = -0{,}5°$$

$$\Delta R_6 = -0{,}25x6 = -1{,}5°$$

$$\Delta R_8 = -0{,}25x8 = -2{,}0°$$

La magnitud de la variación de la comparación está anotada en la columna 5 para cada rumbo.

5. Se calcula la magnitud de la comparación corregida (R + ΔR) para cada rumbo y se anota en la columna 6.

6. La comparación corregida (R + ΔR) se toma convencionalmente como el desvío y en el **FORMATO 3** se calculan los coeficientes del desvío; ante esto en lugar del coeficiente A obtenemos:

$$A_c = A + (d - \Delta g).$$

Si la comparación (R + ΔR) >10° para todos los rumbos, entonces para mayor comodidad esta comparación se disminuye en 10° y con los valores obtenidos de la comparación (R-10°), se considera como el desvío convencional y se calcula por el **FORMATO 3** los coeficientes del desvío, después al coeficiente obtenido Ac se le suma 10°.

7. Del Manual Oficial del Compensador se toma el valor del coeficiente *A*, ejemplo: A= 0,0°, calculando posteriormente la tablilla de los desvíos residuales por el **FORMATO 4, para finalmente plotear los resultados en el gráfico de los desvíos residuales**.

FORMATO 3 **CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES POR LOS DESVIOS DETERMINADOS EN LOS 8 RUMBOS.**

Ram	1 δ R +ΔR	Ram	2 δ R +ΔR	3 ½(1+2)	4 ½(1-2)	K	5 K4	K	6 K4	7 Mitad superior columna 3	8 Mitad inferior columna 3	9 ½(7+8)	10 ½(7-8)	
N	+5,8°	**S**	+5,8°	+5,80°	0,00°	0	0,00°	1	0,00°	+5,80°	+6,25°	+6,02°	-0,22°	**=E**
NE	+2,4°	**SW**	+2,4°	+2,40°	0,00°	S_{45}	0,00°	S_{45}	0,00°	+2,40°	+9,50°	+5,95°	-3,55°	**=D**
E	+6,4°	**W**	+6,1°	+6,25°	+0,15°	1	+0,15°	0	0,00°		Σ	+11,97°		
SE	+9,6°	**NW**	+9,4°	+9,50°	+0,10°	S_{45}	+0,07°	$-S_{45}$	-0,07°		**1/2Σ**	+5,98°		**=A**
						+	0,22°	+	0,00°					
						-	0,00°	-	-0,07°					
						Σ	0,22°	Σ	-0,07°					
					B=	**1/2Σ**	+0,11	**1/2Σ**	0,04°	**=C**				

CONTROL 3+4=1

CONTROL 9+10=7

FORMATO 4				CÁLCULO DE LOS DESVIOS RESIDUALES CADA 10°										
D=-3,6°		E=-0,2°		3	4	B=+0,1°		C=0,0°		7	Ram	δ	Ram	δ
M	1	M	2		A=0,0°	M	5	M	6					
	D.M		E.M	1+2	3+A		B.M		C.M	5+6		4+7		4-7
0	0.0°	1	-0.2°	-0.2°	-0.2°	0	0.0°	1	0.0°	0.0°	0°	-0.2°	180	-0°.2
S_{20}	-1.2	S_{70}	-0.2	-1.4	-1.4	S_{10}	0.0	S_{80}	0.0	0.0	10	-1.4	190	-1.4
S_{40}	-2.3	S_{50}	-0.2	-2.5	-2.5	S_{20}	0.0	S_{70}	0.0	0.0	20	-2.5	200	-2.5
S_{60}	-3.1	S_{30}	-0.1	-3.2	-3.2	S_{30}	+0.1	S_{60}	0.0	+0.1	30	-3.1	210	-3.3
S_{80}	-3.6	S_{10}	0.0	-3.6	-3.6	S_{40}	+0.1	S_{50}	0.0	+0.1	40	-3.5	220	-3.7
S_{80}	-3.6	$-S_{10}$	0.0	-3.6	-3.6	S_{50}	+0.1	S_{40}	0.0	+0.1	50	-3.5	230	-3.7
S_{60}	-3.1	$-S_{30}$	+0.1	-3.0	3.0	S_{60}	+0.1	S_{30}	0.0	+0.1	60	-2.9	240	-3.1
S_{40}	-2.3	$-S_{50}$	+0.2	-2.1	-2.1	S_{70}	+0.1	S_{20}	0.0	+0.1	70	-2.0	250	-2.2
S_{20}	-1.2	$-S_{70}$	+0.2	-1.0	-1.0	S_{80}	+0.1	S_{10}	0.0	+0.1	80	-0.9	260	-1.1
0	0.0	-1	+0.2	+0.2	+0.2	1	+0.1	0	0.0	+0.1	90	+0.3	270	+0.1
$-S_{20}$	+1.2	$-S_{70}$	+0.2	+1.4	+1.4	S_{80}	+0.1	$-S_{10}$	0.0	+0.1	100	+1.5	280	+1.3
$-S_{40}$	+2.3	$-S_{50}$	+0.2	+2.5	+2.5	S_{70}	+0.1	$-S_{20}$	0.0	+0.1	110	+2.6	290	+2.4
$-S_{60}$	+3.1	$-S_{30}$	+0.1	+3.2	+3.2	S_{60}	+0.1	$-S_{30}$	0.0	+0.1	120	+3.3	300	+3.1
$-S_{80}$	+3.6	$-S_{10}$	0.0	+3.6	+3.6	S_{50}	+0.1	$-S_{40}$	0.0	+0.1	130	+3.7	310	+3.5
$-S_{80}$	+3.6	$-S_{10}$	0.0	+3.6	+3.6	S_{40}	+0.1	$-S_{50}$	0.0	+0.1	140	+3.7	320	+3.5
$-S_{60}$	+3.1	S_{30}	-0.1	+3.0	+3.0	S_{30}	+0.1	$-S_{60}$	0.0	+0.1	150	+3.1	330	+2.9
$-S_{40}$	+2.3	S_{50}	-0.2	+2.1	+2.1	S_{20}	0.0	$-S_{70}$	0.0	0.0	160	+2.1	340	+2.1
$-S_{20}$	+1.2	$-S_{70}$	-0.2	+1.0	+1.0	S_{10}	0.0	$-S_{80}$	0.0	0.0	170	+1.0	350	+1.0

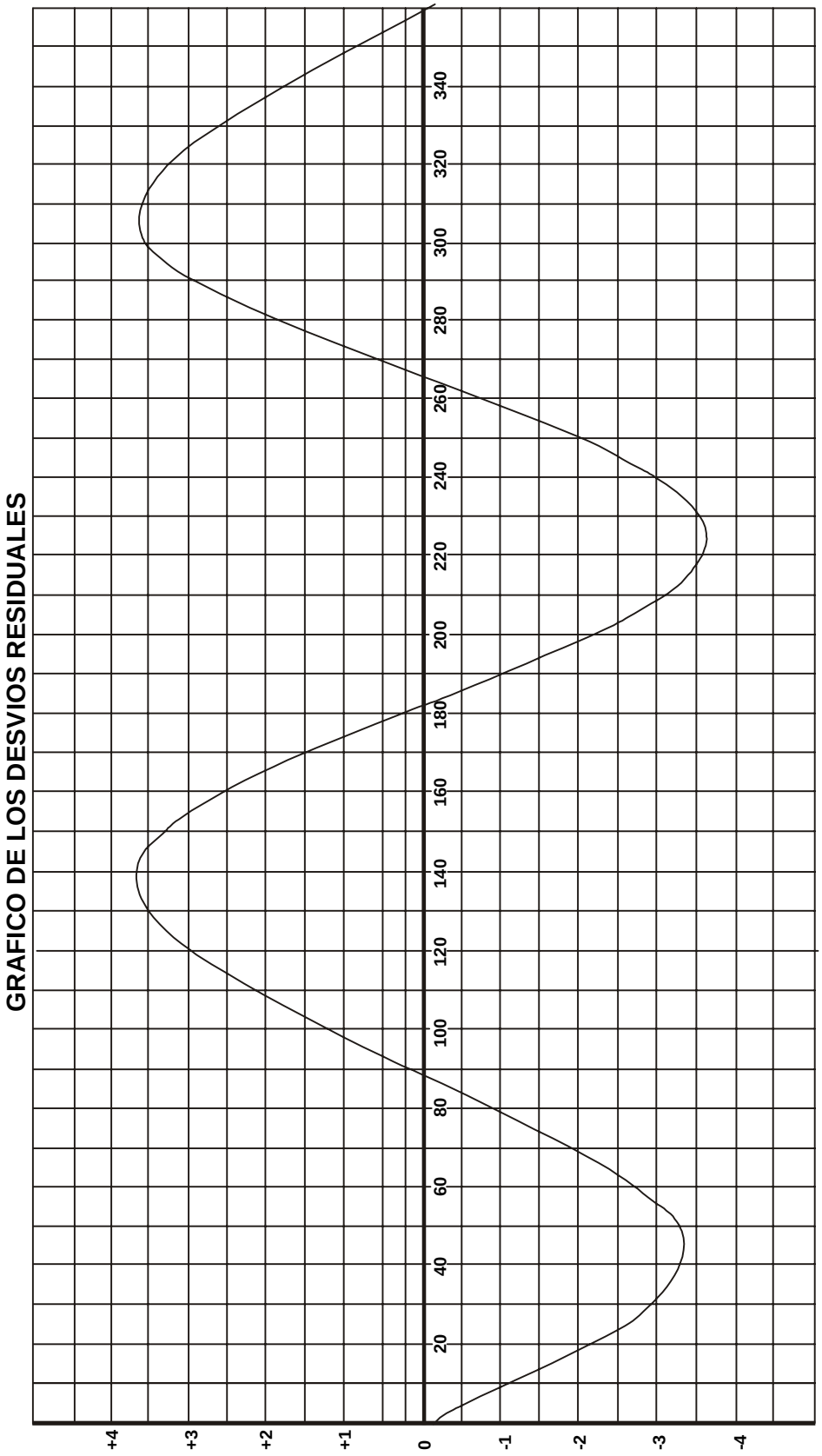


GRAFICO DE LOS DESVIOS RESIDUALES
+4
+3
+2
+1
0
-1
-2
-3
-4
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
320
340

3.13 Métodos para aproar el buque a un rumbo magnético (Rm) dado

La compensación del desvío semicircular por el método de Ery (desvío promedio) se realiza en rumbos magnéticos.

Para aproar el buque a un rumbo magnético dado se utilizan los siguientes métodos:

a) Por marcación relativa a un objeto lejano o enfilación.

b) Por aproximación consecutiva.

c) Por disminución (compensación) consecutiva del desvío.

d) Por comparación con el girocompás.

a) Por marcación relativa a un objeto lejano o enfilación

Para realizar este método es necesario tomar de la carta o determinar la marcación magnética (Mm) de la enfilación u objeto lejano. Conociendo la Mm y el Rm que deseamos, se puede calcular la marcación relativa (Mr) bajo la cual se observará el objeto o enfilación en el momento cuando el buque esté aproado al Rm dado.

La marcación relativa se calcula por la fórmula:

$$Mr = Mm - Rm$$

Sólo queda por colocar la alidada en el valor de la marcación relativa calculada por el círculo azimutal girando posteriormente el buque hasta que el objeto lejano o enfilación se observe en el plano visor de la alidada, una vez hecho esto, el buque estará aproado al Rm deseado.

Ejemplo:

La marcación magnética de la enfilación es 105°. Se desea aproar el buque a rumbo magnético 090°. Calcular la marcación relativa (Mr)

Datos:
Mm = 105° Rm = 090°

1. Calculamos por la fórmula la Mr.

Mr= Mm - Rm
=105°- 090°
Mr= 15°

2. Colocamos el índice de la alidada en la lectura Mr = 015° por el círculo azimutal del mortero del compás (Fig. 66a)

3.Sin mover la alidada, giramos el buque en el lugar hasta que el hilo de la pínula objetiva de la alidada se encuentre sobre la enfilación dada (Fig. 66b).

Finalizada la maniobra, el buque estará aproado al *Rm* deseado.

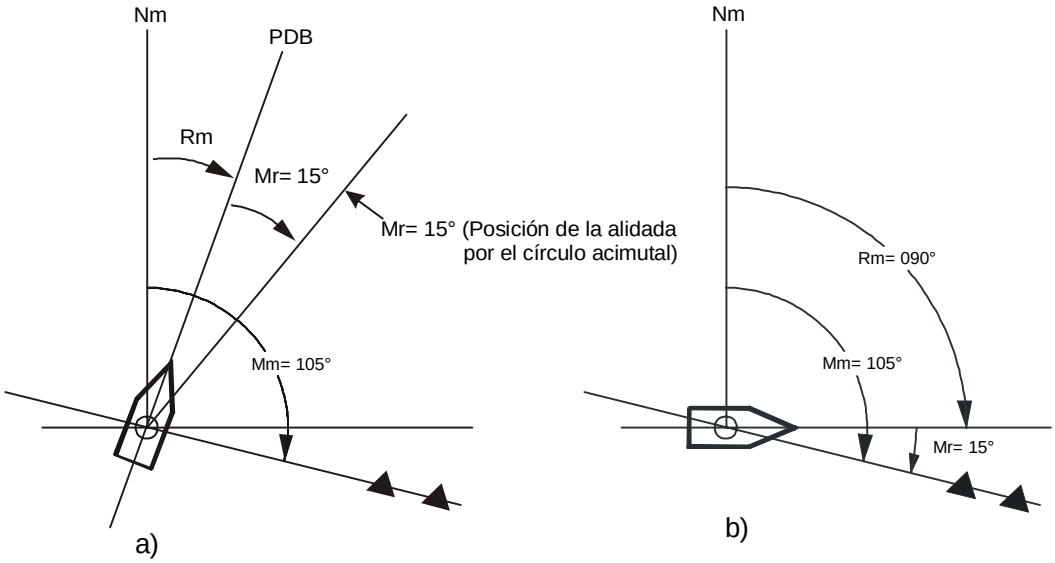


Fig. 66 Aproamiento del buque del buque por marcaciones relativa a un objeto lejano o enfilación

b) Aproamiento del buque a un Rm dado por aproximación consecutiva.

El método de aproximación consecutiva se reduce a la búsqueda de un rumbo aguja que corresponda al rumbo magnético dado.

Este exige la determinación del desvío en varios rumbos consecutivos y es por eso que es útil utilizarlo cuando existe un abanico de enfilaciones o varias enfilaciones.

Expliquemos el método con un ejemplo concreto (Fig. 67).

Se desea aproar el buque a un Rm dado.

1) Aproamos el buque a Ram_1= 000° y al cortar la línea de enfilación (I) determinamos el desvío

$$\delta_1 = +15{,}6° \qquad (\delta = Mm - Mam)$$

El rumbo magnético será Rm_1= 15,6° ($Rm_1 = Ram_1 + \delta_1$), que no es el Rm deseado

2) Para aproarse a Rm= 000° es necesario girar por el compás 15°.6 a babor, por tanto el nuevo rumbo aguja magnético será Ram_2= 344°.4, (Ram_1= 360°-15°.6). Navegando en este rumbo, al cortar la segunda línea de enfilación determinamos nuevamente el desvío:

$$\delta_2 = +5{,}9°$$

De esta forma el buque en el momento dado estará aproado a rumbo magnético Rm_2= 350,3°, (344°+5,9°). Que tampoco es el Rm deseado.

3) Para lograr el objetivo propuesto (Ram= 000°), caemos por el compás 9,7° a estribor . Después del giro, el rumbo aguja será Ram_3= 354°.1, (344°.4+9°.7). Determinando el desvío obtenemos que:

$$\delta_3 = +\ 6{,}0°$$

Calculando el Rm_3= 354,1°+6 = 360,1° vemos que el buque está aproado al rumbo magnético dado, Rm= 000°.

Se considera que el objetivo se ha logrado cuando:

$$\delta_3 - \delta_2 = Ram_3 - Ram_4 = Ram_3 - Ram \leq |0{,}5°|.$$

En el ejemplo dado:

Rm – Rumbo magnético dado, 000°(360°).

Rm_3 – Rumbo magnético calculado después de finalizada la maniobra (360,1° ó 000,1°)

Rm_3 – Rm = 0,1°

Rm_3 – Rm < 0,5°. Por lo tanto, el buque estará aproado al rumbo magnético deseado, Rm= 000°.
0,1°< 0,5°

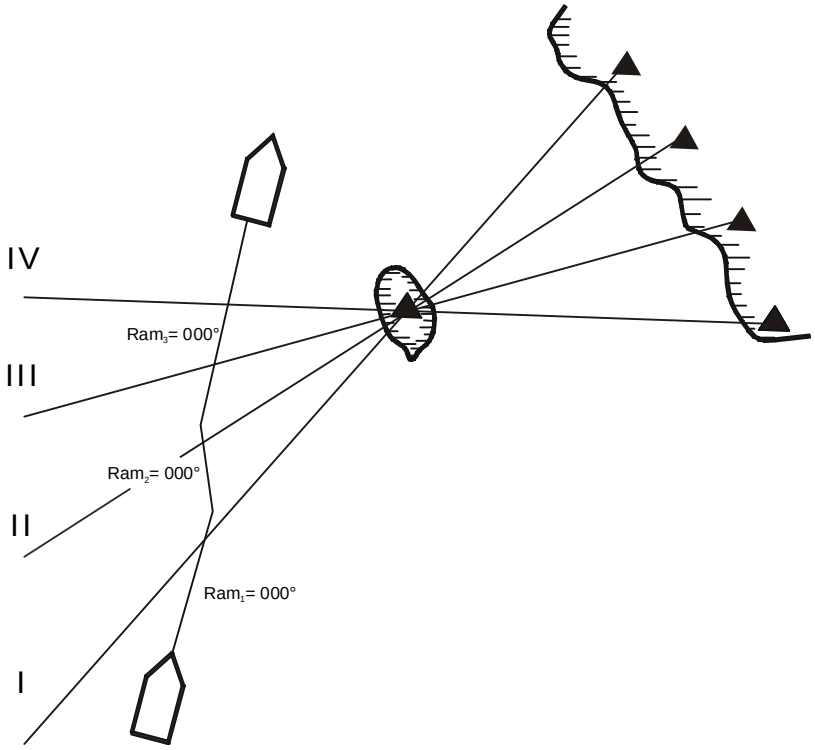


Fig. 67 Aproamiento del buque a un Rm dado por aproximación consecutiva

Para evitar errores en las anotaciones de los resultados de las observaciones y cálculos, se recomienda la tabla 3.5, indicada a continuación.

Tabla 3.5

Ram_i	δ_i	$Rm_i = Ram_i + \delta_i$	$Rm_{i+1} = 000° - \delta_i$
$Ram_1 = 000°$	$\delta_1 = +15{,}6°$	$Rm_1 = 015{,}6°$	$Ram_2 = 344{,}4°$
$Ram_2 = 344{,}4°$	$\delta_2 = +5{,}9°$	$Rm_2 = 350{,}3°$	$Ram_3 = 354{,}1°$
$Ram_3 = 354{,}1°$	$\delta_3 = +6{,}0°$	$Rm_3 = 360{,}1°$	-

c) Aproamiento a un Rm dado por disminución consecutiva del desvío

1. Aproamos el buque a Ram_1= 000° y moviendo los imanes transversales en el momento de cortar la línea de enfilación (punto A) compensamos todo el desvío que aparezca en este rumbo, es decir, tratamos de lograr que Mm=Mam (en nuestro caso Mm= 031°, Mam= 048°, δ= 43°-25°=+18°). En el primer intento esto prácticamente no es posible lograrlo, ya que el especialista o navegante sólo dispone de fracciones de segundos para llevar el desvío a cero.

2. Después de pasar la primera enfilación volvemos aproar el buque a Ram_2= 000° (este rumbo aguja magnético no es igual al anterior (Ram_1= 000°), ya que el desvío varió al mover los imanes), al cortar la segunda línea de enfilación (punto B) tratamos de llevar la Mam al valor de la marcación magnética (Mm= 060°), con los mismos imanes transversales. Del gráfico se observa que Mam=050°, donde δ= 060°-050°= +10°, el desvío se ha reducido en 8°, (18°-10°), repetimos esta operación (Ram_3= 000°), hasta que Mam=Mm= 074°, δ= 0° (punto C).

De forma análoga se procede para el resto de los rumbos.

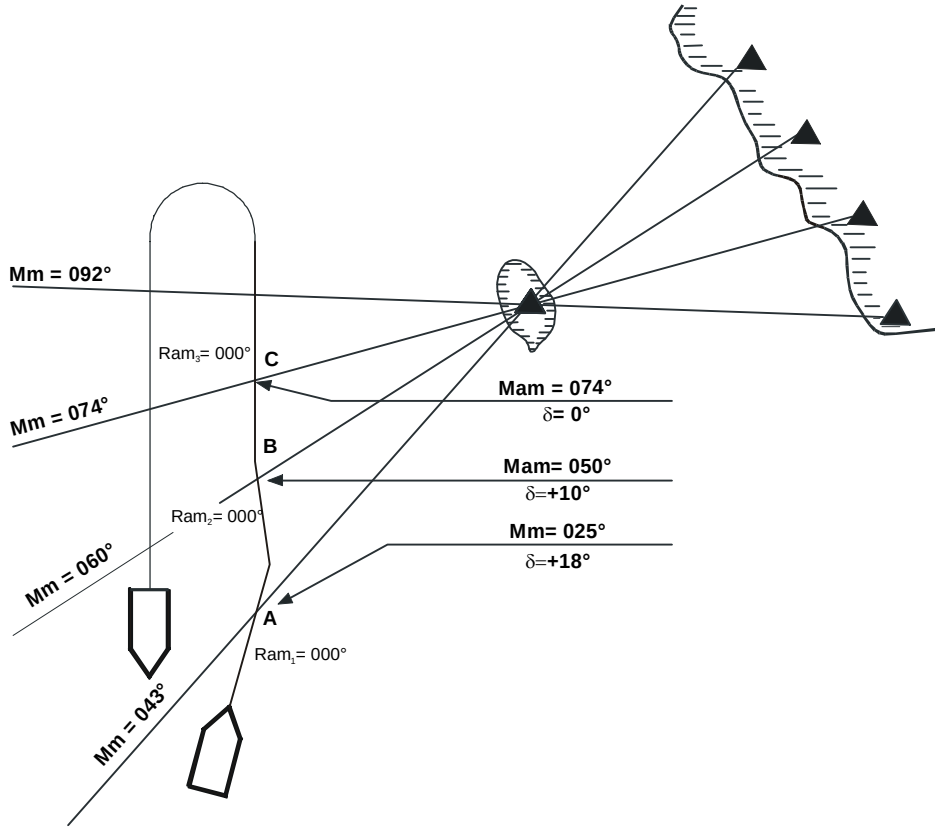


Fig. 68 Aproamiento del buque a un Rm dado por disminución consecutiva del desvío

Este método de aproar el buque a un Rm aunque requiere experiencia es muy sencillo y fácil de realizar. Su ventaja principal es que al mismo tiempo que se está aproando el buque a un Rm dado se está compensando el desvío semicircular, lo que permite reducir considerablemente el tiempo.

El método expuesto lo hemos simplificado utilizando varias enfilaciones (abanico de enfilaciones, que es el más idóneo, (Fig. 68). Pero si sólo se dispone de una línea de enfilación también se puede emplear dicho método (Fig. 69), pero el tiempo empleado para la realización de los trabajos de desvío será mayor.

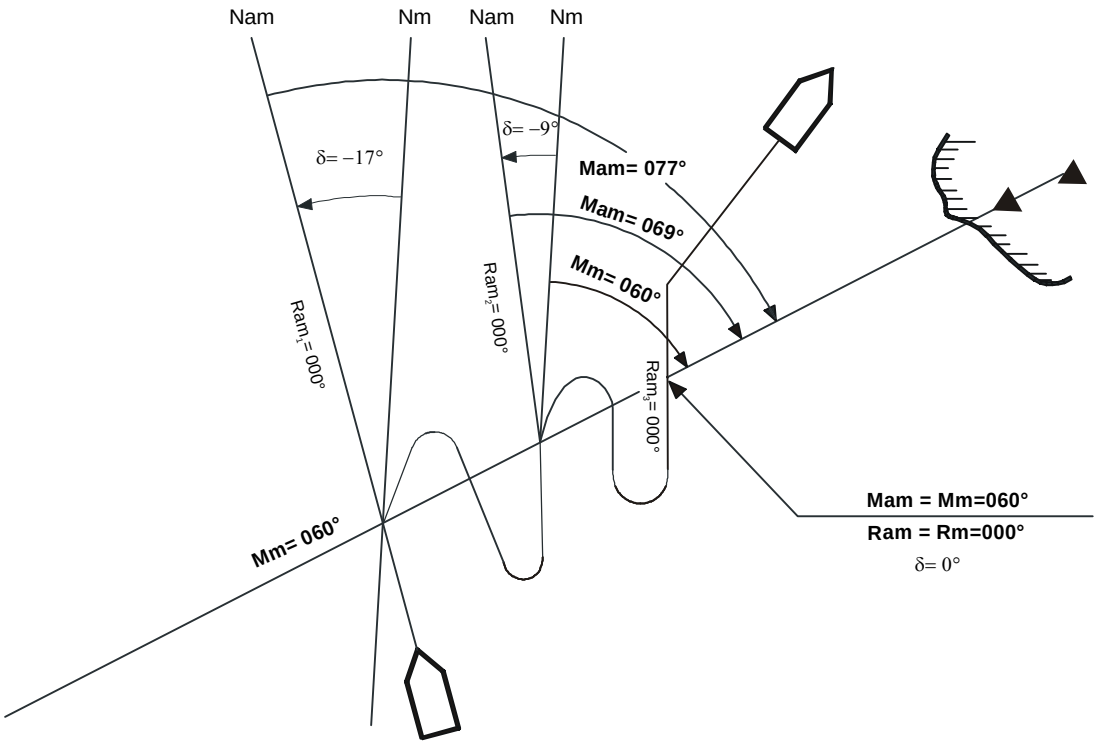


Fig.69 Aproamiento del buque a un Rm dado por disminución consecutiva del desvío utilizado una enfilación

d) Por comparación con el girocompás

De la figura 70 vemos que:

$$Rv = Rag + \Delta g = Rm + d$$
$$Rag = Rm + d - \Delta g$$

donde:

Rag - Rumbo aguja giro

Rm - Rumbo magnético

d - Declinación magnética en la región dada

Δg - Corrección del girocompás

Ejemplo:

Se desea aproar el buque a los rumbos magnéticos 000°, 090°, 180° y 270° para realizar la compensación del desvío semicircular.

Datos:

Rm= 000°,090°,180°,270°

d= +7°

Δg= +2°

Calcular los Rag

Sustituyendo los valores en la fórmula: Rag= Rm+d - Δg

Para Rm=000°
Rag= 000°+ (+ 7°) - (+ 2°)= 005°

Para Rm=090°
Rag = 090° + (+ 7°) - (+ 2°) = 095°

Para Rm=180°
Rag = 180° + (+7°) - (+ 2°) = 185°

Para Rm=270°
Rag = 270° + (+7°) - (+ 2°) = 275°

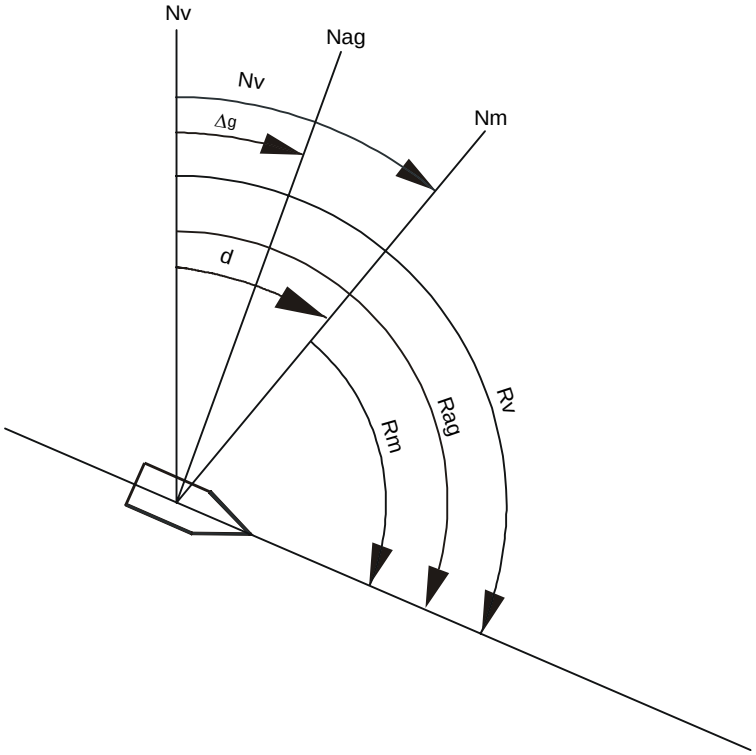


Fig. 70 Aproamiento del buque a un Rm dado por comparación con el girocompás

3.14 Compensación del compás magnético

Necesidad de compensación del desvío

El desvío del compás magnético en los buques modernos puede alcanzar de 30° - 50° y más, especialmente en los compases de gobierno, los cuales están instalados cerca de los hierros que los rodea.

Podría parecer que, por muy grande que éste sea, se pudiera determinar su magnitud para los rumbos magnéticos y agujas magnéticas y considerarlo durante la corrección de los rumbos. Sin embargo, en presencia de un desvío tan grande esto es imposible.
Para demostrar esto veamos una serie de causas que obligan al navegante (especialista) a compensar

periódicamente el desvío.

Como ya se señaló anteriormente en un buque moderno el desvío del compás puede alcanzar varias decenas de grados.
Ante tal desvío no se puede calcular la Tablilla por la forma simplificada (aproximada).

$$\delta = A + B \text{ sen } Ram + C \cos Ram + D \text{ sen } 2Ram + E \cos 2Ram$$

ya que ésta es válida solo para desvíos pequeños:

$(\delta \leq 12{,}5°)$.

La confección de la tablilla por la fórmula exacta del desvio:

$$\text{sen } \delta = A' \cos \delta + B' \text{ sen } Ram + C' \cos Ram + D' \text{ sen } (2Ram + \delta) + E' \cos, (2Ram + \delta) \qquad (47)$$

implica cálculos prolongados y complejos.

La situación señalada es una de las causas de la necesidad de compensación del desvío.

Sim embargo, ésta no es la causa fundamental, ya que las dificultades relacionadas con el cálculo de la tablilla del desvío pueden ser resueltas con la utilización de la técnica de computacíon.

Supongamos que el desvío fue calculado sin la compensación previa y que fue confeccionada la siguiente tablilla para 36 rumbos (tabla 3.6).

Tabla 3.6

Ram	δ	Rm	Ram	δ	Rm	Ram	δ	Ram
0°	-6°	354°	120°	+40	160°	240°	-33	270°
10	-10	0	130	+42	172	250	-36	214
20	-13	7	140	+44	184	260	-35	225
30	-15	15	150	+41	191	270	-30	240
40	-17	23	160	+34	194	280	-22	258
50	-18	32	170	+26	196	290	-15	275
60	-18	42	180	+18	198	300	-10	290
70	-14	56	190	+15	205	310	-6	304
80	-3	77	200	+9	209	320	-3	317
90	+15	105	210	-6	204	330	-1	329
100	+28	128	220	-20	200	340	0	340
110	+35	145	230	-30	200	350	-3	347

Observando esta tablilla no es difícil cerciorarse que su utilización está acompañada de una serie de dificultades.

1. El desvío para los mismos rumbos agujas magnéticas y rumbos magnéticos se diferencian considerablemente en magnitud. Por ejemplo para rumbo aguja magnética 160, $\delta = + 34°$ y para el mismo rumbo magnético (160), $\delta = + 40°$

Por eso ante un desvío tan grande es necesario tener dos tablillas del desvío: una para rumbos agujas magnéticos y otra para rumbos magnéticos.

2. Al determinar el desvío en los rumbos intermedios, lo que se hace siempre con una interpolación simple se pueden cometer errores considerables ya que cuando el desvío alcanza grandes valores, la no proporcionalidad con la variación del rumbo es muy pronunciada.

3. La variación del rumbo del buque por el compás ante grandes desvíos no corresponde con el giro del buque. Si por ejemplo el buque cambia de rumbo de 70° a 80°, o sea, varía el rumbo aguja magnética en 10°, el giro real del buque es de 21° porque su rumbo magnético varía en 21°. De la tablilla podemos observar tambien que cuando variamos el rumbo aguja magnética de 220 a 230° el rumbo magnético es el mismo (200°).

En rumbos aislados puede suceder que al girar el buque a estribor el rumbo aguja magnética puede disminuir y al girar a babor puede aumentar. Es decir, no es posible realizar los giros por las indicaciones del compás.

Pero hay otra causa más importante que obliga a tomar medidas para la compensación del desvío. Si en el compás el desvío es grande esto significa que todas las fuerzas que producen el desvío o alguna de ellas, son grandes en comparación con la fuerza directriz λ H. Ante esto puede suceder que estas fuerzas en ciertos rumbos están dirigidas de tal forma con relación al meridiano magnético que su resultante H' sea igual o próxima a cero

En estos casos el compás deja de trabajar, ya que la fuerza H' que orienta la aguja del compás, no puede al girar el buque, superar la fuerza de fricción de la joya sobre el estilo y la rosa del compás mecánicamente seguirá al buque, señalando el mismo rumbo aguja magnético.

De esta forma para garantizar la confiabilidad y exactitud de las indicaciones del compás magnético en cualquier condición de navegación es necesario compensar el desvío.

Esencia de la compensación. Operaciones

La compensación tiene por objeto igualar el campo magnético que rodea a la aguja y reducir los desvíos en lo posible. Al colocar los imanes y correctores se neutraliza la influencia perturbadora del magnetismo de a bordo, de modo que la compensación hecha en una bitácora servirá para cualquier aguja que en ella se instale, siendo iguales los desvíos en todos los casos.

Existen una serie de operaciones que garantizan la compensación del compás y que son las siguientes:

1) Elección del sitio y procedimiento.
2) Preparación del buque.
3) Preparación de la aguja .
4) Compensación práctica.
5) Obtención y cálculo de los coeficientes aproximados.
6) Rectificación de la compensación.
7) Registro de los datos y resultados en el libro del oficial compensador.

Elección del sitio y procedimiento

1) Si se hace navegando o fondeado, elegir una zona en donde no se entorpezca el paso de otros buques.

2) En caso de estar fondeados, procurar que no haya otros buques en un radio de 200 metros.

3) De todos los métodos de compensación y determinación de desvíos, se eligirá el que más convenga, pero hay que insistir que no se debe emplear el girocompás si no se tiene completa seguridad en la exactitud de su funcionamiento en todos los rumbos. La experiencia y las cirscunstancias decidirá en cada caso cuál es el procedimiento mas adecuado.

Preparación del buque.

1) El buque estará en condiciones análogas, o lo más parecidas posibles, a las de sus navegaciones (encendido, carga habitual, adrizado, botes en pescantes, cañones en posición de trinca. etc.).

2) Si el buque ha estado atracado durante un tiempo prologado en la misma dirección, se le debe mantener girando como mínimo 2 días antes de compensar u obtener la tablilla de los desvios reciduales.

3) Si acaba de salir de los astilleros, extremar los cuidados anteriores y antes de ponerlo a la gira se le tendrá amarrado durante varios días a un rumbo opuesto al de construcción o armamento.

4) Trincar todas las sustancias metálicas giratorias instaladas alrededor de la aguja en sus posiciones habituales (puertas, pescantes, plumas de carga, etcétera).

5) Comprobar que no hay materiales magnéticos olvidados en las proximidades de la bitácora.

Preparación de la rosa del compás.

1) Eliminar las burbujas del mortero.

2) Comprobar que la bitácora esté correctamente instalada.

3) Comprobar la sensibilidad de la aguja.

4) Determinar el período de oscilación de la rosa en tierra.

5) Comprobar el magnetismo residual de las esferas y barra Flinders. Si existe eliminarlo.

Otras recomendaciones

1) Comprobar la correcta alineación de los repetidores .

2) Comprobar la concordancia de los repetidores del girocompás con el aparato principal (magistral).

3) Comprobar la corrección del girocompás (Δg) en varios rumbos.

4) Actualizar la declinación magnética tomada de la carta de la última edición.

5) Se pondrán en hora los relojes de todos los operadores.

6) Organizar perfectamente el sistema de señales y comunicaciones entre los que intervienen en la operación.

7) Tener actualizado el "Libro del Oficial Compensador" y efectuado todos los cálculos que se puedan hacer con anterioridad.

8) Son necesarios de 3 a 4 minuto para que el buque adquiera el magnetismo correspondiente al rumbo a que se quiere compensar.

9) Tener preparado un número suficiente de imanes en buen estado.

10) Consultar previamente con el Libro del Oficial Compensador (LOC).

3.15 Compensación práctica

El procedimiento que a continuación se explica se refiere a los casos en que la aguja magnética carece de tablilla de desvío o que ésos han cambiado tanto, que la anterior colocación de imanes no aporta ningun beneficio. Cuando las anormalidades sean pequeñas o se quiere afinar la compensación se partirá del estado actual de la bitácora, tal como se explica en la rectificación de la compensación.

1) Se quitan todos los imanes transversales y longitudinales a la bitácora.

2) Las esferas cuadrantales se dejan en la posición anterior, si se sabe que es correcta y en los demas casos se fijan a la mitad de sus soportes.

3) La barra Flinders se deja en su posición anterior, si se sabe que es correcta y en caso contrario se quita.

4) Lo mismo se hace con el imán de escora que se coloca dentro de un estuche, dejándolo ir hasta el fondo del tubo cuando se tenga duda de su posición exacta. El extremo norte (rojo) se coloca hacia arriba en el hemisferio norte y en el sur lo contrario.

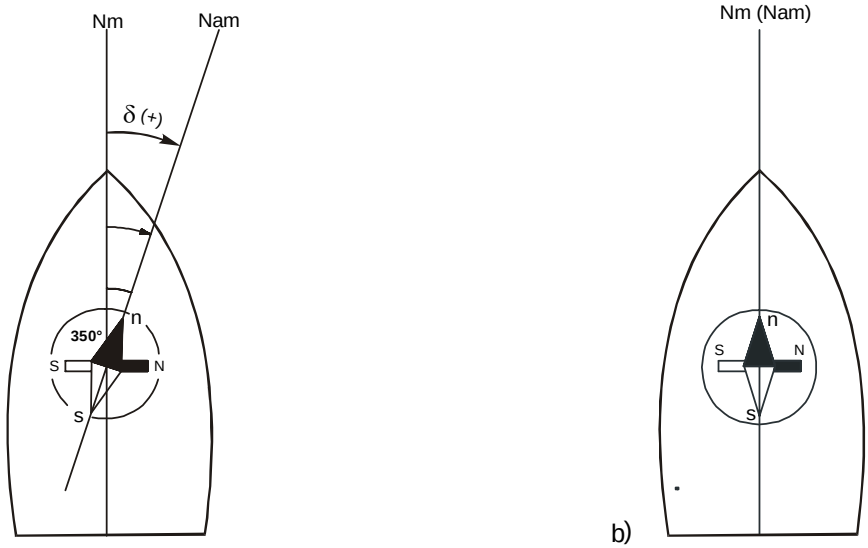
3.16 Compensación del desvío semicircular por el método de Ery (Rm = 000°, 090°, 180° y 270°) y compensación del desvío cuadrántal (Rm = 135°, 315°)

El método de Ery es uno de los principales métodos que se utiliza en la práctica para la compensación del desvío semicircular. Se realiza en los rumbos magnéticos 000°, 090°, 180° y 270°.

Trabajando en rumbos magnéticos, el navegante o especialista tiene la posibilidad de observar directamente el valor del desvío y su signo (este u oeste), y de esta forma determinar la posición en que deben ir colocados los imanes transversales y longitudinales para la compensación.

Pasos a seguir para la realización de la compensación del desvio

1. Aproamos el buque a Rm = 000° y con ayuda de los imanes transversales compensamos todo el desvío (Fig. 71).

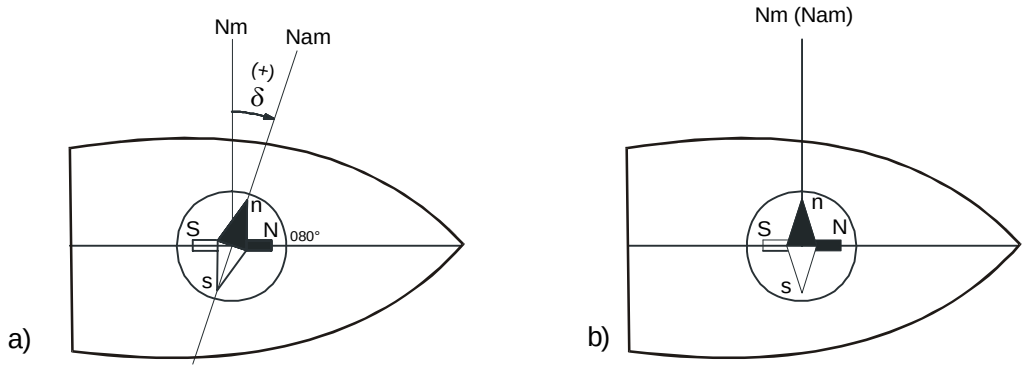


Rm = 000°
*** AC)** Ram = 350°; δ_N=+10°

Rm = 000°
****DC)** Ram = 000°; δ_N=0°

Fig. 71 Aproamiento del buque a Rm = 000°

2. Aproamos el buque a Rm = 090° y con los imanes longitudinales compensamos todo el desvío. (Fig. 72).



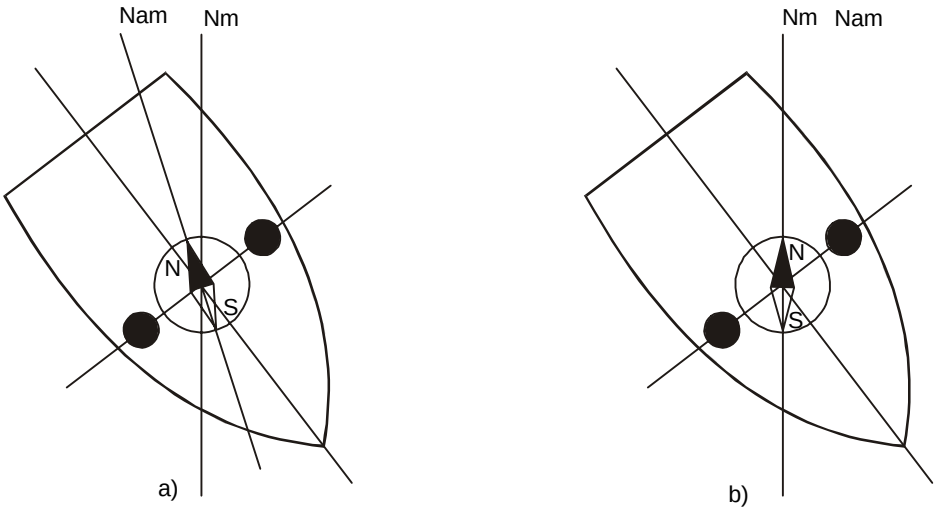
Rm=090°
AC) Ram=080°; δ_E=+10°

Rm=090°
DC) Ram=090°; δ_E=0°

Fig. 72 Aproamiento del buque a Rm = 090°

* **A.C** - Antes de la compensación.
**** D.C** - Después de la compensación.

3. Se aproa el buque al Rm = 135° y se compensa todo el desvío con las esferas o barras de hierro dulce (Fig. 73).

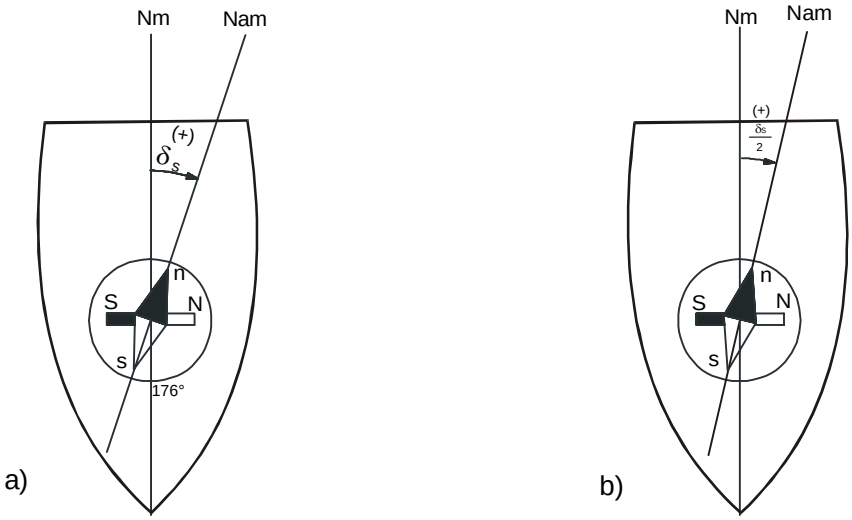


AC) Rm =135°
Ram =128°; δ_{SE} = -7°

DC) Rm =135°
Ram =135°; δ_{SE} = 0°

Fig. 73 Aproamiento del buque a Rm = 135°

4. Se aproa el buque a Rm = 180° y se compensa la mitad del desvío con los mismos imanes transversales (Fig. 74).

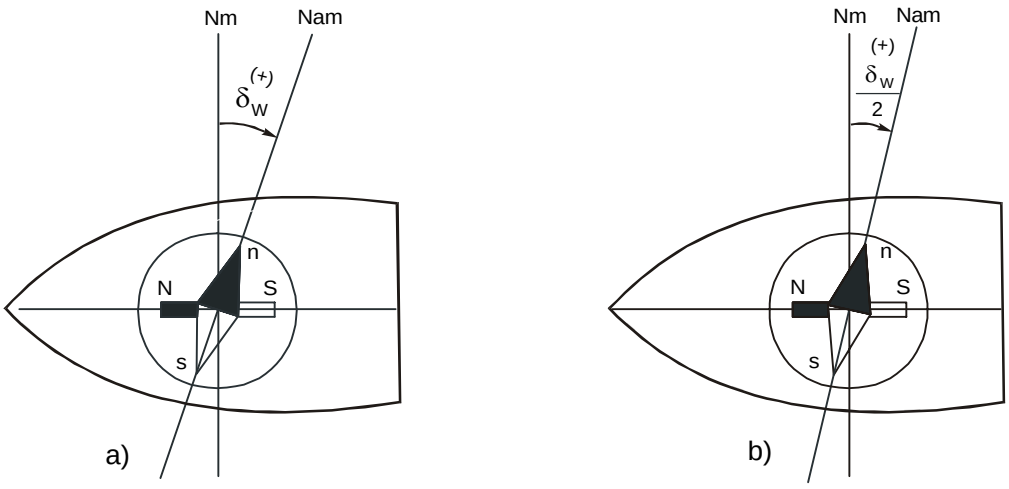


AC) Rm =180°
Ram =176°; δ_S=+4°

DC) Rm =180°
Ram =178°; $\frac{\delta_S}{2} = +2°$

Fig. 74 Aproamiento del buque a Rm = 180°

5. Aproamos el buque a Rm = 270° y con los imanes longitudinales compensamos la mitad del desvío (Fig. 75).

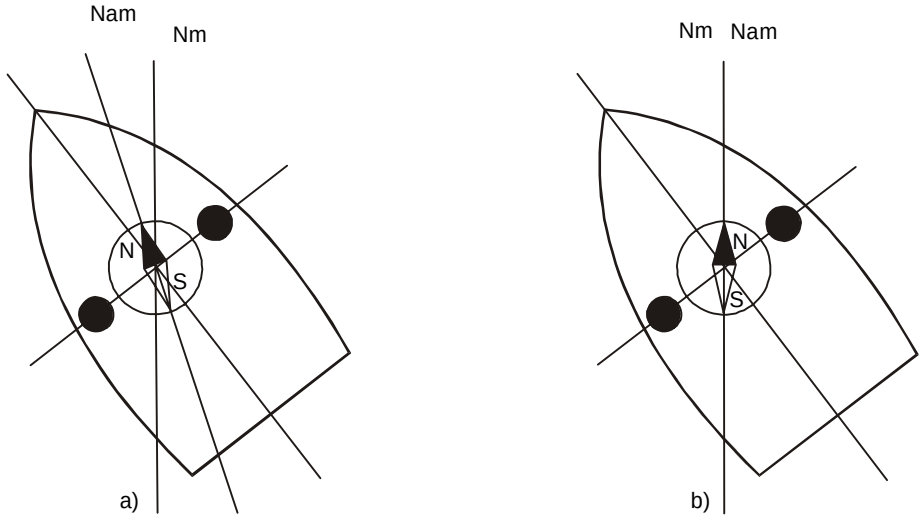


AC) Rm =270°
Ram =265°; δ_W= +5°

DC) Rm =270°
Ram =267,5°; $\frac{\delta_W}{2} = +2{,}5$

Fig. 75 Aproamiento del buque a Rm = 270°

6. Aproamos el buque a Rm = 315° y compensamos todo el desvío con las mismas esferas o barras de hierro dulce (Fig. 76).



AC) Rm = 315°
Ram = 318°; $\delta_{NW} = -3°$

DC) Rm =315°
Ram =315°; $\delta_{NW} = 0°$

Fig. 76 Aproamiento del buque a Rm = 315°

Después de realizada la compensación, se determina el desvío en los ocho rumbos por los métodos expuestos anteriormente, utilizando los mismos como argumento para el cálculo de los coeficientes del desvío y con estos calcular la tablilla de los desvíos residuales. Posteriormente se calcula el coeficiente de los hierros dulce (λ). Para esto es necesario medir el período de oscilación de la aguja magnética (compás) tanto en tierra como a bordo del buque en los rumbos principales (N, E, S y W), utilizando los desvíos residuales en estos mismos rumbos.

Para simplificar la determinación de dicho coeficiente se utiliza el formato para el cálculo de "λ" (FORMATO 5).

Nota: El cálculo del coeficiente de los hierros dulces del buque (λ) debe ser efectuado después de terminada la compensación del compas magnético (compensación del desvío cuadrantal, de escora y semicircular). Por el valor de este coeficiente se puede determinar si las condiciones magnéticas de trabajo del compás son faborables o no para su funcionamiento. Para que el equipo trabaje con efectividad, el coeficiente de los hierros dulces (λ), debe tener los siguientes valores:

Compás magistral ..... $\lambda = 0.8 - 0.95$
Compás de gobierno..... $\lambda = 0.6 - 0.8$
Compás de respeto..... $\lambda \geq 0.3°$

3.17 Compensación del desvío cuadrantal

El desvío cuadrantal se produce por las fuerzas D'λH y E'λH originadas por los hierros dulces del buque (ver capitulo VII, 2da Parte Desvío del Compás Magnético).

En la actualidad para la compensación del desvío cuadrantal se utilizan los siguientes tipos de correctores:

- Barras longitudinales de sección transversal circular.

- Barras longitudinales de sección transversal rectangular.

- Barras transversales de sección transversal rectangular.

- Esferas

Las barras en general tienen un menor coeficiente de compensación en comparación con las esferas, pero hacen menos voluminoso al compás magnético y más cómodo en su operación, (toma de marcaciones, mantenimiento, etc).

Las barras poseen la ventaja de que no produce desvío de escora. Este tipo de corrector se utiliza ampliamente en las flotas de la Federación Rusa como en los compases KMO - T (puede utilizar hasta dos pares de barras para aumentar el valor del coeficiente D si es necesario), compás 145 - M y otras.

Las esferas por el contrario tienen un mayor coeficiente del desvío cuadrantal que las barras. Su desventaja es que lo hace más voluminoso por la longitud de sus soportes y ademas estas crean desvío de escora. Este tipo de correctores son ampliamente utilizados por el resto de las flotas marítimas del mundo.

Para la compensación del desvío cuadrantal (determinación del coeficiente D) se emplean tablas y gráficos que vienen anexos sugun el tipo de compás.

La figura 77 representa la corrección cuadrantal aproximada disponible para diferentes tamaños, en varias posiciones de las esferas en sus soportes, y compases con diferentes momentos magnéticos. Esta corrección cuadrantal se aplica si son usadas como correctores D, E. La corrección cuadrantal de las esferas es debido en parte a la inducción del campo magnético terrestre y parcialmente a la inducción de la aguja del compás. Debido a que la inducción de la aguja no cambia al variar la latitud

magnética, pero si lo hace con la inducción del campo magnético terrestre, por lo que, la corrección de las esferas no es constante para todas las latitudes magnéticas. La disminución en el porcentaje de la inducción del campo terrestre mejorará la constancia de la corrección en todas las latitudes magnéticas. Tal disminución en el porcentaje de inducción de la aguja puede obtenerse:

1. Utilizando compases de bajo momento magnético.

2. Empleando correctores de forma esferoidal, colocado con su eje de posición.

3. Utilizando esferas mas grandes alejadas del compás.

En el caso de las barras, si éstas se emplean orientadas longitudinalmente para compensar el desvío cuadrantal, entonces se deben utilizar barras transversales para compensar el desvío de inducción.

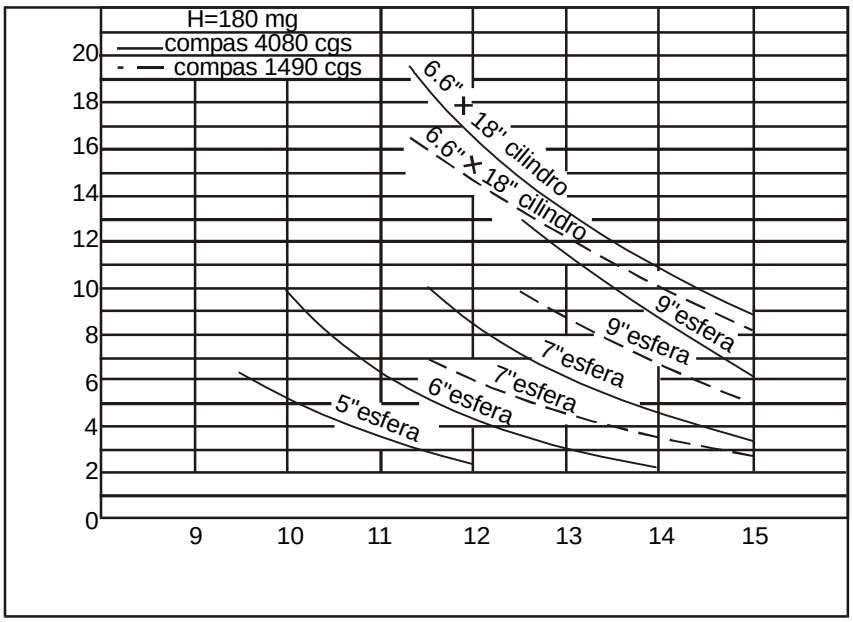


Fig. 77 Curva para la compensación del desvio cuadrantal

Para calcular el coeficiente del desvío cuadrantal (D) se emplea la siguiente expresión:

$$D = 0{,}25\ (Mam_{ES} + Mam_{NW} - Mam_{NE} - Mam_{SW}) \qquad (48)$$

donde:

Mam_{NE}, Mam_{ES}, Mam_{SW} y Mam_{NW} son las marcaciones agujas magnéticas tomadas a una enfilación en los aproamientos colaterales (NE, SE, SW, NW).

Para que el desvío cuadrantal esté compensado debe cumplirse que:

$$D' = D_0 + D_1 = 0$$

donde: D_o - Coeficiente confeccionado por la acción de los hierros dulces del buque.

D_1 - Coeficiente debido a los correctores del desvío cuadrantal.

D' - Coeficiente producido por la influencia conjunta de los hierros del buque y los correctores del desvío cuadrantal.

Por regla general el coeficiente de los hierros del buque (D_o) tiene signo positivo y el coeficiente de los correctores (D_1) que se utilizan para corregir el desvío cuadrantal tiene signo negativo. Por lo tanto el coeficiente resultante (D') puede tener signo positivo o negativo.

Si durante el proceso de cálculo del coeficiente resultante (D') este tiene signo positivo, esto significa que la influencia de los hierros del buque es mayor y por lo tanto es necesario acercar las esferas o utilizar otras de mayores dimensiones, esto último es valido para las barras.
En el caso de que D' tenga signo negativo, sucede lo contrario, siendo necesario alejar las esferas o sustituirlas por otras mas pequeñas.

3.18 Métodos para determinar la longitud de la barra Flinders

Si el buque durante la navegación cambia mucho de posición de posición geográfica, se hace necesario emplear la barra Flinders para ajustar la compensación que resulta inexacta. Los desvíos que se anulan con los imanes longitudinales, deben ser corregido en parte con la barra y esto puede lograrse mediante cálculos o de forma aproximada.

Métodos utilizados para instalar la barra Flinders.

1. Habiendo obtenido el desvío con suficiente exactitud en dos latitudes magnéticas diferentes, la variación de este, si existe, puede justificadamente ser atribuido a un ajuste incorrecto de la barra Flinders. Los desvíos este - oeste y norte - sur son los que están expuestos a la mayor variación debido a este ajuste incorrecto. Si no hay cambio en estos desvíos, el ajuste de la barra Flinders probablemente ha sido correcta.

Una variación en el desvío este - oeste ($\delta_{E/W}$) indica una distribución asimétrica de los hierros dulce verticales hacia proa o popa del compás, lo que requiere ser corregida por la barra Flinders, situándola a proa o popa del compás. Un cambio en el desvío norte - sur ($\delta_{N/S}$) demuestra una distribución asimétrica de los hierros verticales a estribor o babor del compás, lo cual requiere su corrección situando la barra Flinders a estribor o babor. Este caso casi nunca se presenta, pero puede ser corregido.

Para aplicar este método es necesario determinar los desvíos en el aproamiento magnético este/oeste en ambas latitudes, calculando el coeficiente de los hierros dulces correctores c por la fórmula:

$$c = \frac{H_1 B'_1 - H_2 B'_2}{Z_1 - Z_2} \qquad (49)$$

λ - Coeficiente de los hierros dulces del buque (coeficiente de blindaje)

Para los compases magistrales λ = 0,8 - 0,95

Para los compases de gobierno λ = 0,6 - 0,8

H_1 y Z_1 - Componente horizontal y vertical del campo magnético terrestre donde se realiza la compensación inicial del compás magnético.

H_2 y Z_2 - Componentes horizontal y vertical del campo magnético terrestre donde se realiza el calculo de la longitud de la barra Flinders.

* B_1 - Coeficiente del desvío semicircular en el lugar donde se realizó inicialmente la compensación.

* B_2 - Coeficiente del desvío semicircular en el lugar donde se realiza el calculo de la barra Flinders.

La constante c representa la masa resultante de la barra vertical de hierro en el buque la cual requiere la corrección de la barra Flinders. Si existen trozos de barra Flinders en el momento del cálculo, se debe recordar que ya está corregida un aparte del c en el buque, el cual debe ser sumado a la parte no corregida de esta constante, calculada por la fórmula 49. Con el valor total de c se entra en la curva (Figura 78) y se determina la cantidad necesaria de la barra Flinders. Si c es negativa, la barra Flinders se coloca a proa de la bitácora y si es positiva a popa. Los trozos de barra Flinders deben ser continuos, colocando el trozo más largo en la parte superior del estuche. Los espacios vacios deben ser ocupados desde el fondo por los trozos de maderas de forma que complemente la longitud total de la barra correctora.

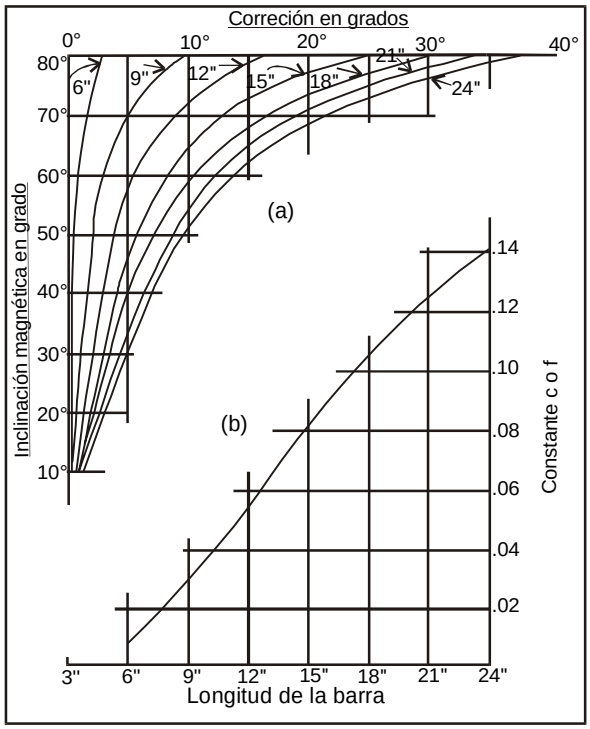


Fig. 78 Para el cálculo de la longitud de la barra Flinders

* B'_1 y B'_2 - madidas en radianes ($B'_1 = B° \text{ sen } \delta_1$; $B'_2 = B° \text{ sen}\delta_2$)

donde: B'_1 y B'_2 - Coeficientes aproximados del desvío semicircular.

Se debe observar que el desvío (δ) utilizado en esta fórmula son basados en los aproamientos magnéticos este/oeste en lugar de aproamientos agujas magnéticas, como en los coeficientes aproximados del desvío.

2. Si la cantidad exacta de corrección, requerida por la inducción vertical en el buque para un valor específico de inclinación magnética (I) es conocida, el gráfico (Fig. 78) indicará directamente la cantidad correcta de barra Flinders que debe ser colocarda en la parte superior del estuche. La cantidad exacta de corrección será conocida cuando una de las latitudes es el ecuador magnético y el desvío (δ) existente es despreciable. * Entonce el desvio (δ) en otra latitud, es la cantidad exacta a corregir por medio del gráfico - longitud de la barra (Fig.78).

3. Regla de Kelvín para perfeccionar la colocación de la barra Flinders. Este método plantea lo siguiente: Corrija el desvío observado en el rumbo este u oeste empleando los imanes longitudinales cuando el buque arriba a lugares de campo magnético vertical más debil y utilice la barra Flinders si este arriba a

lugares de campos magnéticos fuertes ya sea en el hemisferio norte o sur.

Despúes de determinar la cantidad correcta de barra debe ser insertada en la parte superior del estuche, y los imanes longitudinales deben ser reajustado para corregir el coeficiente del desvío residual B. De forma análoga las esferas deben ser reajustadas.

Rotación de la barra Flinders

La necesidad de rotar la barra Flinders es mucho menos frecuente que la rotación de las esferas. Del mismo modo, el dato necesario para rotar la barra Flinders no puede ser obtenido en una simple ajuste de latitud, como sucede con las esferas. El giro de la barra hacia una posición intermedia, se efectua, simplemente variando la barra en una dirección respecto a la línea proa - popa o respecto a la línea estribor - babor.

En el punto1(3.17) se explica que una variación del desvío este - oeste, con el cambio en latitud indica la necesidad de utilizar la barra a proa o a popa; y un cambio en el desvío norte o sur, al variar la latitud, indica la necesidad de colocar la barra Flinders a estribor o a babor del compás.

Si hay una variación en el coeficiente del desvío semicircular C en aproamiento magnéticos norte/sur, se realizara un analisis similar para determinar la cantidad de barra Flinders apropiada que deberá ser instalada a estribor o babor del compás, calculando la constante f por la expresión:

$$f = \lambda \frac{H_1 C'_1 - H_2 C'_2}{Z_1 - Z_2} \qquad (50)$$

λ - coeficiente de los hierros dulces del buque

Para los compases magistrales $\lambda = 0{,}8 - 0{,}95$

Para los compases de gobierno $\lambda = 0{,}6 - 0{,}8$

H_1 y Z_1 – Componente horizontal y vertical del campo del magnetismo terrestre donde se realizó inicialmente la compensación

H_2 y Z_2 – Componente horizontal y vertical del magnetismo terrestre donde se efectua el calculo de la longitud de la barra Flinders.

C'_1 – Coeficiente del desvío semicircular donde se realizó inicialmente la compensación.

C'_2 – Coeficiente del desvio semicircular donde se realiza el cálculo de la barra Flinders.

C'_1 y C'_2 – en radianes ($C'_1 = C°$ sen δ_1, $C'_2 = C°$ sen δ_2)

donde $C°_1$ y $C°_2$ – Coeficientes aproximados del desvio semicircular.

Cualquier valor de la constante f (Fig.74) muestra la necesidad de instalar la barra Flinders en el plano transversal del compás, justamente el valor de la constante c indica la necesidad de ajustar esta barra a proa del compás.

La curva de la constante f (Fig. 78.) es usada para la determinación de la longitud de la barra Flinders. Si f es negativa , la barra se coloca a estribor de la bitácora.

Si ambos coeficientes existen en un buque, la posición angular de una barra Flinders para corregir el efecto resultante de la inducción vertical puede ser hallada por la formula:

$$\tan\alpha = \frac{f}{c} \qquad ó \qquad \alpha = \arctan\frac{f}{c}$$

donde:

α - es el ángulo de giro de la barra Flinder desde el eje longitudinal del buque. Si c y f son negativos, la barra se rotará en sentido de las manesillas del reloj desde proa (Fig. 79a); si c es negativo y f es positivo, la barra será rotada en sentido contrario a las agujas del reloj desde popa (Fig. 79b).

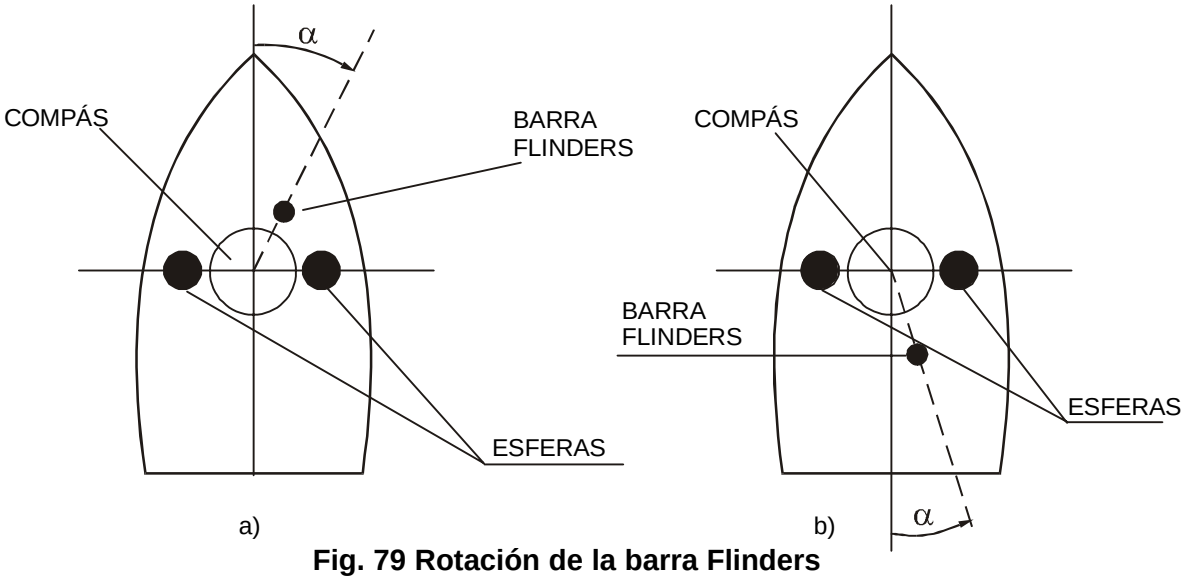


Fig. 79 Rotación de la barra Flinders

Después de determinar el ángulo de giro de la barra Flinders respecto a la línea proa - popa, se calcula la cantidad total de dicha barra, a fin de de corregir el efecto de la inducción vertical resultante por la expresión:

$$m = \sqrt{c^2 + f^2} \qquad (52)$$

La constante m entonces es usada en la curva de la constante c ó f en la fig 78 para determinar la cantidad total de la barra Flinder necesaria que posteriormente es rotada en el ángulo α.

3.19 Métodos prácticos y simplificados para colocar la barra Flinders

a) Con el rumbo de grada.

b) Al pasar el ecuador magnético.

a) Con el rumbo de grada

Concepto de rumbo de grada: Es aquel en que el efecto del magnetismo permanente del buque es nulo, ocurriendo lo mismo con su rumbo inverso (Fig. 80).

Al rumbo de Grada + 90°, el desvío debido a esta clase de magnetismo es máximo.
Se le conoce por este nombre porque durante su construcción y dependiendo de su orientación, es cuando adquiere por primera vez una imantación de tipo permanente. Téngase en cuenta que cuando hayan transcurrido algunos años, lo más probable es que el nuevo rumbo de grada no guarda ninguna semejanza con el primero.

Su valor viene dado aproximadamente por tan $Rm_{GRA.}$= C/B pues se considera que la influencia del magnetismo inducido es despreciable.

Del análisis de esta fórmula se deduce que:

El valor del desvío máximo al Rm_{RGA} ± 90° viene dado por:

$$\delta = \sqrt{B^2 + C^2}$$

+ B ... Proa en los astilleros a rumbos del S

- B ... Proa en los astilleros a rumbos del N

+ C ... Proa en los astilleros a rumbos del E

- C ... Proa en los astilleros a rumbos del W.

El rumbo de grada puede ser calculado por las tablas que se encuentra en la tercera parte del manual" Desvio del Compás Magnético" (Academia Naval" Granma" 1988).

Ejemplo: Siendo B = +4° y C = -2,5° calcular:

1) el rumbo de grada.

2) Los rumbos de máximo desvío ocasionado por b y C.

3) El valor de este desvío.

Rumbo de grada (δ = 0°)

Rumbo de desvío máximo ($\delta_{max.}$)

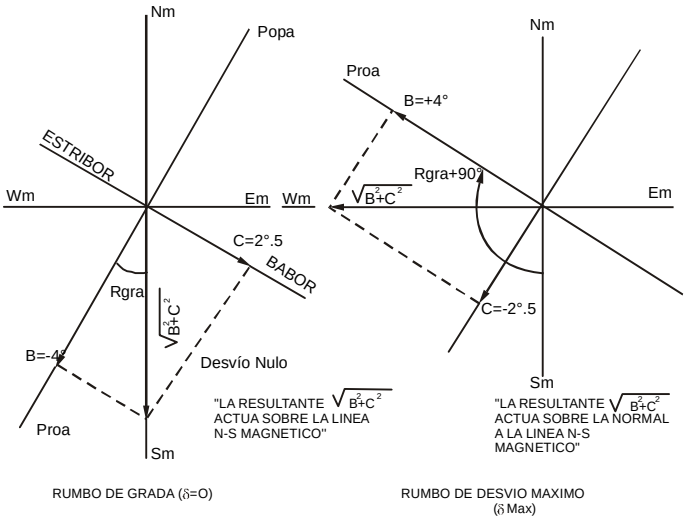


Fig. 80 Determinación gráfica del rumbo de grada

1) $\tan Rm_{GRA} = \frac{-2,5}{+4,0} = 0,625$

$$Rm_{GRA} = S32°W = 212°$$

El efecto del magnetismo permanente será también nulo al N 32° E = 032°

2) Rm_{GRA}+ 90 = 302° Rm_{GRA} = 122°

3) $\delta = \sqrt{B^2 + C^2} = \sqrt{16 + 6,25} = \sqrt{22,25} = \pm 4,7°$

Ejecución práctica de la colocación de la barra Flinders con el rumbo de grada

1) Se quitan los imanes longitudinales y transversales.

2) Se pone proa al Rm de grada.

3) Todo el desvío que aparezca en este rumbo se compensa todo el desvío con los imanes longitudinales.

4) Se colocan los imanes transversales en su posición anterior.

Al pasar el ecuador magnético

1) Al cortar el Ecuador Magnético se pone proa al E_m u W_m.

2) Se compensa todo el desvío con los imanes longitudinales.

3) Cuando se está en otro lugar de una cierta latitud se pone proa a cualquiera de los rumbos anteriores.

4) Se compensa todo el desvío con la barra Flinders, sirviendo la colocación para todas las latitudes.

Este procedimiento es muy cómodo y de bastante exactitud.

Previamente se quitan los trozos de barra Flinders que pudieran estar instalados.

Ejemplo: Datos: Rm = 090°; V = +5°; Δg = -1
Ram = 095

Solución:

Rag = Rm+v-Δ
= 90°+(+5°) - (-1°)
Rag = 096°

Se aproa el buque por el girocompás (Rag=096°), el cual corresponde al rumbo magnético dado (Rm=090°). El compás magnético indica Ram=095°, por lo tanto el desvio será -5° (δ=Rm-Ram). Este desvio se compensa con la barra Flinders (Punto B.)

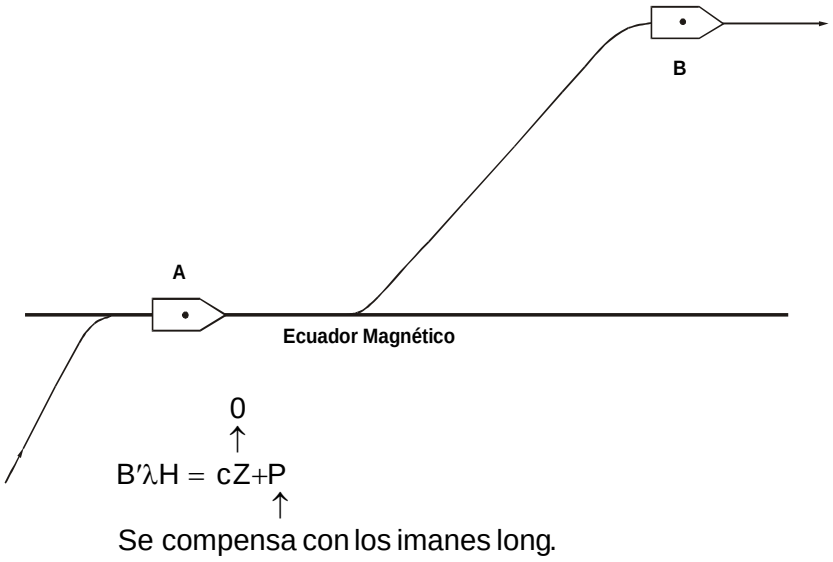


Fig. 81 Colocación de la barra Flinders (Punto B)

B'λH - Fuerza magnética del buque longitudinal que debe ser compensada.

cZ - Fuerza magnética debido a los hierros dulces (Se compensa en el punto B con la barra (Flinders).

P- Fuerza magnética debido a los hierros duros (Se compensa en el punto A con los imanes (longitudinales)

Z - Componente horizontal del campo magnético terrestre.

3.20 Cálculo de la tablilla de los desvíos residuales

Ninguno de los métodos utilizados en la práctica de compensación del desvío del compás magnético nos da resultados exactos, absoluto. Esto significa que incluso después de una compensación esmerada, inevitablemente en el compás se observará un desvío residual. Es cierto que su valor generalmente es pequeño y no sobrepasa de 2 - 4°. No obstante es necesario tenerlo en cuenta al determinar la dirección (rumbo) del buque así como durante la determinación de su posición, mediante la toma de marcaciones con ayuda del compás.

El cálculo de la tablilla de los desvíos residuales se puede realizar por los siguientes métodos:

a) Por observación (cada 15°-24 rumbos o cada 10°- 36 rumbos)

Este método no es recomendable, ya que es necesario realizar las observaciones en 24 ó 36 rumbos, lo que conlleva a la pérdida de tiempo y motorrecursos, permitiendo a su vez la introducción de más errores personales en comparación con los introducidos en las observaciones realizadas en 8 rumbos. Por esta razón el desvío debe ser determinado en los 4 rumbos principales y en los 4 rumbos colaterales, calculando la tablilla de desvío en base a estas observaciones.

b) Por la fórmula aproximada del desvío

$$\delta = A + B\,\mathrm{sen}Ram + C\cos Ram + D\,\mathrm{sen}2Ram + E\cos 2Ram$$

$$A = \frac{\delta_N + \delta_{NE} + \delta_E + \delta_{SE} + \delta_S + \delta_{SW} + \delta_W + \delta_{NW}}{8} \qquad (53)$$

$$B = \frac{\frac{\delta_E - \delta_W}{2} + \frac{\delta_{NE} - \delta_{SW}}{2} S_4 + \frac{\delta_{SE} - \delta_{NW}}{2} S_4}{2} \qquad (54)$$

$$C = \frac{\frac{\delta_N - \delta_S}{2} + \frac{\delta_{NE} - \delta_{SW}}{2} S_4 + \frac{\delta_{SE} - \delta_{NW}}{2} (-S_4)}{2} \qquad (55)$$

$$D = \frac{\frac{\delta_{NE} + \delta_{SW}}{2} - \frac{\delta_{SE} + \delta_{NW}}{2}}{2} \qquad (56)$$

$$E = \frac{\frac{\delta_N + \delta_S}{2} - \frac{\delta_E + \delta_W}{2}}{2} \qquad (57)$$

Nota: S_4= Sen 45°

En este método solo es necesario determinar el desvío en los ocho rumbos (N, NE, E, SE, S, SW, W, y NW), esto se hace con el objetivo de lograr una mayor exactitud en el cálculo de la tablilla del desvío, eliminando la posibilidad de introducir errores personales que podrían surgir si éstos se determinaran en 24 ó 36 rumbos (primer método).

El cálculo de la tablilla de desvío por la fórmula es muy trabajoso, ya que para calcular los coeficientes del desvío hay que resolver las cinco ecuaciones. Con estos coeficientes si se desea calcular la tablilla de desvío cada 10° y 15° sería necesario resolver la fórmula de desvío 24 ó 36 veces respectivamente.

c) Cálculo de la tablilla de los desvíos residuales por esquemas especiales (FORMATOS 3 y 4).

1. Cálculo de los coeficientes aproximados del desvío A, B, C, D y E.

Para mayor comodidad y rapidez, el cálculo de los coeficientes se realiza por un esquema especial (**FORMATO 3)**, donde, por las fórmulas deducidas en el capítulo III de la primera parte del Cuaderno "Desvío del Compás Magnético" se calculan los coeficientes aproximados del desvío. En las fórmulas puede apreciarse que algunos de estos coeficientes (A, D y E) se calculan por la semisuma de los desvíos observados en rumbos agujas mutuamente opuestos y los otros coeficientes (B y C) se calculan por la semidiferencia determinada en estos mismos rumbos. Por eso el **FORMATO 3** está construido de forma tal que no es necesario realizar repetidamente el cálculo de las mismas magnitudes que entran en el cálculo de los diferentes coeficientes.

Por ejemplo, la semisuma de los desvíos $\frac{\delta_N - \delta_S}{2}$ se calcula solo una vez, y su valor está en el cálculo de los coeficientes A y B, etc. El formato consta de columnas, en las cuales se anotan el resultado de los cálculos.

Tabla 3.7

Ram	δ	Ram	δ
N-000°	+0,9°	S-180°	+0,4°
NE-045°	-2,3°	SW-225°	-3,0°
E-090°	+0,7°	W-270°	-0,3°
SE-135°	+3,7°	NW-315°	+3,4°

Explicación del formato 3 para el cálculo de los coeficientes del desvio

1**.** En las **columnas 1 y 2** se anotan los desvíos con sus signos observados en los 8 rumbos agujas magnéticos (cuatro principales y cuatro colaterales) con una exactitud 0.1°. Para su mejor comprensión se muestra el **FORMATO 3** con un ejemplo (columnas llenas). Supongamos que se ha de terminado el desvío en los 8 rumbos aguja magnética, y que han sido tabulados como se indica arriba en la tabla 6.

2**.** Anotemos en las **columnas 1 y 2** los desvíos con sus signos. Comenzando en la columna 3 hasta la columna 10, todos los cálculos se realizan con una exactitud de 0.01° lo que facilita considerablemente el control de los resultados.

3**.** Calculemos y anotemos en la columna 3 con los signos resultantes la semisuma de los desvíos que aparecen en las columnas 1 y 2**,** después anotemos en la columna 4 las semidiferencias de estos mismos desvíos. Antes de pasar al cálculo de la columna 5 es necesario efectuar el control de los cálculos realizados, para lo cual mentalmente se suman los valores de las columnas 3 y 4. Si esta suma se efectúa sin errores, entonces como resultado de esta suma algebraica, debemos obtener el valor del desvío anotado en la columna 1:

columna 3 + columna 4 = columna 1

(El control puede realizarse de otra forma). Si se toma la diferencia de los valores de las columnas 3 y 4, en este caso debemos obtener los datos de la columna 2, es decir:

columna 3 - columna 4 = columna 2

4**.** Solo después del control, se puede pasar al cálculo de la columna 5. Los datos de la columna *5* se obtienen, multiplicando la semidiferencia de los desvíos en los rumbos opuestos por el factor indicado en la columna K. La columna 5 está destinada para el cálculo del coeficiente B del desvío semicircular.

De la fórmula (54) se puede observar que, la semidiferencia de los desvíos en los rumbos N y S no forman parte en los cálculos de este coeficiente, por eso se puede considerar que los factores para la semidiferencia de los desvíos en estos rumbos son iguales a cero, por lo que la primera fila de la columna K es igual a cero. De ahí que, el producto de la semidiferencia de los desvíos por cero será igual a cero. Esto debe ser anotado en la fila superior de la columna 5.

Continuando con el análisis de esta fórmula vemos que, los factores de la semidiferencia de los desvíos en los rumbos NE, SW, SE, y NW son Sen 45° y los factores de esta semidiferencia en los rumbos este y oeste son iguales a la unidad. Estos factores están situados en la segunda y cuarta fila de la columna K. El producto de la semidiferencia por su factor se anota en la columna *5* con su signo.
En la quinta fila frente al signo + se anota la suma de todos los valores positivos de la columna 5, en la sexta fila, frente al signo -, la suma de todos los valores negativos.

En la séptima fila, frente a la sumatoria S se anota la suma algebraica de la quinta y sexta fila con su signo. En la octava fila el valor de la semisuma de la séptima fila. Por tanto el cálculo del coeficiente B, en la columna 5, se realiza en correspondencia con la fórmula:

$$B = \frac{\frac{\delta_E - \delta_W}{2} + \frac{\delta_{NE} - \delta_{SW}}{2} S_4 + \frac{\delta_{SE} - \delta_{NW}}{2} S_4}{2}$$

Los valores de la columna 6 se obtienen como resultado del producto de la semidiferencia de los desvíos en los rumbos opuestos por el factor indicado en la columna K. La *c*olumna 6 está destinada para el cálculo del coeficiente C del desvío semicircular. Como se observa de la fórmula (55) la semidiferencia de los desvíos en los rumbos agujas E y W no forman parte del cálculo de este coeficiente, por eso, en la tercera fila de la columna K el factor es igual a cero. Por lo demás ,el cálculo del coeficiente C se efectúa de forma análoga al del coeficiente B, realizándose en correspondencia con la fórmula (55).

$$C = \frac{\frac{\delta_N - \delta_S}{2} + \frac{\delta_{NE} - \delta_{SW}}{2} S_4 + \frac{\delta_{SE} - \delta_{NW}}{2} (-S_4)}{2}$$

En general, **lo mas cómodo es calcular las primeras cuatro filas de las columnas 5 y 6 simultáneamente,** ya que los productos anotados, en la segunda y cuarta filas de estas columnas son iguales en magnitud y signo (excluyendo la cuarta fila de la columna 6). Llenando estas columnas simultáneamente se excluye la posibilidad de introducir errores en los cálculos de las mismas.

La semisuma de los desvíos, en los rumbos opuestos anotados en la columna 3 están destinados para calcular los coeficientes A, E y D. En la **columna 7** se escribe las dos filas superiores y en la **columna 8** las dos filas inferiores de esa misma columna. La primera fila de la columna 7 representa la suma de los coeficientes $A + E = \frac{\delta_N + \delta_S}{2}$ y la segunda fila $A + D = \frac{\delta_{NE} + \delta_{SW}}{2}$.

La primera fila de la **columna 8** representa la diferencia de los coeficientes $A - E = \frac{\delta_E + \delta_W}{2}$ y la segunda fila $A - D = \frac{\delta_{SE} + \delta_{NW}}{2}$.

La **columna 9** es el resultado de la semisuma de los valores de las **columnas 7 y 8**.

Esta semisuma, en la primera fila nos da el **coeficiente A,** determinado por los desvíos observados en los r**umbos agujas magnéticos principales** y en la segunda fila, este **mismo coeficiente** pero calculado por los desvíos observados en los rumbos agujas magnéticos colaterales.

La tercera fila de la **columna 9**, impreso con el símbolo S, se obtiene sumando algebráicamente la primera y segunda fila, obteniéndose el doble del valor del coeficiente A. En la cuarta y última fila donde aparece $\frac{1}{2}$S se anota la semisuma del valor de la tercera fila, ésta corresponde al valor del **coeficiente A**.

Como se puede observar, para facilitar el cálculo de los otros coeficientes, el desvío se agrupa en rumbos directos y sus inversos, por eso la fórmula (13) toma la forma:

$$A = \frac{\dfrac{\dfrac{\delta_N+\delta_S}{2}+\dfrac{\delta_E+\delta_W}{2}}{2} + \dfrac{\dfrac{\delta_{NE}+\delta_{SW}}{2}+\dfrac{\delta_{SE}+\delta_{NW}}{2}}{2}}{2} \qquad (53a)$$

En la **columna 10** se anota el resultado de la semidiferencia de los valores situados en las columnas 7 y 8. La semidiferencia en la primera fila representa la magnitud del coeficiente E y la semidiferencia en la segunda fila el coeficiente D.

Después de calcular la columna 10 se procede a efectuar **el control** de los cálculos, para esto es necesario **sumar** por fila los valores de las columnas 9 y 10. Si no hay errores en las operaciones, entonces se debe obtener los valores de la columna 7.

Solo después de estos controles se puede considerar que los coeficientes A, D y E han sido calculados correctamente. El cálculo de los coeficientes D y E fue efectuado en base a las fórmulas:

$$D = \frac{\dfrac{\delta_{NE}+\delta_{SW}}{2} - \dfrac{\delta_{SE}+\delta_{NW}}{2}}{2} \qquad E = \frac{\dfrac{\delta_N+\delta_S}{2} - \dfrac{\delta_E+\delta_W}{2}}{2}$$

Los valores de los coeficientes del desvío da una completa representación sobre las condiciones magnéticas de trabajo de un compás dado. Por estos valores se puede juzgar sobre la calidad del trabajo efectuado, durante la compensación y determinación del desvío.

FORMATO 3 CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES POR LOS DESVIOS DETERMINADOS EN LOS 8 RUMBOS.

	1		2	3	4		5		6	7	8	9	10	
Ram	δ	**Ram**	δ	**½(1+2)**	**½(1-2)**	**K**	**K4**	**K**	**K4**	**Mitad superior columna 3**	**Mitad inferior columna 3**	**½(7+8)**	**½(7-8)**	
N	+0,9°	**S**	+0,4°	+0,65°	+0,25°	0	0.00°	+0,4°	+0,65°	+0,25°	0	0.00°	+0,23°	**=E**
NE	-2,3°	**SW**	-3,0°	-2,65°	+3,35	S_{45}	+0,25°	-3,0°	-2,65°	+3,35	S_{45}	+0,25°	-3.55°	**=D**
E	0,7°	**W**	-0,3°	+0,20°	+0,50°	1	+0,50°	-0,3°	+0,20°	+0,50°	1	+0,50°		
SE	+3,7°	**NW**	+3,4°	+3,55°	+0,15°	S_{45}	+0,11°	+3,4°	+3,55°	+0,15°	S_{45}	+0,11°	=A	
						+	0,86°	+	0,50°					
						-	0,00°	-	0,11°					
					B=	**1/2∑**	+0,43°	**1/2∑**	+0,20°	**=C**				

2. Cálculo de la tablilla de desvío

Después de calcular los coeficientes del desvío por el formato explicado anteriormente, se procede a realizar el cálculo de la tablilla de desvío por la fórmula :

$$\delta = A + B\text{sen}Ram + C\cos Ram + D\text{sen}2Ram + E\cos 2Ram.$$

En este caso todos los elementos que forman parte de la fórmula (9) son conocidos; los coeficientes A, B, C, D y E así como el valor del Ram que es dado. Aunque se puede calcular la tablilla de desvío para cualquier número de rumbos, en la práctica se limita el cálculo de ésta solo para 24 Ram equidistantes, comenzando desde 0° variando el mismo cada 15°; **ya que el desvío por regla general, se calcula después de realizado los trabajos de compensación,** lo que hace que éste último tenga valores absolutos pequeños, es suficiente efectuar el cómputo de dicha tablilla para la cantidad de rumbos antes mencionado (24). Esto hace que el desvío en los rumbos intermedios sea fácil hallarlo por medio de una simple interpolación visual sin tener que recurrir a otros cálculos complementarios. No obstante a lo expuesto, para mejorar los resultados en los trabajos relacionado con el desvío del compás magnético, la tablilla de los desvíos residuales se computará para 36 rumbos, o sea, para cada 10°.
El cálculo de la tablilla de desvío se efectúa por el **FORMATO 4.**

Representemos la fórmula del desvío (9) en la forma :

$$\delta = \underbrace{D\text{Sen}2Ram + E\cos 2Ram}_{1} + \underbrace{A}_{2} + \underbrace{B\text{Sen}Ram + C\cos Ram}_{3}.$$

La parte 1 de esta fórmula constituye el **desvío cuadrantal resultante**, que es debido a las fuerzas magnéticas D'λH y E'λH. Como es conocido este desvío **tiene el mismo valor y signo en los rumbos y sus inversos.** Por consiguiente, el cálculo de los términos de la primera parte de la fórmula, Dsen2Ram y Ecos2Ram, así como su suma, es suficiente realizarlo para los rumbos del primer semicírculo (0°-180°). Para el segundo semicírculo (180°-360°) que son los inversos de los primeros, el resultado será el mismo. Esto puede demostrarse analíticamente, de trigonometría sabemos que:

$$\text{Sen}2Ram_2 = \text{Sen}2(Ram_1 + 180°) = \text{Sen}2Ram_1$$
$$\cos 2Ram_2 = \cos 2(Ram_1 + 180°) = \cos 2Ram_1$$

Por tanto los senos y cosenos del duplo de los rumbos y sus inversos son iguales. Ejemplo:

Ram = 60°
2Ram=120°

el rumbo aguja magnética inverso ($RamI_1$) será:

Ram+180°= 240°, siendo el duplo del rumbo inverso igual a:
$2(Ram_1 + 180°) = 480°$.

480°-360°=120° lo que comprueba lo planteado.

La parte 2 de esta fórmula es el **desvío constante**, es decir, **mantiene su valor y signo en todos los rumbos del buque.** Por consiguiente, el coeficiente A debe formar parte de cada desvío y su valor debe sumarse algebráicamente con la parte 1 en todos los rumbos (0°-360°).

La parte 3 representa el **desvío semicircular** (debido a las fuerzas B'λH y C'λH). Este desvío tiene la siguiente característica, en los rumbos aguja magnético y sus inversos l**os desvíos son iguales en magnitud pero de signos opuestos.** Por esta razón, el cálculo de los términos de la parte 3, BsenRam, CcosRam y su suma será suficiente realizarlo también sólo para los rumbos del primer semicírculo (0°-180°). Para los rumbos del segundo semicírculo (180°-360°), los cuales son los inversos de los primeros, los términos de la parte 3 y su suma tendrán los mismos valores pero con signos opuestos.

En efecto :

$$\text{senRam}_2 = \text{sen}(\text{Ram}_1+180°) = -\ \text{senRam}$$
$$\text{cosRam}_2 = \cos(\text{Ram}_1+180°) = -\ \cos\text{Ram}$$

es decir, los senos y los cosenos de los rumbos y sus inversos son iguales en magnitud, pero de signos opuestos.
En base a estas relaciones trigonométricas está confeccionado el **FORMATO 4**. Los términos de la fórmula del desvío (9) están distribuidos por las columnas de este formato, como se muestra a continuación:

$$\delta = \underbrace{\overbrace{\text{Dsen2Ram}}^{1} + \overbrace{\text{Ecos2Ram}}^{2}}_{3} + \underbrace{\underbrace{A \pm \overbrace{\text{BsenRam}}^{5}}_{4} + \overbrace{\text{CcosRam}}^{6}}_{7}$$

Para obtener el desvío en los Ram del primer semicírculo, se toma 4+7 y para la obtención de los desvíos en los Ram del segundo semicírculo se toma 4-7.

Explicación del formato 4

El cálculo de la tablilla de desvío se realiza en el siguiente orden:

Antes que todo en la fila superior de las columnas del **FORMATO 4** se anota el valor de los coeficientes con sus signos, calculados por el **FORMATO 3,** con una aproximación de 0,1°. Después, para facilitar los cálculos posteriores se colocan los signos + ó - en cada fila de las columnas 1, 2, 5 y 6, los cuales se obtienen como resultado del producto del coeficiente del desvío por el factor correspondiente, es decir, se pone el producto de los signos, partiendo de los signos de los factores.

El establecimiento previo de los signos acelera el proceso de cálculo de la tablilla y facilita la realización del control, siendo esto último extraordinariamente importante. Después de esto, sin prestar atención a la determinación de los signos, se determina el primer término de la columna 1 del formato: -DSen2Ram.

Los factores que representan los senos del duplo de los rumbos aguja magnético, cada 10°, están indicados frente a la **columna 1**. En la primera fila se calcula el desvío para los Ram 0° y 180°. La fuerza D'λH en estos rumbos no produce desvío, por eso en la primera fila de la columna 1 es igual a cero, este valor también se puede obtener analíticamente: sen2x0°= 0; Sen2x180°= Sen360°= 0.

Para otros Ram los factores serán: Ram= 15°, sen2Ram= sen30°= S_{30}; para Ram= 30, sen60°= S_{60} etc. Los productos elaborados Dsen2Ram= DS_{30}; DS_{60} etc., se toman de la tabla I_a-I_d (Producto de arcos por los senos de los ángulos múltiplos - LOC). En esta tabla se entra con **dos argumentos**: primer argumento, **valor de los coeficientes del desvío**, impreso en la parte superior de la columna 1,

2, 5 y 6, en el caso dado el valor del coeficiente D en grados, es el arco a; el **segundo argumento**, corresponde al seno del ángulo (factor), S_{10}, S_{20}, S_{30}, etc). En el FORMATO 4 todos los factores están expresados a través de los senos de los arcos, menores de 90°, por ejemplo para Ram = 150°, sen2Ram= sen300°= – sen60°= – S_{60}. Esto simplifica y acelera considerablemente los cálculos, ejemplo, para llenar las 18 filas de la **columna 1**, sólo es necesario tomar cuatro productos, DS_{20}, DS_{40}, DS_{60}, y DS_{80} ya que en las siguientes filas estos productos se repiten. Los productos de la columna Dsen2Ram, como ya es conocido se calcula para la primera mitad de la circunferencia o sea de 0° a 170° inclusive.

En la **columna 2** se calcula el segundo término de la fórmula, Ecos2Ram. Todos los factores de esta columna, también están expresados a través de los senos de los ángulos menores de 90°, ejemplo, para Ram = 60°, cos2Ram = cos120°= cos (90°+30°) = – sen30°= –S_{30}, o para Ram =170°, cos2Ram = cos340°= cos (270°+70°) = sen70°= S_{70}. Para llenar las filas de la **columna 2** es necesario tomar solamente cuatro productos Ecos2Ram; ES_{70}, ES_{50}, ES_{30} y ES_{10}.
En las filas de la **columna 3** se anota el resultado de la suma algebraica de las columnas 1 y 2. Cada fila de esta columna representa **la magnitud del desvío cuadrantal** para los Ram correspondientes.

En la **columna 4** se anota por filas la suma algebraica de la columna 3 y el coeficiente A. De esta forma, el resultado de cada fila de la columna 4 nos da la suma **del valor del desvío cuadrantal y el constante** para cada rumbo.

En la **columna 5** se efectúa el producto, BsenRam y en la **columna 6**, el producto CcosRam. Para calcular estos términos se procede de forma análoga como en el caso de las columnas 1 y 2.

En la **columna 7** se anota por fila la suma algebraica de los valores de las columnas 5 y 6, cada fila de esta columna representa el **valor del desvío semicircular** para el Ram correspondiente.

El desvío para los Ram del primer semicírculo (0°–180°) se halla, si por fila se suma algebráicamente los valores de las columnas 4 y 7. De esta forma, **el desvío para cualquier rumbo del primer semicírculo se expresa: desvío cuadrantal + desvío constante + desvío semicircular.** El desvío para cualquier rumbo del segundo semicírculo (180°-360°) se determina si por fila se resta algebráicamente del valor de la columna 4 el valor de la columna 7. Por tanto **el desvío para el segundo semicírculo será: desvío cuadrantal + desvío constante - desvío semicircular.**
La tablilla de desvío es uno de los documentos más importantes a bordo del buque para la navegación del mismo y como se indicó anteriormente, en el cálculo de esta tablilla no se pueden admitir errores que sobrepasen la exactitud del ploteo gráfico.

Debe estrictamente atenerse a la siguiente regla: La tablilla de desvío solamente puede utilizarse después de realizado el control de los cálculos.

Este control se realiza en el siguiente orden:

CONTROL 1. El doble del valor de la fila dada de la columna 7, debe ser igual a la diferencia de los desvíos para los rumbos y sus inversos.

Ejemplo:

Ejemplo fila 15	columna 4	8 (4+7)	9 (4+7)
	+3.5°	+3.7°	-3.3°

Explicación

Control 1a). El doble del valor de la fila 7 de la columna 7 es 2x0.5° = +1.0°. La diferencia de los desvíos para los rumbos y sus inversos en esta misma fila será:

$(\delta_1 - \delta_2) = (-1{,}9°) - (-2{,}9°) = +1{,}0°$

Otra forma de realizar el control

La suma algebraica de la fila dada de las columnas 8, (4+7) y 9, (4-7) debe ser igual al doble de la misma fila de la columna 4.

7ma fila	Columna 7	Ram	δ_1	Ram	δ_2
	+0,5°	060°	-1,09°	240°	-2,9°

Control 1b). La suma algebraica del valor de la fila 15 de las columnas 8 y 9 es igual a +7,0°. El doble del valor de la tercera fila de la columna 4 también es igual a 7,0°, lo que significa que el cálculo de las dos últimas columnas se efectuaron correctamente.

Este control se realiza mentalmente y permite detectar los errores en el cálculo de las dos últimas columnas.

CONTROL 2. Para este control se comparan los valores de los desvíos calculados (últimas dos columnas del **FORMATO 4** en los Ram principales con los desvíos observados en esos mismos rumbos (desvíos anotados en las columnas 1 y 2 del **FORMATO 3** para el cálculo de los coeficientes del desvío). Si el valor de las diferencias, do-dc, (do- desvío observado, dc- desvío calculado), se encuentra en los límites de 0,1°-0,3°, significa que en los desvíos calculados para estos rumbos no hay errores, a su vez esta diferencia indica que las observaciones fueron realizadas correctamente. Si el valor de la diferencia do-dc en algunos rumbos es mayor de 0,6°-0,7°, entonces en primer lugar, es necesario, cuidadosamente comprobar todos las operaciones en la fila del formato 4 , donde se detectó esa diferencia. Si como resultado de estas comprobaciones no se detectan errores, entonces se debe comprobar la veracidad de la determinación de los coeficientes B, C y A en el formato 3 y después de verificar el cálculo de los coeficientes E y D. Si en estos hay errores, la diferencia do-dc indica que en las observaciones de los desvíos se cometieron imprecisiones. En este caso los desvíos calculados tendrán menores errores de los observados.

Si el valor de la diferencia do-dc para los mismos rumbos es mayor de 1°.0 y la comprobación de los resultados mostraron que no hay errores en los mismos, entonces se ve claramente que las observaciones se efectuaron incorrectamente, por lo que es necesario repetirlas lo más pronto posible.

Para comprobar el valor de los desvíos en todos los rumbos y detectar los errores casuales, se realiza el tercer control.

CONTROL 3. Con los resultados obtenidos en las columnas 8 y 9 del **FORMATO 4** se plotea en el gráfico la curva de los desvíos residuales, si esta curva resulta suave, es decir, sin rupturas y desviaciones respecto a su trayectoria, significa que los desvíos han sido calculados correctamente. Si ocurre lo contrario es de suponer que estamos en presencia de errores en los cálculos del desvío, precisamente en los rumbos donde se detectaron las desviaciones. Para encontrar los errores cometidos, con ayuda del gráfico hallamos el rumbo donde se produjo la desviación y cuidadosamente se comprueban todos los cálculos en la que corresponde a este rumbo. Con esto termina el control de la tablilla de desvío. Ver ei gráfico de los desvíos residuales en la página siguiente.

Todos los cálculos en el **FORMATO 4** se realizan con una exactitud teniendo en cuenta que:
(Continúa en la pag. 137).

FORMATO 4 **CÁLCULO DE LOS DESVIOS RESIDUALES CADA 10°**

D = -3,1°		E = + 0,2°		3	4	B = + 0,4°		C = + 0,2°		7	Ram	δ	Ram	δ
M	1	M	2		A=0,4°	M	5	M	6					
	D.M		E.M	1+2	3+A		B.M		C.M	5+6		4+7		4-7
0	0°.0	1	+0.2	+0.2	+0.6	0	0.0	1	+0.2	+0.2	0°	+0.8	180	+0.4
S_{20}	-1.1	S_{70}	+0.2	-0.9	-0.5	S_{10}	+0.1	S_{80}	+0.2	+0.3	10	-0.2	190	-0.8
S_{40}	-2.0	S_{50}	+0.2	-1.8	-1.4	S_{20}	+0.1	S_{70}	+0.2	+0.3	20	-1.1	200	-1.7
S_{60}	-2.7	S_{30}	+0.1	-2.6	-2.2	S_{30}	+0.2	S_{60}	+0.2	+0.4	30	-1.8	210	-2.6
S_{80}	-3.1	S_{10}	0.0	-3.1	-1.7	S_{40}	+0.3	S_{50}	+0.2	+0.5	40	-1.2	220	-2.2
S_{80}	-3.1	$-S_{10}$	0.0	-3.1	-1.7	S_{50}	+0.3	S_{40}	+0.1	+0.4	50	-1.3	230	-2.1
S_{60}	-2.7	$-S_{30}$	-0.1	-2.8	-2.4	S_{60}	+0.4	S_{30}	+0.1	+0.5	60	-1.9	240	-2.9
S_{40}	-2.0	$-S_{50}$	-0.2	-2.2	-1.8	S_{70}	+0.4	S_{20}	+0.1	+0.5	70	-0.5	250	-2.3
S_{20}	-1.1	$-S_{70}$	-0.2	-1.3	-0.9	S_{80}	+0.4	S_{10}	0.0	+0.4	80	+0.6	260	-1.3
0	0.0	-1	-0.2	-0.2	+0.2	1	+0.4	0	0.0	+0.4	90	+1.7	270	-0.2
$-S_{20}$	+1.1	$-S_{70}$	-0.2	+0.9	+1.3	S_{80}	+0.4	$-S_{10}$	0.0	+0.4	100	+1.5	280	+0.9
$-S_{40}$	+2.0	$-S_{50}$	-0.2	+1.8	+2.2	S_{70}	+0.4	$-S_{20}$	-0.1	+0.3	110	+2.3	290	+1.9
$-S_{60}$	+2.7	$-S_{30}$	-0.1	+2.6	+3.0	S_{60}	+0.4	$-S_{30}$	-0.1	+0.3	120	+3.3	300	+2.7
$-S_{80}$	+3.1	$-S_{10}$	0.0	+3.1	+3.5	S_{50}	+0.3	$-S_{40}$	-0.1	+0.2	130	+3.7	310	+3.3
$-S_{80}$	+3.1	$-S_{10}$	0.0	+3.1	+3.5	S_{40}	+0.3	$-S_{50}$	-0.2	+0.1	140	+3.4	320	+3.4
$-S_{60}$	+2.7	S_{30}	+0.1	+2.8	+3.2	S_{30}	+0.2	$-S_{60}$	-0.2	0.0	150	+3.2	330	+3.2
$-S_{40}$	+2.0	S_{50}	+0.2	+2.2	+2.6	S_{20}	+0.1	$-S_{70}$	-0.2	-0.1	160	+2.5	340	+2.7
$-S_{20}$	+1.1	S_{70}	+0.2	+1.3	+1.7	S_{10}	+0.1	$-S_{80}$	-0.2	-0.1	170	+1.6	350	+1.8

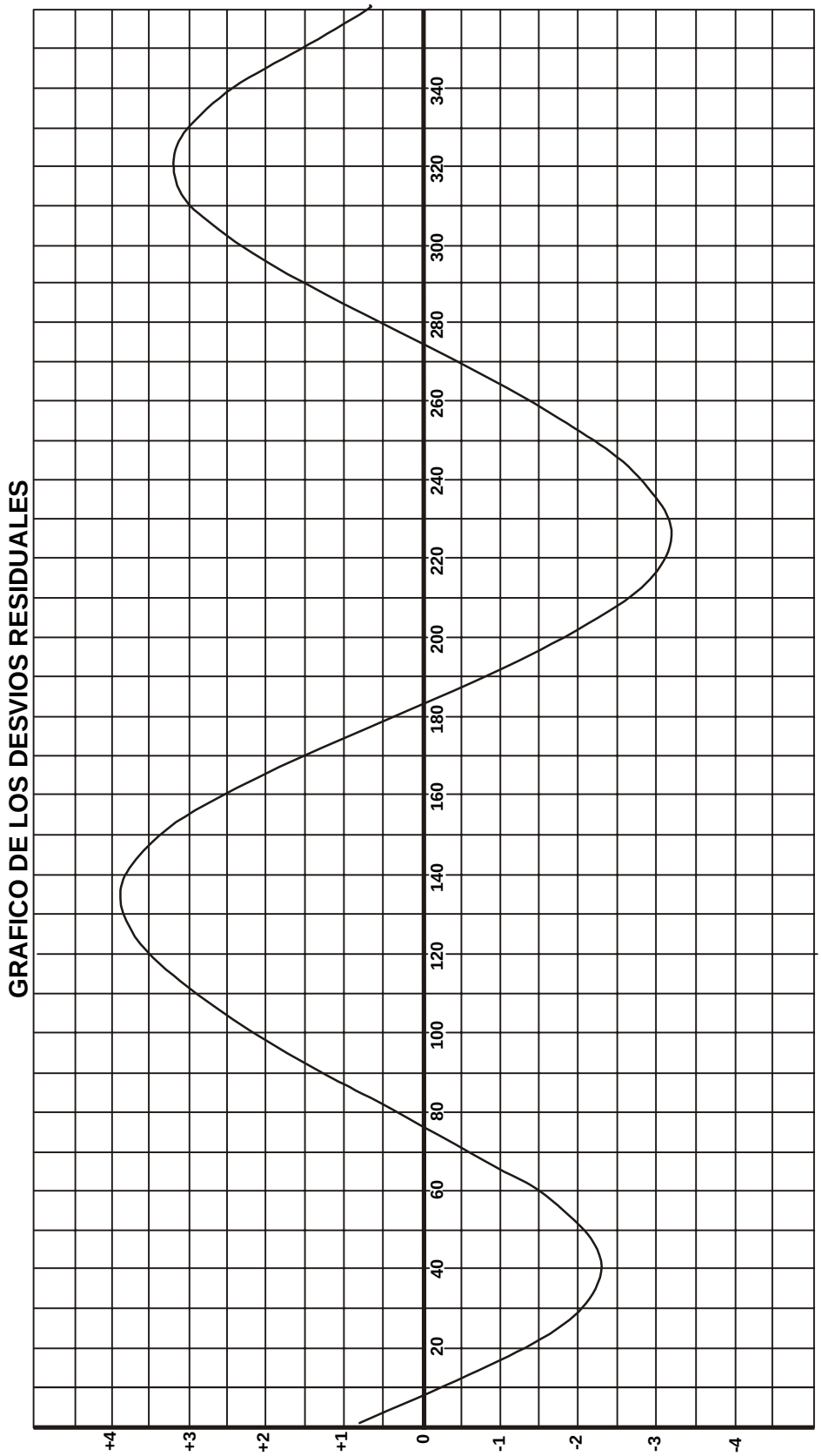


GRAFICO DE LOS DESVIOS RESIDUALES
+4
+3
+2
+1
0
-1
-2
-3
-4
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
240
260
280
300
320
340

a) Si las cifras centesimales son menores de 5, entonces se desprecia y se asume la cifra decimal.
Ejemplo 1,33° = 1,3°; 2,84° = 2,8°; 0,52° = 0,5°

b) Si las cifras centesimales son iguales a 5 se redondea la cifra decimal hasta el número par.
Ejemplo 1,15° = 1,2°; 1,25° = 1,2°; 2,35°= 2,4°;
3,55° = 3,6°; 2,65° = 2,6° etc., la cifra 0 se considera número par,
Ejemplo 1,05° = 1,0°; 3,05° = 3,0°

c) Si las cifras centesimales son mayores de 5, entonces a la cifra decimal se le suma 0°.1.
Ejemplo 1,26° = 1,3°; 1,29° = 1,3°; 2,87° = 2,9° ; 2,06 °= 2,1° etc.

d) Cálculo de la tablilla por la microcomputadora.

En la cátedra de Cubierta de la Academia Naval existe un software que calcula esta tablilla y otros elementos de interés para el navegante en lenguaje de programación Pascal para la versión 1.0 y C++ Builder para versión 3.0.

3.21 Rectificación de la compensación

Ejemplo. Se aproa el buque a los 8 rumbos obteniéndose los siguientes desvíos y coeficientes aproximados.

δ_N = -1,0° δ_S = + 2,0°
δ_{NE} = + 4,5° δ_{SW} = + 2,5°
δ_E = - 0,5° δ_N = - 2,5°
δ_{SE} = - 4,5° δ_{NW} = - 0,5°

A = 0,0°
B = + 1,0° Se requiere compensar
C = - 1,5° $D = 0{,}25\ (\delta_{NE} - \delta_{SE} + \delta_{SW} + \delta_{NW})$
D = + 3,0°
E = + 1,0°

Para ello se aproa el buque a Ram = 045°, en cuyo aproamiento el desvío es máximo (y que está 4,5° a la derecha del Rm = 045). Moviendo las esferas se hace que Ram quede 3° a la izquierda a la línea de fe, con lo que el desvío a ese rumbo queda reducido a +1,5°. El efecto del movimiento de las esferas cambia el signo en cada cuadrante, quedando los desvíos con los valores:

δ_{NE} = + 4,5° - 3,0°= + 1,5°
δ_{SE} = - 4,5° + 3,0° = - 1,5°
δ_{SW} =+ 2,5° - 3,0° = - 0,5°
δ_{NW} = - 0,5° + 3,0°= + 2,5°

donde:

D = 0,25 [+ 1,5° - (- 1,5°) + (- 0,5°) - (+ 2,5°)]

= 0,25 (+ 1,5 + 1,5 - 0,5 - 2,5)
D = 0

3.22 Desvío de orden superior

Después de la compensación del desvío los coeficientes aproximados del desvío B, C y D generalmente no sobrepasan de 1,0 - 1,5°.

En el caso de los coeficientes A y E, estos se pueden despreciar si el compás magnético se encuentra instalado en el plano diametral del buque, como ocurre normalmente.

Prácticamente en estas circunstancias el desvío de orden superior se puede despreciar y para los cálculos del desvío residual es suficiente utilizar la fórmula aproximada, la cual está limitada a cinco termino del desarrollo de la serie:

$$\delta = A + B\text{sen}Ram + C\cos Ram + D\text{sen}2Ram + E\cos 2Ram$$

Tal limitación solo es posible cuando los coeficientes B, C, D < 1,5°, los coeficientes A y E < 0,3°, y el desvío residual en cualquier rumbo no sobrepasa de 4°.

$$\delta = 0{,}3° + 1{,}5°\text{sen}Ram + 1{,}5°\cos Ram + 1{,}5°\text{sen}2Ram + 0{,}3°\cos 2Ram$$

En base a esto después de la compensación del desvío normalmente se calculan los primeros cinco coeficientes aproximados del desvío por las observaciones en los 8 rumbos agujas magnético.

Se puede demostrar que ante desvíos residuales de 15 - 20° los coeficientes de orden superior alcanzan valores notables (mayor de 0,2°). En estos casos la tablilla de desvío debe confeccioarse no por los 5 coeficientes del desvio sino por 12, los cuales se calculan por observaciones en 16 rumbos agujas magnéticos.

Es importante recordar, que todo lo expuesto anteriormente respecto a la relación entre estos 12 coeficientes y los cinco anteriores, solamente es válida ante condición de que el campo magnético en el entorno que ocupa las agujas magnéticas sea uniforme (como es el caso del campo magnético terrestre). La uniformidad del campo se asegura de dos formas:

– por el alejamiento de los imanes y masas de hierro a una distancia suficiente del compás.

– mediante la construcción racional del sistema magnético del compás.

Si cerca del compás se colocan masas magnéticas y el sistema no tiene un dispositivo racional entonces, apareceran los coeficientes de orden superior, influyendo por tanto en la exactitud y funcionamiento del mismo.

3.23 Construcción racional del dispositivo magnético del compás.

En los compases magnéticos modernos, por regla general, el sistema en lugar de una, tiene varias agujas, colocadas en un orden determinado como veremos más adelante, la existencia de varias agujas en la rosa del compás permite ubicarlo cerca de las masas de hierro, cuestión que es muy importante para los buques de transportes modernos. Cualquier compás magnético instalado en el buque en un grado u otro debe ser dotado de imanes compensadores e hierros dulces para la compensación del desvío. Estos imanes e hierros dulces se instalan a una distancia pequeña del sistema magnético del compás, por lo que el campo magnético en el entorno ocupado por la rosa del compás no es uniforme. Si en lugar de la rosa con varias agujas en un compás moderno se coloca una aguja de gran dimensión, entonces la relación de los coeficientes de orden superior con coeficientes aproximados no será la misma. Los coeficientes de orden superior F, G, H, K en las condiciones dadas pueden tener valores

considerables incluso en el caso en que los cinco coeficientes A,B,C,D y E sean iguales a cero. En otras palabras, los coeficientes de orden superior son independientes de los cinco primeros coeficientes de la serie de Fourié.

Se puede plantear, que la fórmula exacta del desvío en este caso tendrá la forma:

$$\text{sen}\ \delta = B''\ \text{sen Ram} + C''\ \cos \text{Ram} + d'\ \text{sen 2 Ram} + E''\ \cos 2\ \text{Ram} + F''\ \text{sen 3 Ram} + \\ + G''\ \cos 3\ \text{Ram} + H''\ \text{sen 4 Ram}.... \qquad (58)$$

En esta fórmula (58) los coeficientes B'', C''; E'', F'', se denominan coeficientes verdaderos del desvío. Sus valores dependen de la relación de la semilongitud l y la distancia r hasta las masas perturbadoras.

Analicemos la compensación del desvío semicircular y cuadrantal en compases de una aguja. Colocando en la bitácora imanes compensadores y compensando el desvío semicircular, se cumple la condición:

$$B'' = -B; \qquad C'' = -C$$

donde B y C - Coeficientes del desvío semicircular debido a los imanes compensadores.

B' y C' - Coeficientes exactos del desvío debido a los hierros duros del buque.

El desvío semicircular será compensado con imanes compensadores, pero estos mismos imanes debido a la cercanía de las agujas del compás crearán desvíos del orden superior, determinado por los coeficientes verdadero F'', G'' (desvío de orden seis), L'', M'' (desvío de orden diez) etc.

Colocando hierros dulces cerca del compas para compensar el desvío cuadrantal, se cumple la condición.

$$D'' = -D'; \qquad E'' = E'$$

donde D'' y E'' - Coeficiente verdadero creados por las esferas o barras de hierros dulces.

D' y E' - Coeficientes exactos creados por los hierros dulces del buque.

El desvío cuadrantal será compensado con las esferas o barras de hierro dulce, pero estos mismos correctores crearán desvío de orden superior, determinados por los coeficientes verdaderos H'', K'' (desvío de orden ocho), N'', P'' (desvío de orden doce) etc.

Se debe recordar, que los coeficientes verdaderos no son magnitudes y aisladas, estos coeficientes son los mismos que lo de serie de Fourié, pero con otra dependencia funcional.

Para pequeñas dimensiones de la aguja, cuando la relación l/r se aproxima a cero, los coeficientes verdaderos se transforman en los ya conocidos coeficientes exactos. Prácticamente en el buque es difícil establecer, con que tipo de coeficientes nos estamos enfrentando.

Los experimientos han demostrado, que un desvío de gran magnitud de orden superior surge no sólo en el caso, cuando la aguja del compás se encuentra en el campo no unifirme, sino que ante la no coincidencia del centro magnético con el centro de giro (desplazamiento longitudinal o transversal). He aquí del por qué, el cumplimiento constructivo de las agujas debe ser estricto, que aseguren su plena simetría magnética y geométrica respecto al centro general.

Para que el compás no tenga desvío de orden superior debido al campo no uniforme, es necesario disminuir las dimensiones de la aguja. Pero entonces disminuye el **momento magnético**, lo que es

inaceptable. Existe otra vía para eliminar desvío de orden superio, que es la creación del sistema magnético racional del compás: en lugar de una aguja en la rosa del compás se instalan dos, cuatro o seis agujas.

La condición necesaria de construcción racional de la aguja es la distribución simétrica de las tal llamadas equipolos de las agujas en una circunferencia con centro en el centro de la rosa. La rosa con un par de agujas (Fig. 82a) permite compensar los desvíos de orden seis y ocho.

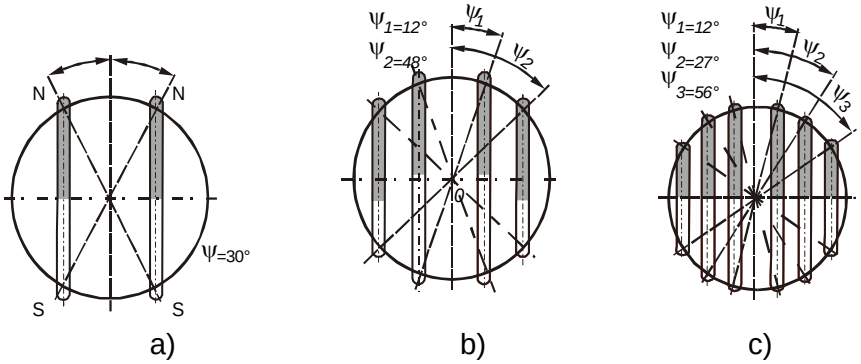


Fig. 82 Distribución racional de las agujas magnéticas

En la figura 82b está mostrado la distribución de de las agujas, con un ángulo ψ = 30°. El ángulo se forma con la dirección del eje longitudinal de simetría y la dirección de los equipolos de las agujas desde el centro de la rosa.

La rosa con dos pares de agujas (Fig. 82b) compensa el desvío de orden superior hasta doce inclusive.

La distribución de las agujas en la rosa con dos pares de agujas se determina (por Colong) con los ángulos:

$$\psi_1 = 12° \quad y \quad \psi_2 = 48°$$

La rosa con tres pares de agujas (Fig. 82c) permite compensar el desvíuo de orden superior hasta dieciseis inclusive.

La disposición de las agujas se determina (por Domogarov) con los ángulos:

$$\psi_1 = 12°; \quad \psi_2 = 27° \text{ y} \quad \psi_3 = 56°$$

Es interesante observar, que la longitud de una aguja debe ser 23 veces menor que el diámetro de la circunferencia del sistema racional de seis agujas magnéticas para cumplimentan la condición de equivalencia en relación al desvío de orden superior.

Existen países como la Federación Rusa donde los compases magnéticos de producción nacional tienen un sistema magnético con tres pares de aguja, cuya distribución se determina por los angulos.

$$\psi_1 = 15°12'; \ \psi_2 = 29°32' \text{ y } \psi_3 = 45°10'$$

Tal distribución de las agujas permite compensar el desvío de orden superior y al mismo tiempo garantiza la igualdad de los momentos de inercia respecto a los ejes NS y EW, esta última condición juega un

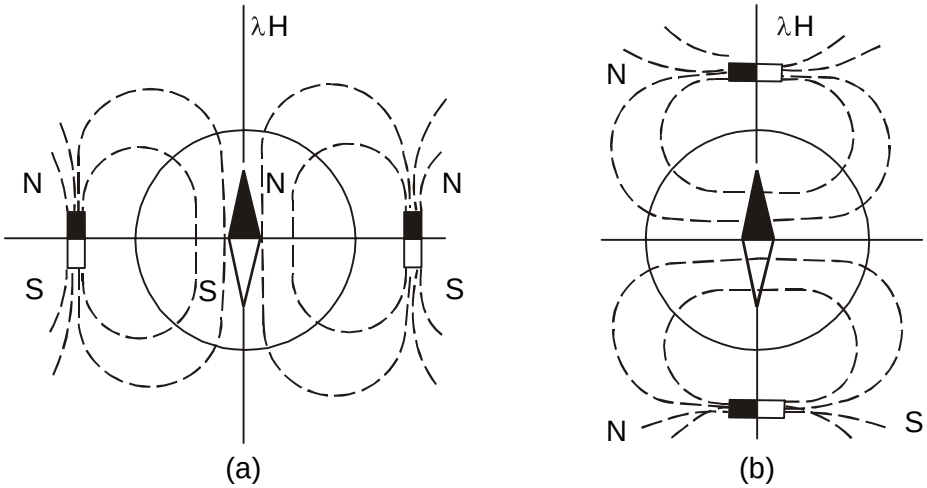
papel muy importante durante el mantenimiento de excelentes cualidades dinámicas del compás. No obstante, aunque éste está diseñado para minimizar el desvío de orden superior, es obvio que diferentes compases serán afectados diferentemente por el mismo compo magnético. Es necesario hacer hincapié, aun cuando el compás está diseñado convenientemente, que los compensadores tienen la responsabilidad de prestar gran atención en la utilización de los correctores (imanes, esferas o barras de hierro dulce) a fin de crear el campo magnético lo más uniforme posible.

Para esto se debe aplicar la siguiente regla:

- Se deben colocar correctores de gran intensidad simétricamente situados, lo mas alejado posible del compás, en lugar de correctores más débil muy cerca de éste. Por lo que:

- Es más conveniente utilizar esferas grandes colocadas en los extremos de los soportes, a igual distancia del centro del compás.

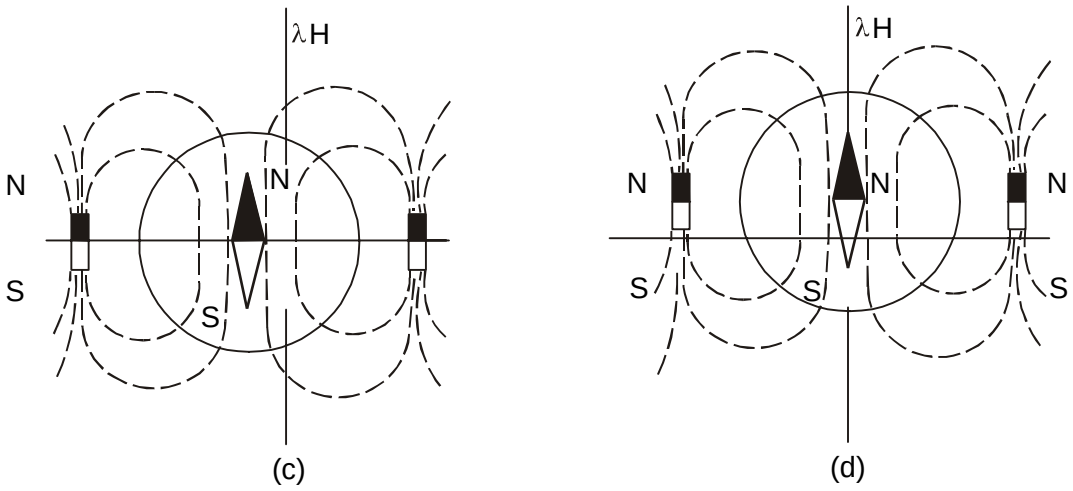
-Los imanes longitudinales y transversales también deben ser situados de forma que el número de éstos sea el mismo a ambos lados del compás donde sea posible. Los imanes deben ser colocados como se indica en la figura 83a, en caso de que no exista aditamentos para su instalación (las líneas horizontal y vertical se inteseptan en el punto que coincide con el centro de la rosa).



Campo magnético de los imanes longitudinales

Campo magnético de los imanes transversales

Fig. 83b Posición correcta de los imanes



(c) Campo magnético de los imanes longitudinales

(d) Campo magnético de los imanes transversales

Fig. 83b Posición incorrecta de los imanes.

Como puede apreciarse en la figura 83-b [(c) y (d)], los puntos de intersección de las líneas antes mensionadas no coincide con el centro de las agujas. En la figura (c) el centro de la aguja está desplazado hacia la izquierda en dirección de la línea horizontal y en la figura (d) el centro está desplazado hacia arriba en dirección de la línea vertical.

CAPÍTULO IV

CARTAS Y PUBLICACIONES NÁUTICAS

Capítulo IV

FUNDAMENTO DE LAS PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS

4.1 Conceptos sobre las proyecciones cartográficas

Es conocido que no es posible representar una superficie esférica o parte de ésta en un plano sin que sufra deformaciones. Estas deformaciones pueden ser eliminadas mediante el alargamiento o achatamiento de la representación de la superficie de la Tierra, de acuerdo a determinadas leyes y reglas en ciertas direcciones. Por eso en el plano (carta) se obtiene la imagen deformada de la superficie terrestre, se deforman las figuras, sus dimensiones lineales, la equivalencia de áreas, etc.

No es posible crear una carta en la que estén ausentes por completo las deformaciones. Es obvio que para que la carta pueda ser utilizada para fines de la navegación las deformaciones indispensables que surgen en su construcción deben ser sometidas a determinadas leyes matemáticas.

Por tanto, se denomina carta a la representación plana y deformada de la superficie terrestre o una parte de ésta, en la cual las deformaciones (distorciones), están sometidos a una ley matemática determinada.

El contenido de las cartas es variado y se determina por su destino. Así por ejemplo, en las cartas náuticas se muestra detalladamente el relieve del fondo marino, diferentes peligros para la navegación, la línea de costa, los puntos notables (de referencia), se dan informaciones sobre la declinación magnética y su variación.

En estos mapas se muestran los contienentes o sus partes, el relieve de la Tierra, se señalan las ciudades, las fronteras entre paises, las redes de carreteras, etc.

La construcción de cualquier carta o mapa se reduce a la proyección de la superficie terrestre en un plano. Este proceso se realiza con ayuda de las proyecciones cartográficas, las cuales expresan el método de representación de la superficie del elipsoide terrestre, expresado matemáticamente.

La superficie física de la Tierra posee un relieve muy variado (montañas, elevaciones, depresiones, etc), cuya proyección directa está relacionada con grandes dificultades. Por eso antes de representar la Tierra en un plano, ésta preliminarmente se proyecta mediantes lineas verticales en la tal llamada **superficie de nivel.**

Se denomina **superficie de nivel** al nivel medio de las aguas del océano mundial, prolongado imaginariamente sobre los continentes. (Fig. 84)

De está forma a la carta se traslada con ayuda de una u otra proyección cartográfica no la superficie física de la Tierra, sino su proyección horizontal en la superficie de nivel

Es conocido que la posición de cualquier punto de la superficie de la Tierra puede ser dada en diferentes sistemas de coordenadas. En el sistema de coordenadas goegráficas, el punto se determina por las coordenadas latitud (φ) y longitud (λ) y se encuentra en el punto de intersección de dos líneas de este sistema de coordenadas, (paralelos y meridianos).

En el sistema horizontal de coordenadas este mismo punto puede ser dado por las coordenadas esfericas, distancia zenital (ΔZ), azimut (A) y encontrándose en el punto de intersección de las líneas de coordenadas almicantarat y vertical (Fig. 85).

También es evidente que en la carta la representación de la posición de cualquier punto debe encontrarse de igual forma, en la intersección de dos líneas de coordenadas análogas en la superficie del elipsoide terrestre.

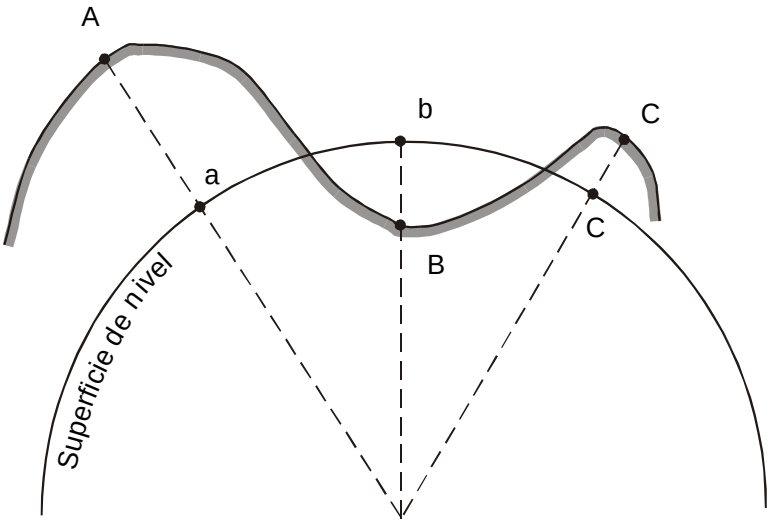


Fig. 84 Superficie de nivel

En otras palabras, antes de obtener la representación de la superficie terrestre en un plano, es necesario trazar en éste ultimo el sistema de líneas de coordenadas; por ejemplo los meridianos y paralelos (retícula).

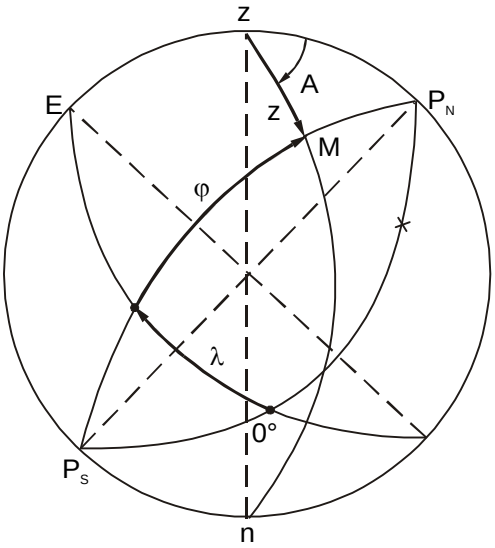


Fig. 85 Sistema de coordenadas

De esta forma se puede decir que la proyección cartográfica es el método de representación imaginaria en el plano de las líneas de coordenadas correspondientes a las coordenadas del elipsoide terrestre.

En este caso, a cada punto en la superficie del elipsoide terrestre con coordenadas φ_i y λ_i debe corresponder su representación en el plano determinado por las coordenadas cartográficas X_i, Y_i, es decir $X_i = f_i (\varphi_i , \lambda_i)$; $Y_i = f_i (\varphi_i , \lambda_i)$ (Fig.86)

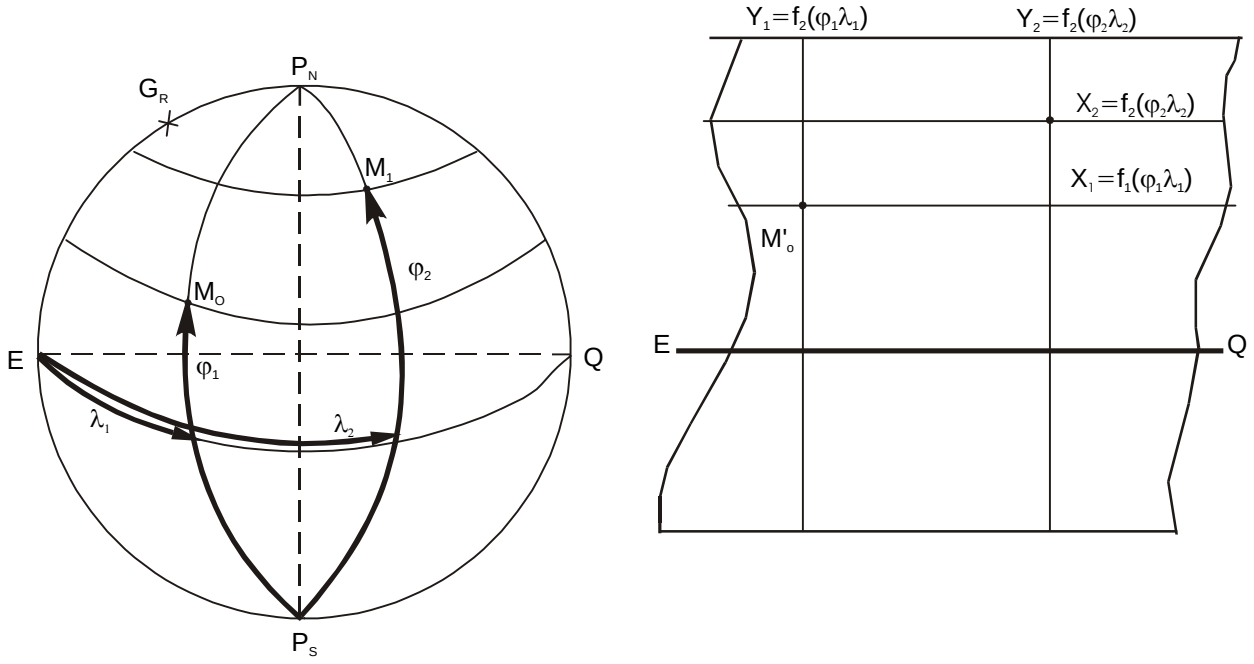


Fig. 86 Relación entre las coordenadas geográfica y cartografícas

Dando determinados valores a las funciones f_1 y f_2 se pueden obtener diferentes proyecciones cartográficas que correspondan a las condiciones planteadas (ejemplo, que el arco de círculo máximo se represente por una línea recta o que no exista la deformación de ángulos, etc.

El sistema de líneas de coordenadas en la proyección cartográfica dada y contruído en el plano (carta) de acuerdo a determinada ley matemática, **se denomina red cartográfica o retícula (conjunto de meridiano y paralelos que conforman la carta).**

La ley matemática, por la cual se construye la red cartográfica se da en forma de ecuación en la proyección.

Las líneas de coordenadas de las redes cartográficas u otras proyecciones cartográficas pueden tener la forma más variadas (líneas rectas, arcos de circunferencia, hipérbolas,etc).

El sistema de coordenadas esféricas, cuyas líneas de coordenadas, de la forma más simple (por ejemplo en forma de líneas rectas), que se representan en la proyección cartográfica dada, se llama **sistema normal de coordenadas esféricas.**

Para proyecciones cartográficas específicas el sistema normal de coordenadas esféricas es el sistema de coordenadas geográficas, cuyas líneas son los paralelos y meridianos y el polo es el polo geográfico P_N. Para otras proyecciones este sistema es el sistema de coordenadas horizontales con las líneas de coordenadas almicantarat y vertical y el polo en el punto zenit Z_o.

En dependencia del carácter de representación de las líneas de coordenadas del sistema de coordenadas geográficas se diferencian tres formas de redes cartográficas: normal (directa), transversal y oblicua.

Se llama **red cartográfica normal** a la representación en el plano de las líneas de coordenadas del sistema de coordenadas esféricas del mismo nombre.
Por ejemplo, si proyectamos la superficie terrestre en el interior de un cilindro, cuyo eje coincide con el de la Tierra, entonces el sistema normal de coordenadas esféricade será el sistema de coordenadas geográficas. (Fig 87).

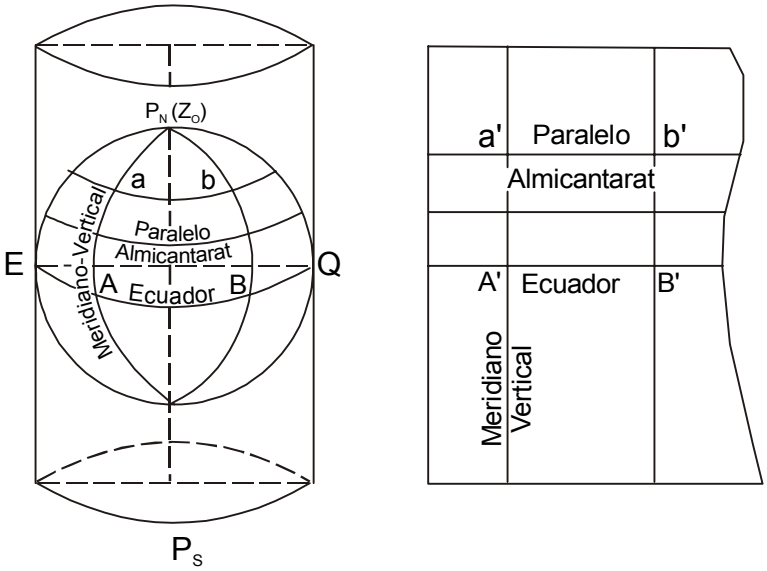


Fig. 87 Red de cartográfica normal

Realmente, en tal método de proyección el polo geográfico coincide con el punto zenit (Z_o), los paralelos con los almicantarates y los meridianos con los verticales.

Al desarrollar el cilindro en un plano las líneas de coordenadas geográficas que son líneas rectas perpendiculares entre si. Este sistema se denomina normal.

Si en el método de proyección el polo geográfico P_N se gira con relación al zenit (Z_o) en 90°, el sistema normal de coordenadas esféricas será el horizontal ya que sus líneas de coordenadas almicantarates y verticales forman en el plano una red de línea rectas mutuamente perpendiculares (Fig. 88).

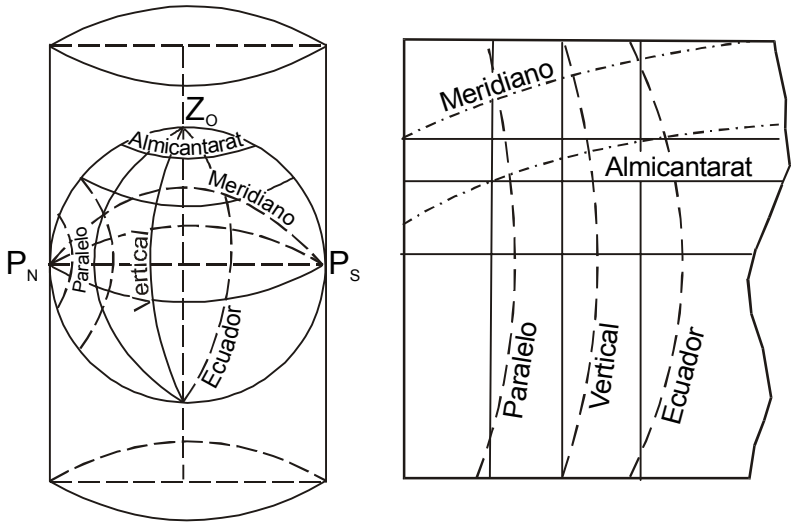


Fig. 88 Red de cartográfica transversal

Los paralelos y meridianos del sistema de coordenadas geográficas se representan en el plano de arcos de circulos máximos y menores, formando la **red cartográfica transversal.**
Por tanto se llama red cartográfica transversal a la representación en el plano de las líneas del sistema de coordenadas geográficas (paralelos y meridianos) cuando el polo geográfico P_N está rotado en 90° respecto a la dirección del polo Z_o del sistema normal (horizontal) de coordenadas esféricas.

Si el polo geográfico P_N se gira en un ángulo desigual de 90° respecto al zenit, el sistema normal de coordenadas esféricas sigue siendo el sistema horizontal y las líneas que conforman el sistema de coordenadas geográficas: los paralelos y meridianos aparecen en el plano como líneas curvas, formando la red cartográfica oblicua (Fig. 89).

Por consiguiente se denomina la **red cartográfica oblicua** a la representación de las líneas del sistema de coordenadas geográficas en el plano, cuando el polo geográfico P_N está rotado en un ángulo diferente de 0° y 90° respecto al polo Z_o del sistema normal (horizontal).

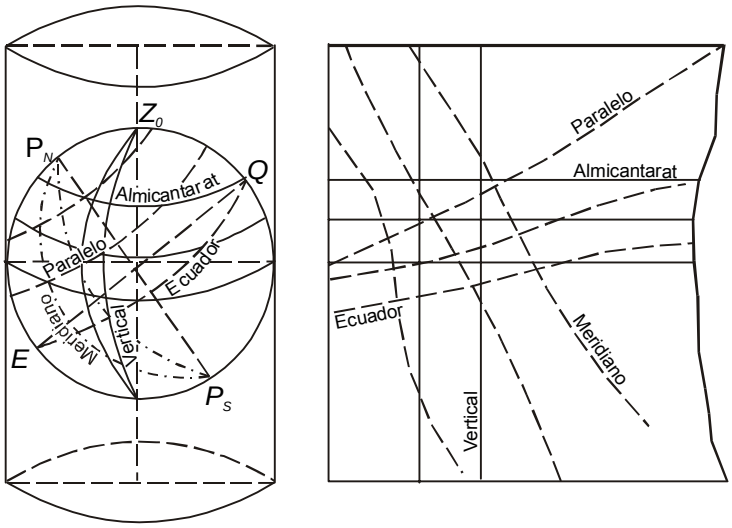


Fig. 89 Red cartográfica oblicua

La utilización de una u otra red cartográfica de la latitud depende del sector de la superficie de la tierra, para el cual se confecciona la carta así como de las características propias de la proyección cartográfica utilizada.

Así, por ejemplo, en las proyecciones cilindricas para las regiones ecuatoriales se utiliza la red cartográfica normal, para las regiones polares la red cartográfica transversal y para las regiones de latitudes medias la red oblicua. Tal selección de las redes cartográficas se explica porque las magnitudes de defiormación en la región de tangencia del globo y del cilindro será menor.

En particular de la Figura 87 se observa que el arco de ecuador AB fue trasladado al plano de la proyección sin deformaciones (A'B'=AB); al mismo tiempo que en el traslado del paralelo ab que se encuentra del ecuador a una distancia considerable, la deformaciones son inminentes (a'b'> ab).

Por último señalaremos que la representación de pequeños sectores de la localidad, se pueden considerar planos. Sin embargo al despreciar la curvatura de la Tierra, es necesario tener en cuenta que los errores que surgen por ello no deben superar la exactitud de las construcciones gráficas (0,2 mm en el plano). Esto se logra por la limitación de las dimensiones del sector de la localidad representado.

El traslado de las representaciones al plano se realiza no con ayuda de las proyecciones cartográficas, sino por el método de la proyección rectangular (toma topográfica). La esencia de este método, consiste en que todos los puntos de la zona representada de la superficie de la Tierra, se trasladan al plano horizontal con ayuda de líneas perpendiculares a él.

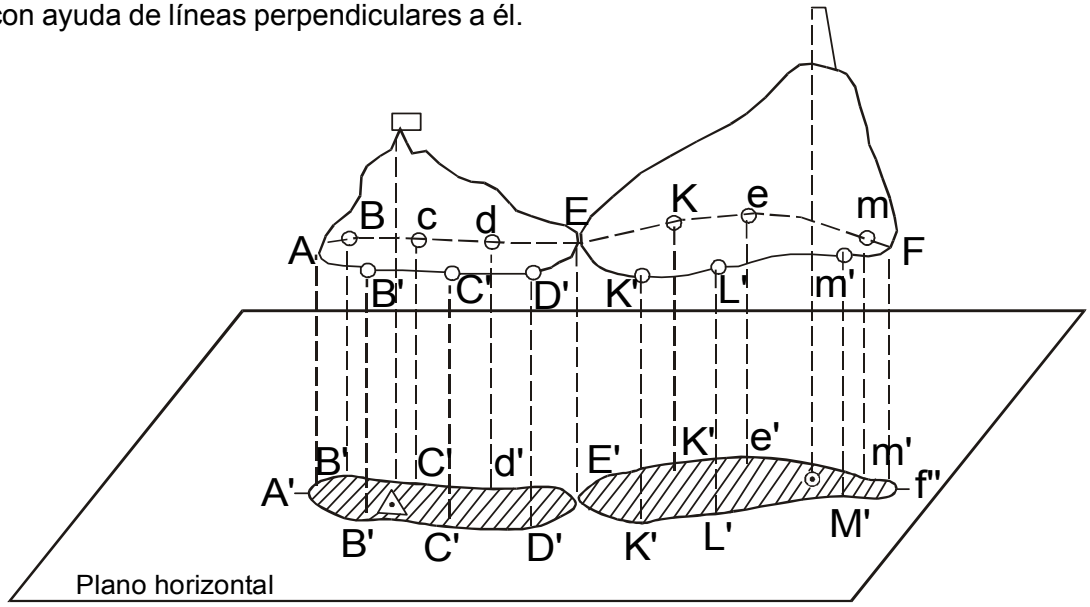


Fig. 90 Plano

Tal representación plana de una zona pequeña de la superficie de la Tierra, a diferencia de las cartas se llama plano. (Fig. 90).

En el plano practicamente están ausentes las deformaciones de los ángulos, distancias y áreas. El grado de disminución de las dimensiones es constante en todas las direcciones y en todos los puntos del plano.

Escalas de las cartas

Tierra, sus dimensiones deben ser disminuidas en determinado numero de veces. **El grado de tal disminución se llama escala.**

Por cuanto no existen proyecciones cartográficas libre de toda deformación, la escala de la carta en terminos generales es una magnitud variable, que cambia tanto con la variación de la dirección como del paso de un punto a otro.

Por ejemplo si la superficie esférica de la Tierra (globo) es trasladada al plano como se muestra en la figura 91, entonces por los paralelos aparece la discontinuidad de la representación, cuya magnitud crecerá con el alejamiento del ecuador. Para rellenar estos espacios y unir la representación de uno sólo es necesario alargar la magnitud de los paralelos hasta la longitud igual a la del ecuador sin variar la longitud de los paralelos hasta la longitud, cuanto más alejado se encuentre el paralelo del ecuador, a mayor alargamiento sera sometido éste. Por eso la representación de una zona de la Tierra en el plano (carta) se deformará en la dirección de los paralelos al mismo tiempo que queda sin deformación en la dirección de los meridianos. La magnitud de estas deformaciones crece con el aumento de la latitud. Por consiguiente un mismo segmento de longitud en la naturaleza se representa en diferentes partes de la carta por segmentos de diferentes tamaños, lo que provoca la variación de la escala al paso de un punto a otro.

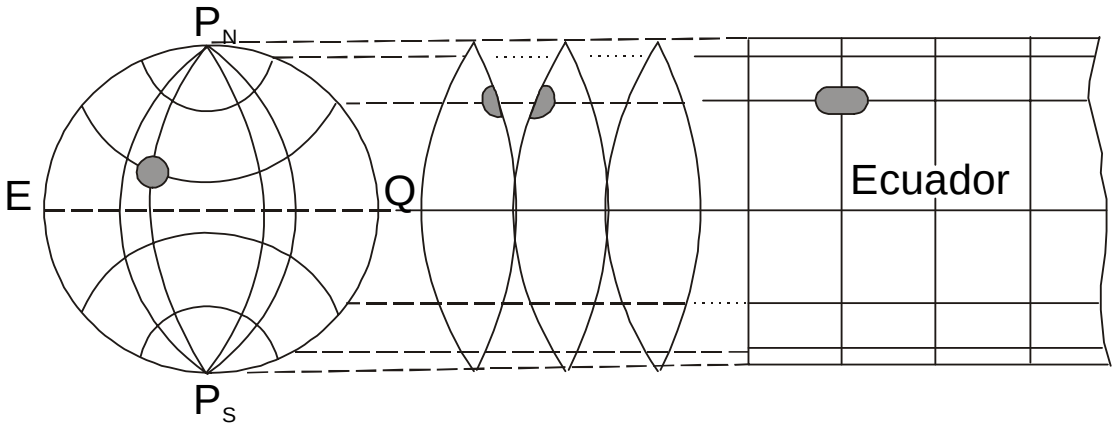


Fig. 91 Paso de la superficie esférica a un plano

Cuando se confeccionan las cartas en su fundamentación se introduce la **llamada escala principal**, la cual conserva el valor constante en determinados puntos de la carta o a lo largo de ciertas direcciones (por ejemplo a lo largo de un paralelo, el cual en este caso se llama paralelo principal).

El punto de la carta o la dirección (línea de coordenadas), en los cuales la escala de la representación es igual a la escala principal, se llama **punto central o línea central de proyección**.

La esencia de la escala principal consiste en que el elipsoide terrestre es disminuido preliminarmente hasta las dimensiones de un globo arbotrario similar a él.

El grado de tal disminución general de la superficie de la Tierra se denomina escala principal μ_o:

$$\mu_0 = \frac{ds_0}{dS_0} \qquad (60)$$

donde ds_o - sector infimamente pequeño en una esfera arbitraria;
dS_o - sector correspondiente a él en el terreno.

Luego el sector de la superficid de la Tierra esfera arbitraria se traslada a la carta con escala 1:1 con ayuda de una u otra proyección cartográfica (Fig. 92).

La escala principal, señalando la línea de coordenadas, a la cual esta se relaciona, se da en el título de la carta.

Por ejemplo: "escala 1: 200 000 por el paralelo 60°". A diferencia de la escala principal, constante para el paralelo principal, la escala en otras partes de la carta es variable. Esta puede ser mayor o menor que la escala principal.

La escala en un punto dado en determinada dirección se llama **escala particular μ**:

$$\mu_0 = \frac{ds}{dS_0} \qquad (61)$$

donde: ds - sector infimamente pequeño en la carta;
dS_o - sector infimamente pequeño correspondiente a él en el terreno.

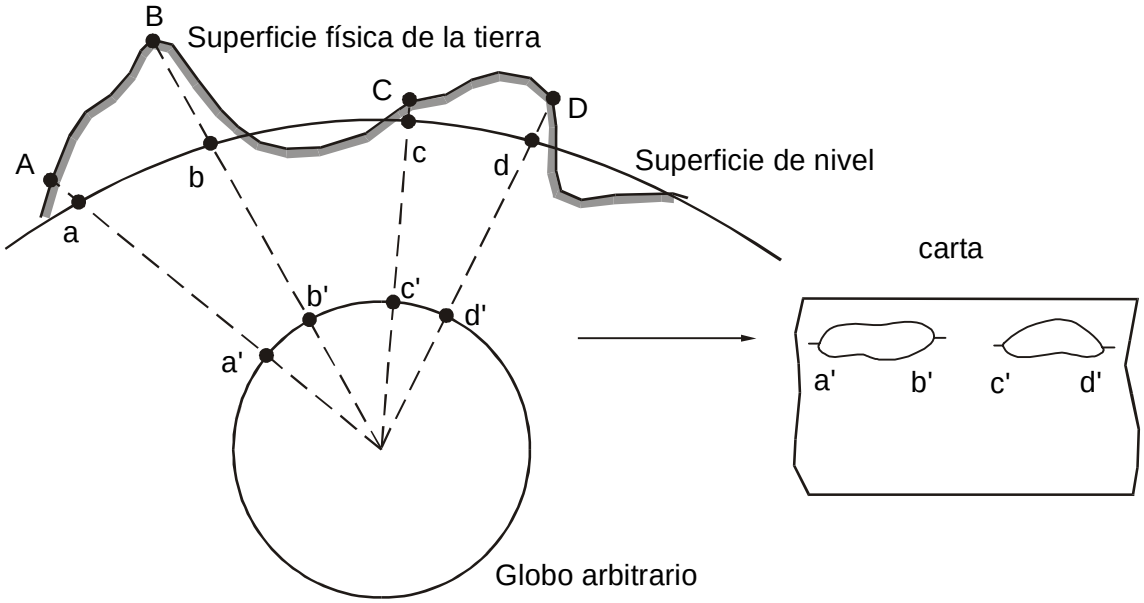


Fig. 92 Esencia de la escala principal

De está forma, se llama **escala** en un punto dado de la carta a la relación del sector infimamente pequeño (ds) tomado cerca de la posición del punto dado en la dirección dada con el sector correspondiente a él en terreno $dS_{o.}$

Recordamos que es necesario entender por "terreno" su proyección horizontal en la superficie de nivel.

La variación de la escala particular y su diferencia de la escala principal sirven como característica de deformación de la proyección cartográfica dada.

La relación entre la escala particular en el punto dado en la dirección dada y la escala principal se llama **aumento de la escala:**

$$C=\frac{\mu}{\mu_0}=\frac{ds:dS_0}{dS_0:dS_0}=\frac{ds}{ds_0}. \qquad (62)$$

En la fórmula (62) se puede observar que el aumento de la escala es una magnitud variable, que varía al pasar de un punto a otro en la carta, e inclusive alrededor de un punto, pero en direcciones diferentes. Esto conlleva a la deformación de los ángulos, las longitudes y las áreas en la proyección.

Por consiguiente el aumento de la escala caracteriza el grado de las deformaciones propias de la proyección cartográfica dada o la escala de la carta con relación al globo arbitrario. Cuanto más se acerque el aumento de la escala a la unidad más perfeccionada será la proyección cartográfica seleccionada para la carta dada.

La diferencia entre el aumento de la escala y la unidad se llama **deformación relativa de las longitudes**:

$$v=c-1=\frac{\mu}{\mu_0}-1=\frac{\mu-\mu_0}{\mu_0}. \qquad (63)$$

Conociendo la escala principal y el aumento de la escala c se puede calcular tanto la escala particular $\mu = c\mu_o$ así como la deformación de las longitudes para cualquier punto de la carta. En las cartas la escala se expresa de dos formas: **númericas y lineal.**

Se llama **escala númerica** a la relación entre las longitudes de las líneas en el globo arbitrario y las correspondientes en el terreno. La escala númerica se da en forma de quebrado, cuyo numerador es la unidad y el denominador es el número que muestra el grado de disminución de las longitudes en el globo arbitrario con relación al terreno.

$$\text{Por ejemplo} = \frac{1}{200\,000}$$

significa que la longitud de un segmento en el terreno fue disminuida en 2 00 000 veces al ser proyectada en el globo arbitrario. O lo que es igual; una unidad de longitud en el globo arbitrario (y por consiguiente en la carta) corresponde a 2 00 000 unidades de la misma denominación en la localidad. La escala numérica puede ser dada también de la siguiente forma: 1: 200 000; 0, 00002. Para el trazado o medición en la cara de los segmentos de una longitud dada es comodo utilizar la escala lineal.

Se denomina **escala líneal** a la magnitud que muestra cuanta unidades de longitud, por las cuales se mide la distancia en el terreno (Km, millas), están contenidas en la unidad de distancia, por la cual se mide la distancia en la carta (cm).

La escala lineal en las cartas y mapas topográficos se representa graficamente en forma de escala horizontal (Fig. 93). En las cartas náuticas de proyección Mercator la escala horizontal de proporciones se representa en forma de mínutos de latitud a lo largo de los bordes laterales de la carta. Conociendo una de las formas de las escala se puede calcular otra. Por ejemplo:

a) Dada la escala numérica 1: 2000 000; calcular la escala lineal (número de millas en 1 cm de la carta).

$\frac{200\,000}{185\,200} = 1{,}08$, es decir en 1 cm de la carta se contienen 1,08 millas;

b) Siendo la escala lineal: un centímetro de la carta 2 millas.

Calcular la escala numérica. 2 x185200 = 370 400. es decir μ_0=1:370 400.

Al disminuir la escala la representación de los detalles aislados en la localidad se hacen tan pequeños que es imposible trazarlos en la carta.

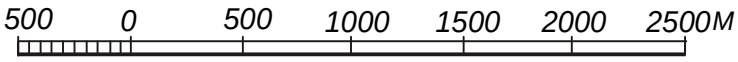


Fig. 93 Escala lineal

Apreciación de la escala

Se denomina apreciación de la escala a la menor longitud que puede ser medida en la carta .

Se afirma que el ojo humano no puede medir una distancia menor de 0,1 mm - 0,01 cm.

Dos puntos que se encuentren a una distancia menor de 0,1 mm se confundirán en el papel. Partiendo de estos razonamientos las distancias en el terreno correspondientes a un segmento de 0,1 mm en la carta se toma como la exactitud límite de la escala.

Considerando las exactitudes inminentes en la confección de la carta, se considera como exactitud límite de la escala la distancia en el terreno correspondiente a 0,2 mm en la carta. Este valor nos va a determinar la **apreciación** de la escala de una carta determinada.

La apreciación de la escala depende de la proyección de ésta.

Para calcular la apreciación de la escala es necesario multiplicar el denominador de la proporción numérica expresado en cm, por 0,02 y llevar a metros el resultado.

Mostraremos en un ejemplo el calculo de la exactitud límite (apreciación) de la escala para una carta, cuya escala es de 1: 500 000 $\left(\frac{1}{500\ 000}\right)$.

Del concepto de escala se puede confeccionar y resolver la proporción:

1 mm en la carta - 500 000 mm en la localidad
0,2 mm en la carta - x mm en la localidad

X = 500 000 x 0,2 = 100 000 mm = 100 mm

Es decir la exactitud límite de la escala es de 100 metros.

Si tenemos una escala lineal, para determinar la apreciación de la escala, el número de millas se multiplica por 0,02 cm y el resultado es llevado a metros.

Ejemplo: 2 millas en 1 cm. La apreciación de la escala será:

2 x 0,02 x 1852 =74 metros

Por consiguiente si la distancia en la localidad entre dos puntos es menor de 100 metros, en la carta no se pueden representar por separado, se confunden en un punto. Por tanto, la escal de la carta y la apreciación de la escala que depende de la primera, determina la cantidad de detalles impresos en la carta y la exactitud, con la cual pueden ser realizadas las construcciones gráficas.

4.2 Clasificación de las proyecciones cartográficas

Existe un sinnúmero de clasificaciones de las proyecciones cartográficas. A continuación se abordará una de estas clasificaciones conocidas, que puede considerarse entre las más completas e interesantes y tiene en cuenta los siguientes aspectos.

a) Por el tipo de deformación:

1. Proyecciones equidistantes
Son las que conservan las distancias, y aunque en realidad no hay ninguna que logre esto en todas las direcciones, se aplica a algunas que las conservan en determinado sentido.

2. Proyecciones equivalentes
Las que no sufren alteración en las superficies.

3. Proyecciones conformes
Son las que conservan iguales los ángulos.

Las clases anteriores son exclusivas siendo las dos últimas de gran importancia y naturaleza opuesta. Conforme implica que pequeñas áreas en el mapa tiene una escala local verdadera. Como consecuencia todas las proyecciones conformes conservan los ángulos, pero cuando son usadas en escalas globales sufren severas distorciones de la forma de las masas de tierra. Aplicaciones comunes en ambas, las grandes y las pequeñas escalas, incluyen las cartas náuticas y los mapas municipales respectivamente. Los mapas equivalentes o de igual-área permiten el trazado de grandes masas terrestres con pequeñas distorciones en la forma; la conservación exacta del área las hacen atractivas para censos temáticos o mapas estadísticos. Inversamente, éstas sufren de distorciones angulares a pequeña escala.

Las proyecciones equidistantes mantienen la escala verdadera a lo largo de curvas seleccionadas; éstas y las proyecciones especializadas buscan un punto medio entre las distorciones de forma y de ángulo presentes en las dos primeras clases. Son empleadas comúnmente para el trazado de áreas de extensión global de una forma agradable.

b) Por la forma de obtener la proyección se clsifican en:

1. Proyecciones puras

En éstas el mapa se obtiene directamente proyectando la superficie terrestre sobre un plano o sobre una superficie con posibilidades de desarrollo. Dentro de estas se tienen a su vez:

a) Proyecciones naturales o poliédricas, en las que se superpone a la Tierra, y abarcando nor malmente una pequeña superficie, un plano tangente a la misma en su centro. Estos mapas reproducen muy bien el terreno y, más que una proyección, son un levantamiento topográfico a cierta escala.

b) Proyecciones perspectivas, obtenidas directamente sobre un plano o cuadro sin necesidad de posterior desarrollo.

c) Proyecciones por desarrollo, en las que la Tierra, o una parte de ella, se proyecta sobre una superficie cilíndrica o cónica que luego se desarrolla.

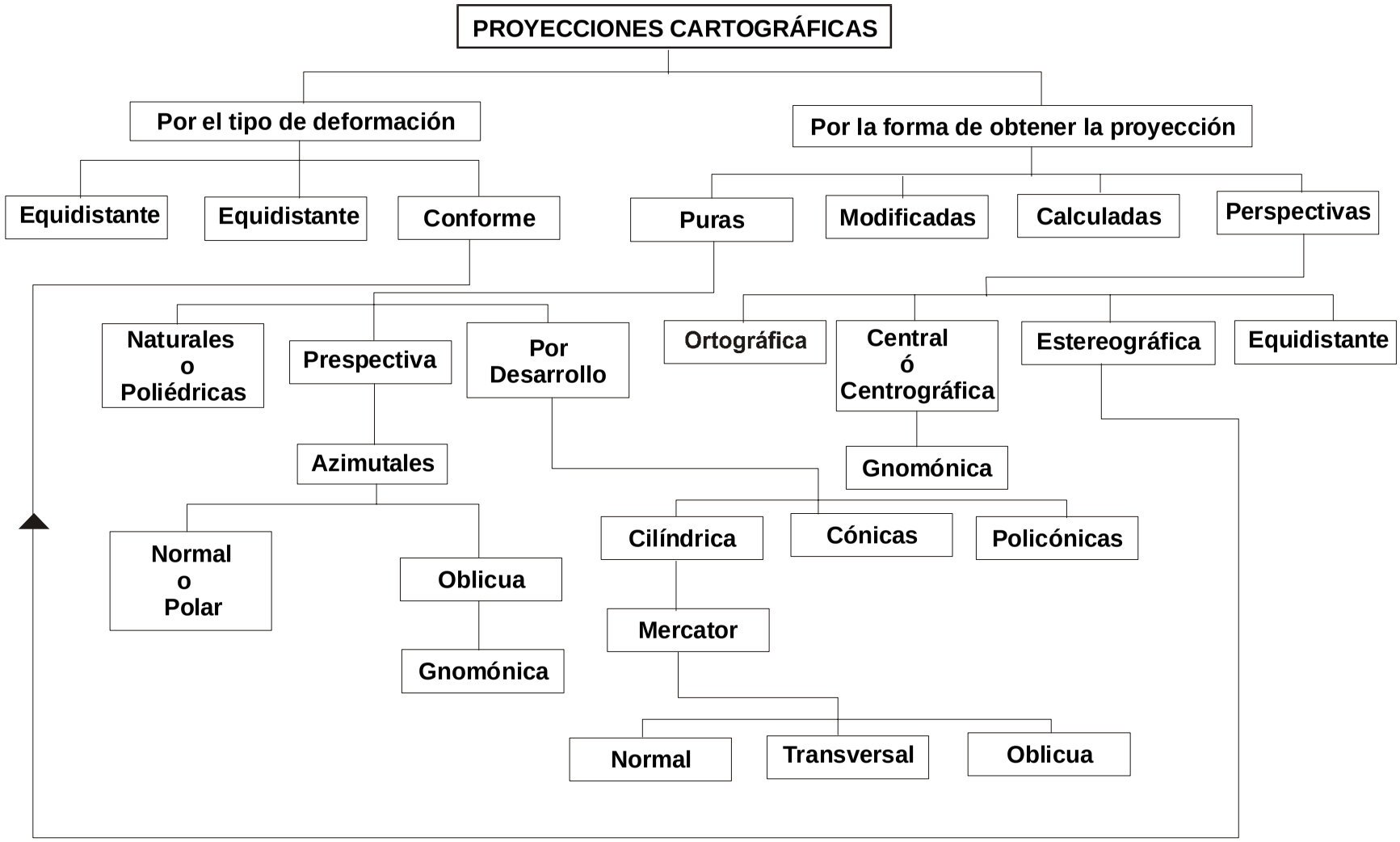
La figura de proyección puede tener una orientación u otra en dependencia de la tarea plateada y de la forma o ubicación geográfica del territorio a mapificar. Bajo este prisma las proyecciones se clasifican en normales si el eje del cono o el cilindro coinciden con el eje de rotación de la Tierra; en el caso de las azimutales cuando el plano es tangente a un polo. Las proyecciones son transversas cuando el eje del cono o cilindro intercepta el eje de rotación de la Tierra y a su vez es paralelo al plano del ecuador. Estas proyecciones, por su importancia, se tratarán con mayor profundidad más adelante.

2. Proyecciones modificadas

Forman un grupo en el que, por medio de artificios, a partir de las puras, se obtienen mapas en los que predomina una propiedad especial y que interesa utilizar.

3. Proyecciones calculadas

Están exclusivamente basadas en una relación analítica que determina la correspondencia entre los puntos de la Tierra y los del mapa. La fórmula, en cada caso, es la más adecuada para satisfacer una necesidad de empleo, y si en algunos casos se les considera proyecciones modificadas, es exclusivamente por semejanza en el aspecto de su reticulado, sin que verdaderamente haya un punto común alguno.


PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS
Por el tipo de deformación
Por la forma de obtener la proyección
Equidistante
Equidistante
Conforme
Puras
Modificadas
Calculadas
Perspectivas
Naturales o Poliédricas
Prespectiva
Por Desarrollo
Ortográfica
Central ó Centrográfica
Estereográfica
Equidistante
Azimutales
Gnomónica
Normal o Polar
Oblicua
Gnomónica
Cilíndrica
Cónicas
Policónicas
Mercator
Normal
Transversal
Oblicua

4. Proyecciones perspectivas.

Dentro de esta denominación se tienen cuatro grandes grupos, caracterizados por la posición el observador: **Ortográficas**, cuando el punto de vista está fuera de la Tierra y a una distancia infinita; **exterior** o **escenográfica**s, cuando el punto de vista está fuera de la Tierra a una distancia determinada; **estereográficas**, cuando el punto de vista se encuentra en la super ficie terrestre, y **centrográficas** o **gnomónicas**, cuando la visual se dirige desde el centro de la Tierra. Expresado de otra manera:

D = ∞ Proyección ortográfica
D = 0 Proyección central
D = R Proyección estereográfica
D > R Proyección exterior o escenográfica

a) Proyecciones azimutales, son aquellas en que la red cartográfica se obtiene cuando se proyectan las líneas de coordenadas de la superficie de la Tierra en un plano tangente a ella. Los paralelos se representan como circunsferencias concéntricas y los meridianos son rectas que aparecen como radios de estas circunsferencias.

Azimutal polar (normal)

Azimutal oblicua

Fig. 94 Plano tangentes a la superficie terretre

b) **Proyecciones estereográficas**. Se cree que la idea original corresponde a Hiparco (200 a.n.e.), siendo divulgada posteriormente por Ptolomeo en un libro titulado Planisferio. Es, sin embargo, Johan Werner quien en el año 1514 emplea por primara vez este tipo de proyección para representaciones del globo terráqueo en las que tomaba a Nuremberg como centro del cuadro y colocando el punto visual en las antípodas. Puede decirse que la normal es prácticamente la única que se usa y fundamentalmente en aviación. Pertenecen las de esta clase al grupo de las conformes, siendo su propiedad fundamental, además de preservar los ángulos, la de que todo círcu lo de la esfera queda representado en el mapa también por un círculo.

Proyecciones por desarrollo

La figura de proyección corta o es tangente al elipsoide o la esfera en un punto, una línea o un círculo como se muestra en el siguiente gráfico:

En este lugar, donde la figura de proyección se corta o es tangente al elipsoide la deformación es cero y son conocidos en la literatura especializada con diferentes denominaciones, tales como:

- paralelo principal.
- paralelo estándar
- punto central.
- meridiano principal.
- circulo sin deformaciones.
- otros.

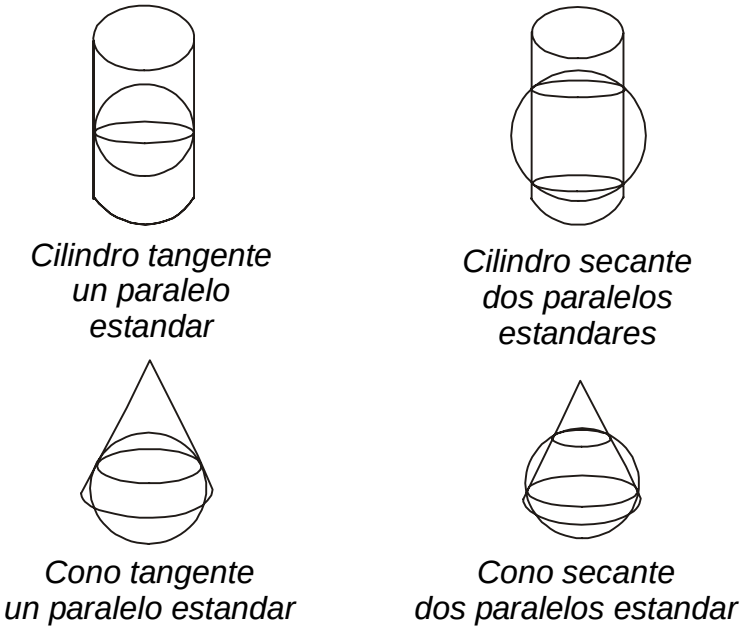
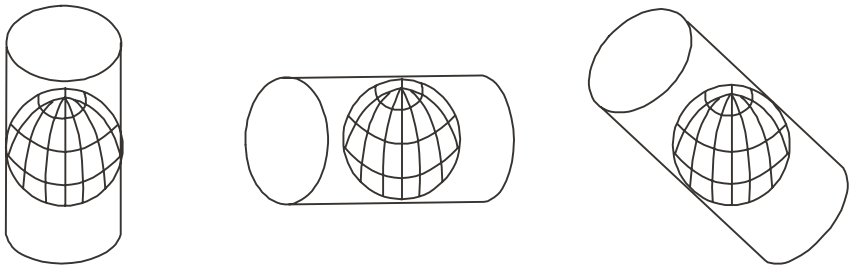


Fig.95 Cono cilindrico tangentes y secante a la superficie de la Tierra

a) Proyecciones cilíndricas

Cuando la figura sobre la que se realiza la proyección de la esfera (o el elipsoide) es un cilindro, que posteriormente es desarrollado, la proyección recibe el nombre de cilíndrica. El cilindro puede tocar la esfera terrestre alrededor del ecuador, a lo largo de una línea de longitud o bien en cualquier posición oblicua. El principal inconveniente de la proyección cilíndrica es que da lugar a una gran distorsión norte - sur y por tanto frecuentemente es objeto de modificaciones y adaptaciones. Han sido muy empleadas para mapas de regiones ecuatoriales y para mapamundis, entre otros.



Cilíndrica normal *Cilíndrica tranversa* *Cilíndrica oblicua*

En el año 1512 nació, en Rupelmonde, Gerhard Kremer, más conocido por Mercator, famoso cartógrafo a quien se debe una de las más conocidas proyecciones que lleva precisamente su nombre. Mercator modificó la proyección cilíndrica haciendo que en el sentido de las latitudes el cilindro único fuese sustituido por una serie infinita de los mismos, tangentes a lo largo de toda la superficie. al desarrollarlos sólo se tiene en cuenta el crecimiento de las latitudes, conservándose la separación entre meridianos constantes e igual a la correspondiente al cilindro tangente en el ecuador.

b) Proyecciones cónicas.

En el grupo de las cónicas se hace coincidir al eje de un cono de revolución con un diámetro de laTierra y sobre su superficie se proyectan los distintos puntos del globo, desarrollándose el cono seguidamente. Cuando coinciden el eje del cono con la línea de los polos la proyección se llama **normal (o polar)**, resultando los meridianos líneas concurrentes en el polo y adoptando los paralelos la forma de arcos de circunferencia. Se denomina **transversa** siempre que el eje del cono sea un diámetro del círculo máximo determinado por el ecuador, y oblicua si el eje tene una posición distinta de las anteriores.

Hay muchas variantes y dan lugar a numerosas modificadas, siendo la más importante de éstas la conforme de Lambert en la que se supone al cono penetrando algo en la superficie terrestre, teniéndose por tanto, dos paralelos de contacto, y siendo así menor la distorsión en toda la zona, incluso nula en algunos paralelos. Esta proyección tiene la ventaja de que se usa la misma escala de distancias en cualquier punto del mapa con un error despreciable.

Las proyecciones cónicas son aconsejables sobre todo para territorios ubicados en latitudes medias que no tengan una gran extensión en el sentido norte - sur.

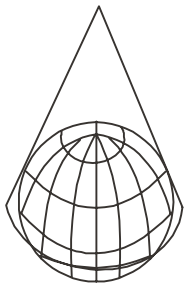


Fig. 97 Cónica normal

c) Proyecciones policónicas

En las proyecciones policónicas se supone a la superficie terrestre dividida en segmentos delimitados por paralelos equidistantes, construyéndose el mapa usando para cada segmento las distintas cónicas puras que se obtienen a partir de los conos tangentes a los mismos.

El meridiano rectilíneo central y los meridianos son curvas simétricas en relación con el meridiano central.

Elección de la proyección más conveniente para una aplicación

La correcta selección de la proyección cartográfica tiene gran importancia tanto para la creación de un mapa, como para su posterior uso.

Para realizar la elección de la proyección es preciso tener presentes tres consideraciones principales.

1. El propósito o destino del mapa.

2. La situación geográfica de la zona, o sea si está ubicada en latitudes esféricas, medias o tropicales.

3. La extensión de la zona, es decir, si es grande, pequeña, y si es alargada por los paralelos o por los meridianos.

Si queremos realizar un mapa de algún tipo de distribución, por ejemplo, de la densidad demográfica, se deberá prestar una máxima atención al mantenimiento del área, en cambio si el propósito del mapa es para la navegación la primera consideración será el mantenimiento de la dirección, es decir de la orientación.

Sin embargo, a veces, bastante frecuentemente por cierto, es necesario llegar a una combinación de todas propiedades cuando se trata de atlas o series de mapas, combinación que debe conseguir un máximo de eficiencia, por esta razón se han calculado diferentes proyecciones que intentan combinar y compensar las áreas, las dimensiones, la orientación y la escala con un mínimo de distorsión.

En dependencia de la cercanía en que se encuentre el territorio a mapificar de estos lugares que son elegidos por el cartográfo, las deformaciones serán menores o mayores. La forma del territorio y su orientación influyen mucho también al elegir una u otra proyección, aunque el criterio más importante para la elección de la proyección lo aporta la tarea práctica que se pretende resolver con el mapa que se proyecta.

La elección de la proyección constituye y será siempre una de las tareas principales a realizar por el cartográfo. La proyección y la red tienen importancia no sólo para la compilación de la carta sino también para la futura solución de diferentes tareas con ayuda del mapa.

En la elección de una proyección para la solución de un problema concreto hace falta conocer bien:

1. Las características generales del mapa a crear.

2. El objetivo.

3. La escala.

4. La composición, forma de la red, dimensiones del marco, la posición del polo; etc.

5. Distribución del territorio.

6. Configuración del territorio a mapificar.

En la práctica para la mapificación de territorios polares se emplean proyecciones azimutales normales. Para los mapas de territorios ubicados en latitudes medias y alargados longitudinalmente se recomiendan proyecciones cónicas. Para las zonas ecuatoriales alargadas longitudinalmente se emplean proyecciones cilíndricas y pseudocilíndricas.

En el caso de territorios de forma redondeada se emplean proyecciones azimutales oblicuas con el punto central en el centro del territorio.

Para los territorios alargados meridionalmente se emplean proyecciones cilíndricas transversas y policónicas. En los casos de territorios extendidos a lo largo de círculos menores y mayores oblicuos de la superficie del elipsoide se usan proyecciones cilíndricas y cónicas oblicuas.

En las cartas náuticas y de navegación aérea se emplean generalmente cartas en proyección Normal Cilíndrica Conforme de Mercator. Para la confección de cartas astronómicas se usan proyecciones azimutales perspectivas.

Hasta aquí se han tratado en términos generales algunos aspectos de la elección de la proyección más conveniente para casos muy comunes. La elección de la proyección exacta para un caso específico requiere de un estudio detallado y de conocimientos profundos de las proyecciones cartográficas, de sus ventajas y desventajas y debe estar siempre orientada a la tarea que se requiere resolver con ayuda del mapa.

4.3 Descripción detallada de las proyecciones cartográficas más utilizadas

Proyecciones conformes o isogónicas. Las proyecciones conformes son las que conservan iguales los ángulos. En las cartas confeccionadas en esta proyección se conserva la similitud de las figuras infinitamente pequeñas, correspondientes a las figuras en el terreno como resultado de la cual no existe la deformación de los ángulos . Al mismo tiempo las dimensiones lineales y las áreas de las figuras serán deformadas (Fig. 98) .

Las principales propiedades de estas proyecciones son:

a) La igualdad de ángulos de la carta con los ángulos correspondientes en el terreno. Esto permite realizar la medición directa de los ángulos y la medición de las direcciones con ayuda del transportador de tres brazos.

b) La escala particular en cualquier punto en la carta en todas las direcciones es constante, lo que permite realizar directamente la medición y ploteo de distancias pequeñas en la regíon de este punto. Simbolizando la escala por el meridiano m y por el paralelo por n se puede determinar la condición matemática de las proyecciones conformes.

c) La escala particular en el paso de un punto a otro varía, lo que conlleva a la deformación de las longitudes y áreas. Esto significa que dos círculos iguales en la superficie terrestre se representan por círculos de dimensiones diferentes en el plano de proyección.

Para considerar la variación de la escala cuando se miden distancias considerables, éstas se miden por partes.

La conformidad de las proyecciones y la facilidad comparativa de las mediciones y ploteo de las distancias fundamentaron la amplia utilización de las proyecciones isogónicas en la confección de las cartas náuticas (por ejemplo la proyección Mercator, Hauis).

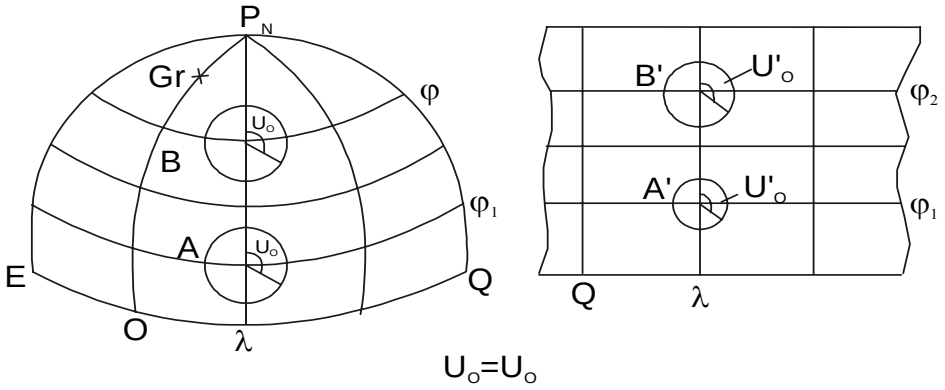


Fig. 98 Proyección conforme

4.4 Proyecciones equivalentes

Se llama **proyección equivalente** a la proyección que conserva la proporcionalidad entre las áreas de las figuras en la carta y la localidad, donde la escala de las áreas en los límites de la carta es constante.

Las proyecciones equivalentes poseen las siguientes propiedades:

a) A las áreas iguales entre si en la carta corresponden áreas iguales entre si en la localidad. Esto permite realizar la medición de las áreas de los sectores de la superficie de la Tierra y compararlos entre sí.

En este caso la propiedad equivalente no depende de las dimensiones de la región proyectada;

b) La similitud de las figuras en la proyección y en la localidad no se conservan, lo que trae consigo la deformación de los ángulos y las longitudes.

La escala en el punto dado en diferentes direcciones es una magnitud variable.

Esto significa que dos círculos en la superficie de la Tierra, situados en diferentes latitudes y que poseen áreas diferentes S_{k1} y S_{K2} se representan en la proyección por elipses equvalentes de diferentes formas, cuyas áreas son respectivamente iguales S_{E1} y S_{E2}, es decir $S_{E1} = S_{K1}$ y $S_{K2}=S_{E2.}$

De esta forma la condición matemática de las proyecciones equivalentes tendrá la forma:

donde: $$p=\frac{S_E}{S_K}=1, \qquad (64)$$

p - deformación de las áreas.

Las proyecciones de Lambert y Bon se relacionan a las proyecciones equivalentes.

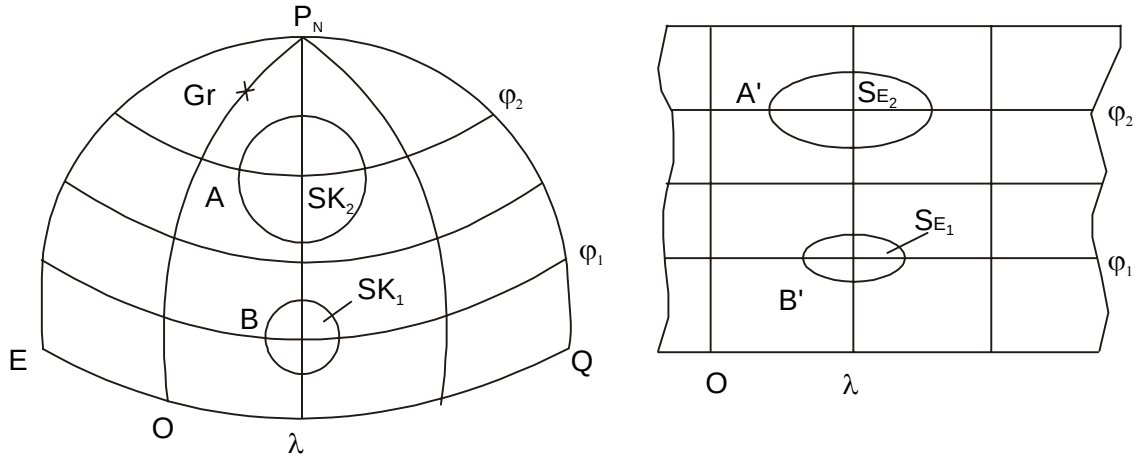


Fig.99 Proyección equivalente

4.5 Proyecciones equidistantes

Las proyecciones equidistantes son aquellas proyecciones que conservan la escala por una de las direcciones principales, por ejemplo por uno de los paralelos o meridianos. Esto significa que un círculo infinitamente pequeño en la superficie de la Tierra se representa en el plano de proyección por una elipse infinitamente pequeña, uno de cuyos semiejes es igual al radio del círculo representado (Fig. 100).

La condición matemática de las proyecciones equidistantes tiene la forma.

$$a = r_o \text{ ó } b = r_o$$

A las proyecciones equidistantes le son parcialmente propias tanto las propiedades de las proyecciones equivalentes, como de las proyecciones isogónicas.

Así por ejemplo, ante la condición $b = r_o$ en el punto dado en la dirección del semieje menor de la elipse no existen las deformaciones de los ángulos y en la dirección del semieje mayor las deformaciones de las áreas (p = 1).

En la práctica de la navegación se utilizan las proyecciones equidistantes de Kavraiski y Soloviov.

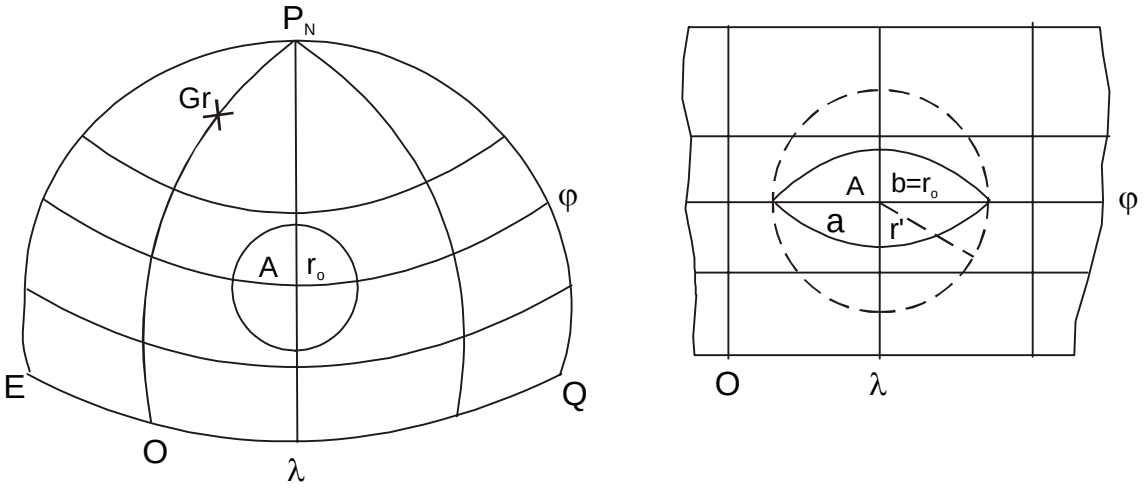


Fig. 100 Proyección equidistante

4.6 Proyecciones azimutales o zenitales

En las proyecciones azimutales, la superficie de laTierra es proyectada sobre un plano (pp) el cual es tangente a ésta. El punto de tangencia se denomina **punto central de proyección** (Z). El punto desde el cual la superficie de la Tierra es proyectada sobre el plano tangente a ésta se denomina **punto** de **proyección** (o) (Fig. 101).

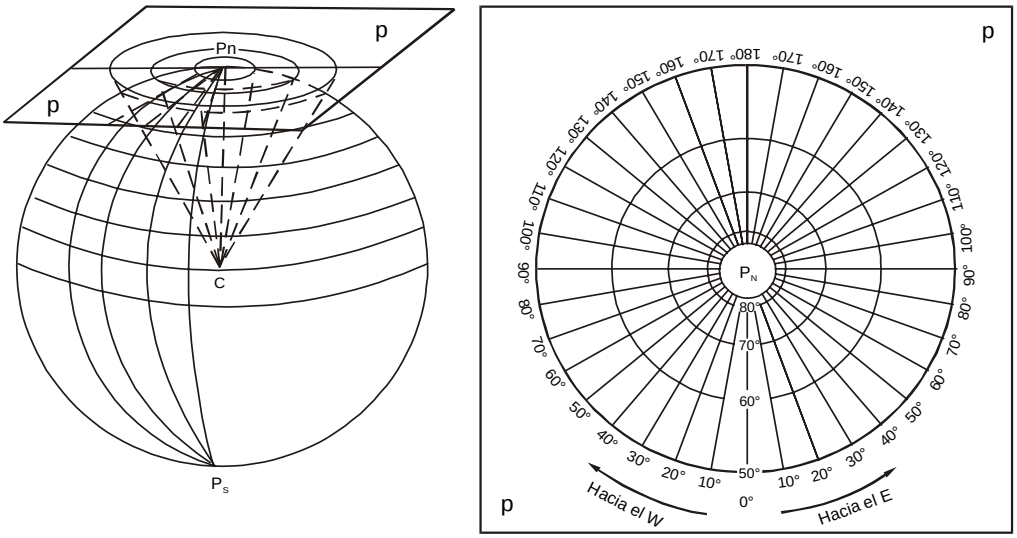


Fig. 101 Proyección azimutal

Colocando el punto de proyección en diferentes puntos de la línea vertical Zn podemos obtener los diferentes tipos de proyecciones azimutales.

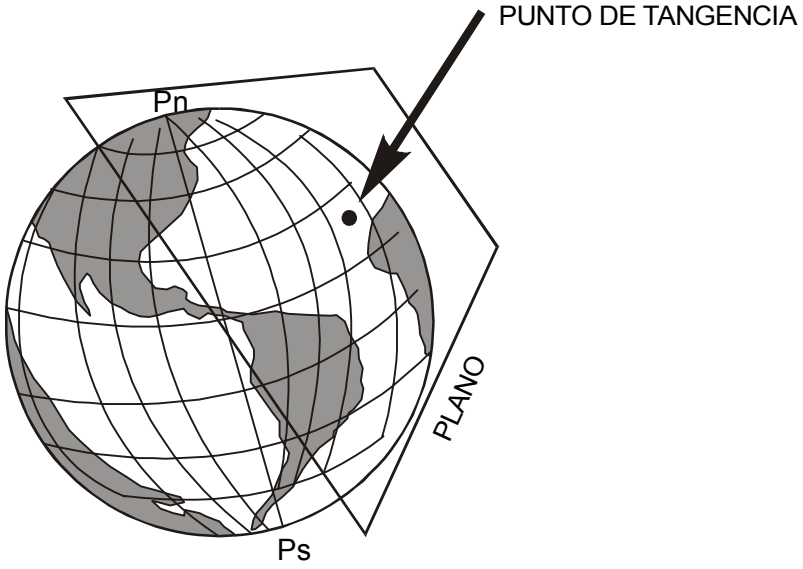


Fig.102a Proyección gnomónica

Proyección gnomónica

Esta proyección se obtiene si proyectamos los meridianos y paralelos de latitud desde el centro de la Tierra en un plano tangente a la misma en un punto dado. (Fig. 102a).

Los meridianos aparecen como líneas rectas que convergen hacia el polo (Fig. 102b) y paralelos de latitud como curvas no paralelas, cóncavas hacia el polo. La distorción aumenta con la distancia al punto de tangencia y es de tal naturaleza, que las direcciones, así como las distancias no pueden madirse directamente sobre la carta como sucede con la carta de proyección Mercator. Sin embargo, un, método de determinación distancia por el circulo máximo y rumbo inicial es explicado en las cartas gnomónicas.

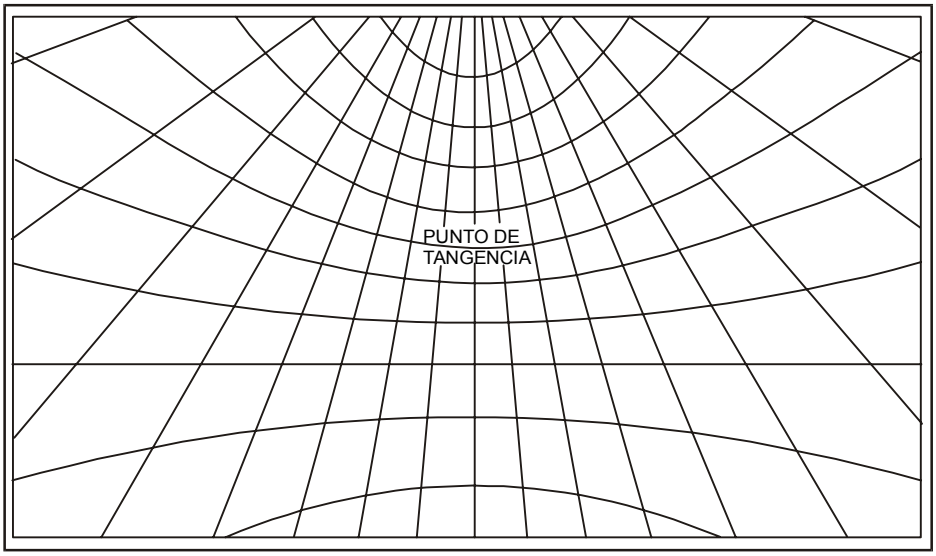


Fig. 102b Carta gnomónica

La principal ventaja de la carta gnomónica es que los círculos máximos se plotean como líneas rectas. Por lo que, con frecuencia es denominada carta de círculos máximos. En la práctica de navegación, las coordenadas de varios puntos a lo largo de la derrota son ploteados en una carta Mercator y unido entre si por líneas de rumbo o loxodrómica, apareciendo como una línea poligonal, proxima a una curva.

b) Proyección gnomónica normal (Polar)

En ella, por estar el plano de tangencia en el polo, los meridianos serán radios del círculo que limita la proyección y los ángulos que forman entre si, tienen dimensiones naturales o reales, los paralelos son círculos concéntricos (Fig. 103).

A pequeñas escalas es ampliamente utilizada por los marinos y pilotos en cartas que abarcan grandes extensiones territoriales ya que permite trazar las rutas o caminos optimos entre dos puntos distantes mediante rectas, de ahí su gran interés para la navegación aérea y marítima.

En tal punto de tangencia del plano con la esfera (único en el mapa) los ángulos medidos conservan su verdadera magnitud . A medida que nos alejamos del punto central la distancia entre los paralelos aumentan y el cambio de escala es rápido también, por lo que se producen grandes distorciones de las superficies distantes de dicho punto de tangencia. Como las deformaciones aumentan al disminuir la latitud es raro que se utilice para latitudes inferiores a 45°.

Es evidente que no se puede representar todo un hemisferio en proyección gnomónica y el ecuador no se puede representar jamás en un mapa gnomónico polar. Esta es la proyección por excelencia para la representación de los territorios polares.

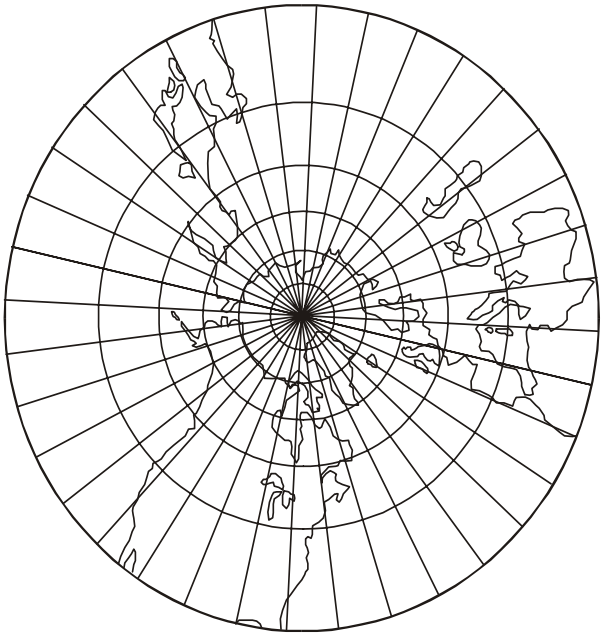


Fig. 103 Proyección gnomónica normal (Polar)

4.7 Proyecciones Cilíndricas

En las proyecciones cilíndricas la superficie de la Tierra es proyectada sobre un cilindro tangente al ecuador; el eje del cilindro y el eje terrestre coinciden. Después de la proyección, el cilindro es cortado por uno de sus meridiano y llevado a un plano. En esta proyección los meridianos y paralelos de la red

cartográfica se representan por líneas rectas perpendiculares entre si. En este caso la distancia entre los meridianos es proporcionala la diferencia de longitud y la separación de los paralelos del ecuador es una función de la latitud.

De esta forma, la ecuación de las proyecciones cilíndricas tendrá la forma:

$$X = f(\varphi) ; \qquad y = C\lambda \qquad (65)$$

donde y - distancia entre los meridianos
x - separación del paralelo respecto al ecuador.
C - coeficiente de proporcionalidad
λ - diferencia de longitud en la proyección
φ - latitud del paralelo dado

Variando la forma de la función $f(\varphi)$ y el valor del coeficiente de la proyección cilíndrica se le da la propiedad de igualdad de ángulos, dimensiones y o de distancias. Las proyecciones cilíndricas se obtienen mediante la proyección de la superficie de la esfera convencional en la superficie interior del cilindro tangente o secante (Fig. 104). Es necesario señalar que en la proyección hacia el cilindro tangente al ecuador, este último aparece en la proyección en forma de una linea recta. Es decir que la escala en la proyección a lo largo del ecuador será contante.

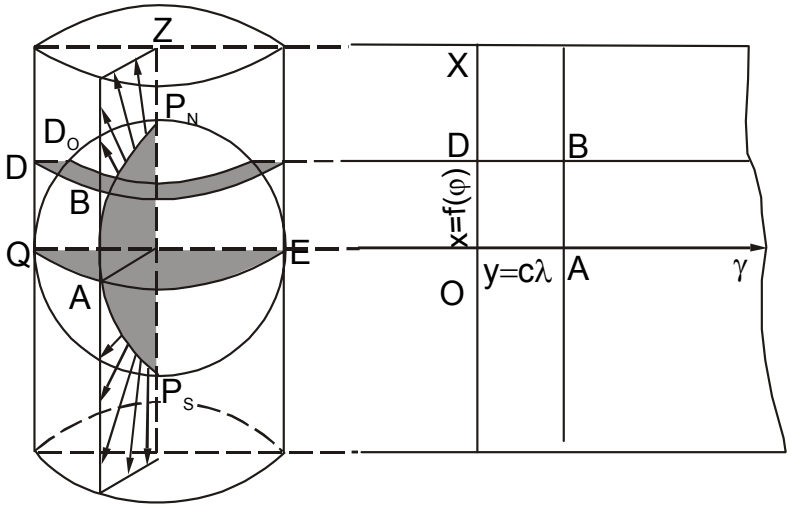


Fig. 104 Proyección cilíndrica

Cuando se proyecta en un cilindro secante, a la proyección sin deformaciones será trasladado el paralelo de corte, a lo largo del cual se mantiene la escala constante.

En dependencia del ángulo entre el eje del globo arbitrario (convencional) y el eje del cilindro y de la región de tangencia (corte) las proyecciones cilíndricas se dividen en:

- Proyección normal, cuando el cilindro es tangente al globo en el ecuador y sus ejes coinciden (proyección mercator) (Fig. 104).

- Proyección transversal, cuando el cilindro es tangente al globo en uno de sus meridianos y sus ejes son mutuamente perpendiculares, (proyección de Hauss).

- Proyección oblicua, cuando los ejes del cilindro y del globo forman un ángulo diferente de 0° y 90.

En las proyecciones cilíndricas oblícuas los meridianos y paralelos se representan por líneas curvas. La utilización de una u otra proyección cilíndrica se determina por su destino, la posición geográfica y la forma de la zona de la superficie de la Tierra que se va a proyectar.

4.8 Proyecciones cónicas

En el grupo de las cónicas se hace coincidir el eje de un cono de revolución con un diámetro de la Tierra y sobre su superficie se proyectan los distintos puntos del globo, desarrollándose el cono posteriormente (Fig.105).

Cuando coincide el eje del cono con la línea de los polos la proyección se llama normal (o polar), resultando los paralelos de la red cartográfica círculos concentricos y los meridianos por líneas rectas que forman los radios de los circulos. Los ángulos entre los meridianos en las proyecciones son proporcionales a las diferencia de longitudes en la localidad y los radios de los arcos de paralelos son funciones de la latitud, siendo las ecuaciones de las proyecciones cónicas como sigue:

$$\lambda = \alpha\lambda_o; \qquad \rho = f(\varphi) \qquad (66)$$

donde: λ - diferencia de longitud en la proyección.

λ_o - ángulo entre los meridianos en la localidad (diferencia de longitud en la localidad).

α - coeficiente de proporcionalidad (indicador en la proyección cónica)

ρ - Radio del paralelo

Variando la forma de la función $\rho = f(\varphi)$ se pueden obtener proyecciones equivalentes, conformes o equidistantes.

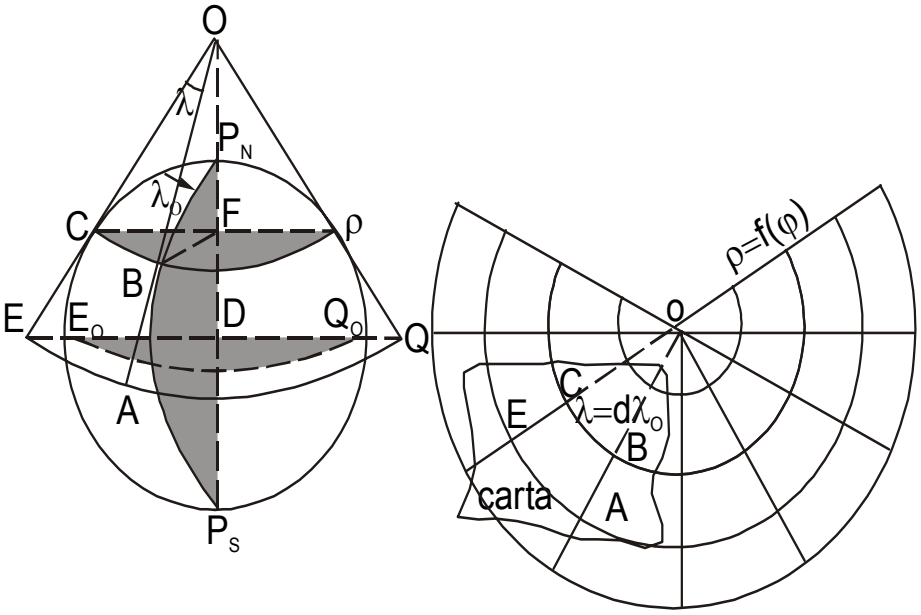


Fig. 105 Proyección cónica

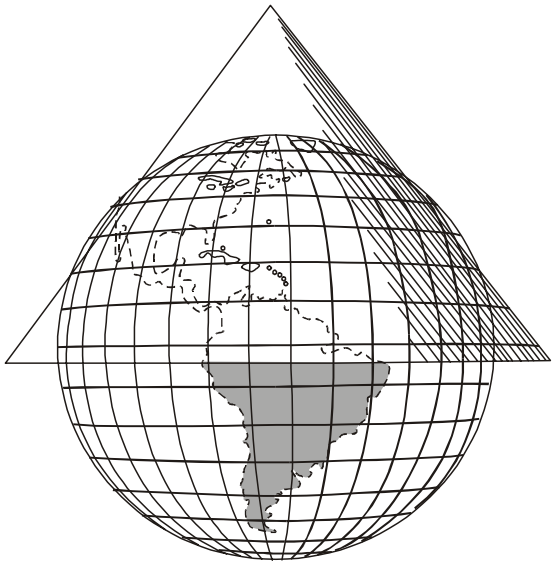


Fig 106a Proyección cónica

Existen muchas variantes y dan lugar a numerosas modificaciones, siendo la más importante de estas la proyección conforme de Lambert en la que se supone al cono penetrado en la superficie (cono secante) se supone al cono penetrado en la superficie terrestre teniéndose por tanto, dos paralelos de contacto, y siendo así menor la distorción en toda la zona, incluso nula en algunos paralelos.

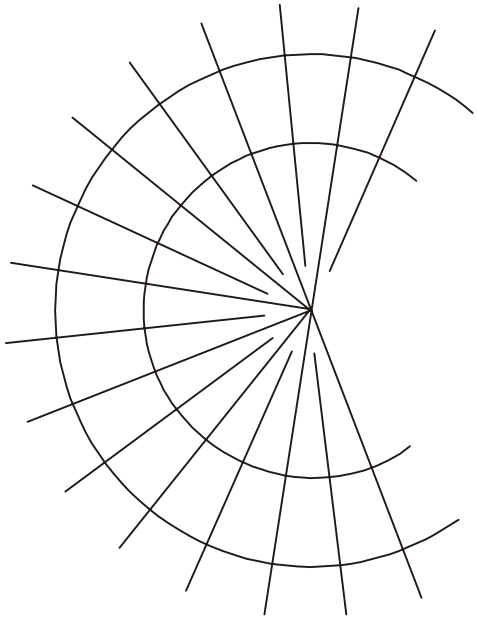


Fig.106b El cono desarrollado y hecho un plano para una carta conforme de Lambert

Las ventajas de la proyección conforme de Lambert son las siguientes:

1. La distorsión es comparativamente menor. No hay distorsión en los paralelos promedio. En la proyección conforme de Lambert de una carta de los Estados Unidos, tomando las latitudes de 33° y 45° como paralelos promedio, la máxima distorsión en el área comprendida entre los mismos es menor que el 0.5%. La mayor distorsión en la carta no excede al 2,33%.

2. Se puede usar la misma escala de distancia en cualquier parte de la carta, con un error despreciable.

3. Los meridianos y paralelos se cortan en un ángulo recto, y los ángulos formados por dos líneas cualesquiera en la superficie de la Tierra están correctamente representados en la carta.

4. Una Línea recta en la carta es aproximadamente un círculo máximo, lo que facilita grandemente el ploteo de marcaciones por radio.

5. Cartas adyacentes de una misma escala pueden colocarse una al lado de otra, para formar una carta que represente correctamente grandes áreas.

Las cartas de proyección conforme de Lambert se emplean principalmente en navegación aérea.

4.9 Proyección Cilíndrica Conforme Mercator

La gran mayoría de las cartas utilizadas en la navegación marítima y muchas de las cuales se utilizan en navegación aérea son confeccionadas, por medio de esta proyección, la distancia y la dirección pueden medirse facilmente.

Para obtener la proyección Mercator, es necesario que los meridianos y paralelos se representen en ella por líneas rectas que se intercepten formando un ángulo recto. Para esto los meridianos y paralelos del globo terráqueo se deben proyectar en la superficie interior del cilindro tangente al ecuador. Para obtener la representación plana de la superficie esférica del globo, coloquémoslo dentro del cilindro tangente de tal forma que el eje de rotación del globo coincide con el eje del cilindro (Fig. 107).

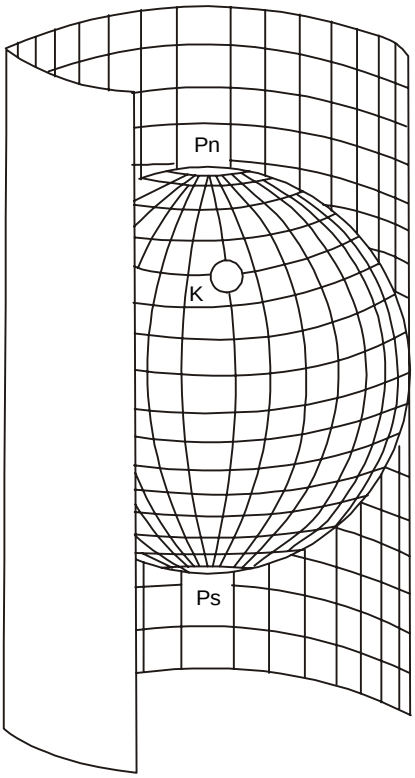


Fig. 107.

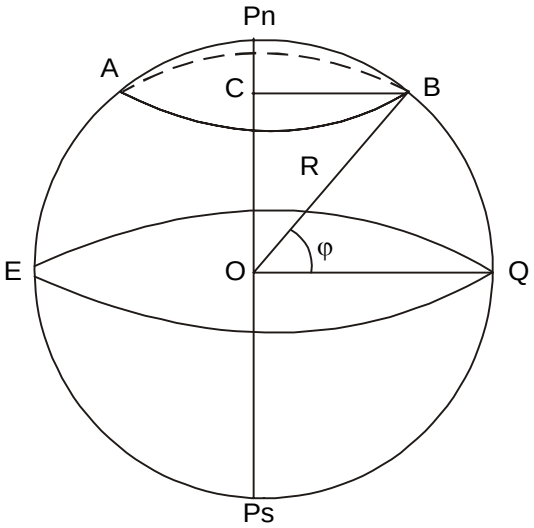


Fig. 108.

Ahora proyectamos los meridianos en la superficie interior del cilindro, utilizando el método de expansión. Entonces, los meridianos aparecen como líneas rectas paralelas entre sí. Posteriormente, la longitud de

los meridianos no varían y cada paralelo, al proyectarse en la superficie del cilindro, se extiende y alcanza una longitud igual a la del ecuador y paralela a él. De esta forma los paralelos cercanos al ecuador se extienden y con el aumento de la latitud del lugar se extenderán cada vez más.

Determinemos la relación entre la longitud del ecuador y la longitud del paralelo en cualquier latitud arbitraria φ, y consideramos a la Tierra como una esfera. Representemos al radio del paralelo AB por r (Fig. 108), y el radio de la Tierra por R. El ángulo BOQ es la latitud del paralelo AB. Del triángulo rectángulo BCO tendremos que:

$$r = R \cos \varphi$$

$$R = r \sec\varphi$$

Por lo tanto: $2\pi R = 2\pi r \sec \varphi$

o sea, la circunferencia del paralelo, multiplicada por la función de la latitud, de acuerdo a su longitud, es igual a la circunsferencia del ecuador. En otras palabras: los paralelos se expanden hasta la circunsferencia del ecuador y se alarga proporcionadamente a la secφ. Por ejemplo, en latitud 60° el paralelo terrestre trazado junto al ecuador, se extiende el doble, ya que la sec 60° = 2, mientras que el paralelo en la latitud 80° se extiende 5,8 veces. Esta proyección no puede extenderse hasta los polos, pues la secante de 90° (latirud del polo) es infinita. Luego si desarrollamos el cilindro, obtendremos en el plano una red rectangular de meridianos y paralelos distribuidos a iguales distancias unas de otros (Fig. 109).

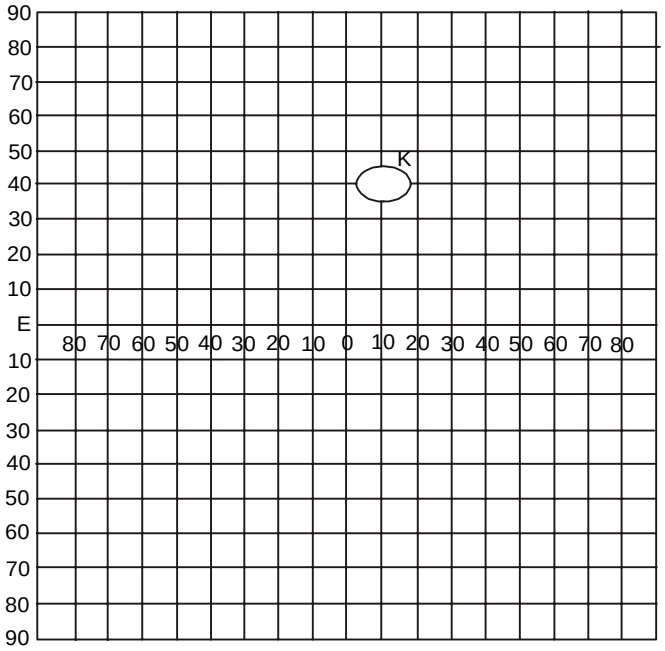


Fig.109

Los espacios en la red entre los meridianos serán iguales a los segmentos desarrollados del arco del ecuador que corresponde a la diferencia de longitud adoptada y los espacios en la red entre los paralelos serán iguales al arco desarrollado de los meridianos que corresponden a la diferencia de latitud asumida.

La proyección obtenida con esta red responderá solamente a un requisito: la línea de rumbo constante; la loxodrómica en esta proyección aparecerá como una línea, pero no será conforme ya que como resultado de la distorción de los paralelos, todas las figuras se extienden en dirección E-W. Por esta razón, el círculo infinitamente menor en el globo, se representa en la proyección obtenida como un elipsoide infinitamente menor extendido en dirección al paralelo. El semieje menor de la elipse obtenida será igual al radio del círculo en el globo. En la proyección cilindrica normal obtenida, los paralelos se extienden proporcionalmente a la secφ.

Para obtener una proyección conforme es necesario expandir tambien los meridianos proporcionalmente a la secφ , ya que la escala en la dirección del meridiano, no varío, mientras que por la dirección del paralelo aumentó.

Considerando la Tierra como una esfera equivalente al elipsoide terrestre, igualemos las escalas por el meridiano y el paralelo. Para lograr esto, es necesario aumentar respectivamente la escala por el meridiano sin variar éstas por el paralelo, o sea, expandir proporcionalmente a la distorción de los paralelos obtenidas en la red cartográfica (Fig. 110).

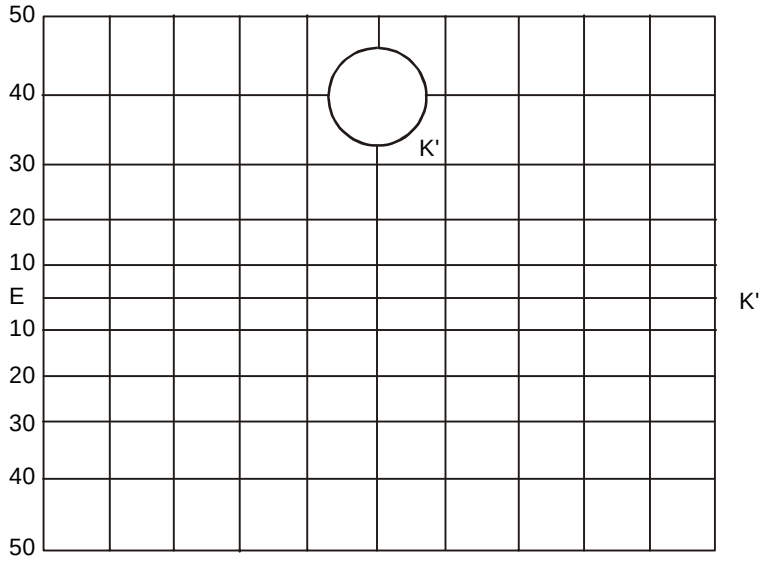


Fig.110

Ahora la elipse infinitamente menor en la proyección obtenida, se alarga en dirección del eje menor y toma la forma de un círculo semejante al globo , cuyo radio ahora será igual al semieje mayor, proporcional a la secφ tantas veces como el radio del círculo lo es al globo.

4.10 Requisitos exigidos en las cartas náuticas

1. Las cartas náuticas destinadas para la solución de las tareas de navegación deben cumplir las siguientes exigencias principales:

a) La trayectoria de movimiento del buque, que navega con rumbo constante debe representarse por una línea recta, y por consiguiente, forma un mismo ángulo con los meridianos de la red cartográfica.

Esta exigencia está fundamentada por que en la superficie esferica de la Tierra la derrota del buque consiste en una línea curva llamada loxodrómica.

b) La proyección cartográfica utilizada para la confección de las cartas náuticas debe ser conforme.

Esto es necesario para que con mayor rapidez y sin calculos complejos, se puedan trazar los rumbos medidos, las marcaciones y ángulos horizontales. Además la igualdad de ángulos de la proyección permite realizar el reconocimiento de las costas de acuerdo a su representación en la carta y viceversa. Las exigencias señaladas determinan la forma de las proyecciones cartográficas.

Realmente, si la loxodromia en la carta se representa por una línea recta que corta los meridianos con un mismo ángulo entonces deben aparecer como líneas rectas paralelas entre sí. Por lo que la forma de la retícula de las cartas debe representar una red rectangular de dos familias de rectas: los paralelos y los meridianos.

c) La proyección cartográfica debe dar un alto nivel de exactitud en los límites de la carta. O dicho de otra forma, las deformaciones de las distancia en cualquier punto de la carta deben ser lo menor posible.

La observación de esta exigencia simplifica y eleva la exactitud de medición y ploteo de distancia.

4.11 La loxodromia y sus ecuaciones en la superficie de la esfera y del elipsoide

La trayectoria de movimiento del buque que se traslada por la superficie de la Tierra con rumbo constante, se denomina loxodromia.

En la esfera la loxodromia se representa como una **línea de doble curvatura**, la cual corta a los meridianos con un mismo ángulo igual al rumbo del buque y en forma de espiral se aproxima al polo, pero nunca lo alcanza (Fig.111a).

Tomemos dos puntos en la superficie de la Tierra A y B situados como se muestra en la figura 111b y tracemos por ellos la loxodromia y el arco de círculo máximo (ortodromia).

La ortodromia es la distancia más corta entre dos puntos en la superficie terrestre y generalmente es mas corta que la loxodromia que pasa por estos puntos.

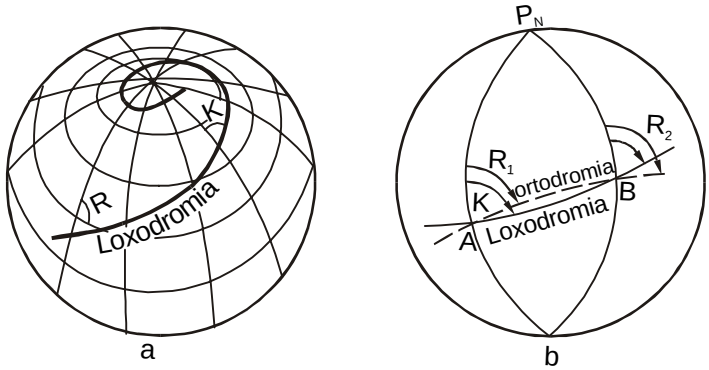


Fig. 111

A simple vista se puede llegar a la conclusión de que cualquier travesía o navegación debe realizarse siguiendo la ortodromia en aras de economizar tiempo. Sin embargo debido a que la ortodromia corta los meridianos con ángulos diferentes $(R_1 \neq R_2)$, al navegar por la misma es necesario variar constantemente el rumbo, lo que hace que desde el punto de vista práctico sea incomodo para el navegante. A su vez la diferencia de distancia (ganancia) entre la ortodromía y la loxodromia tiene un valor apreciable sólo

cuando existen grandes distancias entre los puntos de salida y llegada (aproximadamente varios cientos de millas).

Esta es la causa, por la que cuando se navega cortas distancias (400 - 600 millas) es más cómodo y sencillo navegar por loxodromia.

La loxodromia posee una serie de propiedades, que se pueden fijar deduciendo y analizando su ecuación.

Para deducir la ecuación de la loxodromia tomemos dos puntos A y B sobre la superficie terrestre (globo), cuya distancia es elementalmente pequeña (ΔS) (Fig. 112a).

Tracemos por estos puntos los paralelos y meridianos y analicemos el triángulo esférico elemental ABC, cuyó ángulo P_N AC es igual al rumbo del buque.

Debido a que los lados de dicho triángulo son pequeños este se puede considerar como un triángulo plano, por lo que podemos plantear que:(Fig 112a)

$$\tan R = \frac{BC}{AB} \qquad (67)$$

El cateto BC es igual al segmento de arco de paralelo en latitud o sea BC = $r\Delta\lambda$, donde r = radio del paralelo y $\Delta\lambda$ - diferencia de longitud elemental.

Del triángulo OO_1B (Fig. 112b) tenemos que

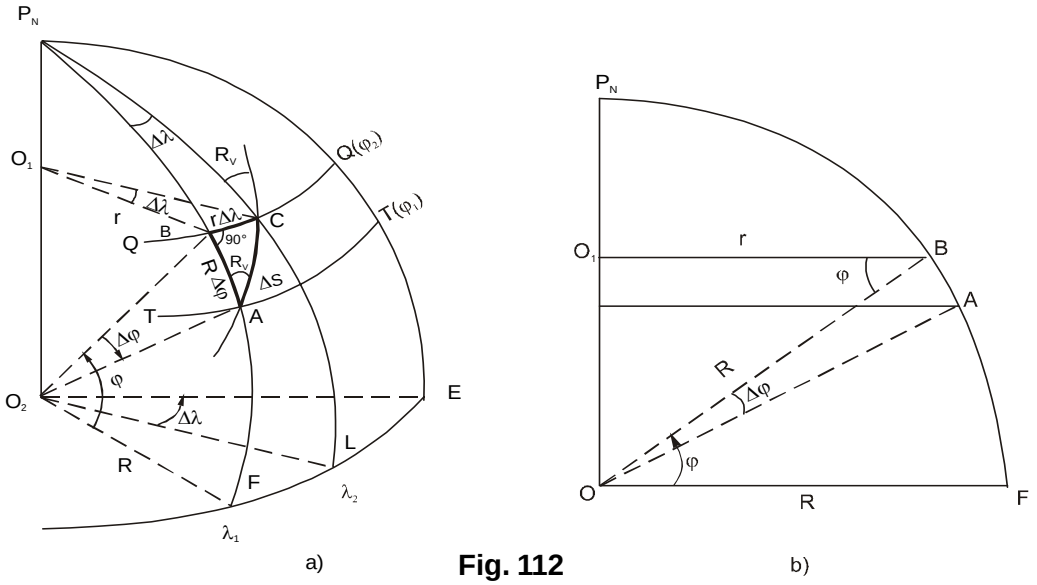


Fig. 112

$$r = R \cos \varphi$$

donde: $BC = R\,\Delta\lambda \cos \varphi$ (68)

El cateto representa un segmento de arco de meridiano cuando varia la latitud en $\Delta\varphi$.

$$AB = R\,\Delta\varphi \qquad (69)$$

Después de sustituir los valores de BC y AB en la fórmula (67) tendremos que:

$$\tan Rv = \frac{R\Delta\lambda\cos\varphi}{R\Delta\varphi} = \frac{\Delta\lambda\cos\varphi}{\Delta\varphi}$$

Sustituyendo los incrementos elementales por sus diferencias obtenemos:

$$\tan Rv = \frac{d\lambda\cos\varphi}{d\varphi}$$

donde: $$d\lambda = \frac{d\varphi\tan R}{\cos\varphi} \qquad (70)$$

Integrando la expresión (70) en los límites de φ_1, λ_1, hasta φ_2, λ_2 considerando tan Rv constante, tendremos

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda = \tan R_v \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{d\varphi}{\cos\varphi} \qquad (71)$$

El primer miembro de la ecuación (71) es la diferencia de longitud, es decir:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$$

La expresión que se encuentra dentro de la integral del segundo mienbro se transforma de la siguiente forma:

$$\frac{d\varphi}{\cos\varphi} = \frac{d\varphi}{\operatorname{sen}(90° + \varphi)} = \frac{d\varphi}{2\operatorname{sen}\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

Dividiendo el numerador y el denominador entre : $2\cos^2\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)$

$$\frac{d\varphi : 2\cos^2\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)}{2\operatorname{sen}\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right) : 2\cos^2\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)} =$$

$$= \frac{d\frac{\varphi}{2} : 2\cos^2\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)}{\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{d\frac{\varphi}{2}\sec^2\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)}{\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)} = \frac{d\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)}{\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

Por cuanto.

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{d\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)}{\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)}$$

en el numerador del integrando aparece el diferencial del denominador, la expresión integra como logaritmo:

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{d\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)}{\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)} = \ln\tan\left(45° + \frac{\varphi_2}{2}\right) - \ln\tan\left(45° + \frac{\varphi_1}{2}\right)$$

Por lo tanto la ecuación (70) tendrá la forma:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \tan R\left[\ln\tan\left(45° + \frac{\varphi_2}{2}\right) - \ln\tan\left(45° + \frac{\varphi_1}{2}\right)\right] \qquad (72)$$

Esta expresión representa la ecuación de la loxodromia en la esfera terrestre.

Para deducir la ecuación de la loxodromía en la superficie del elipsoide terrestre, se debe tener presente el achatamiento de la Tierra.

Hallamos valores de los catetos BC y AB considerando los radios de curvatura de los paralelos y meridianos, para lo cual sustituyamos R por N (4) en la fórmula (68) y R por M (3) en la fórmula (69), obteniendo que:

$$BC = \frac{a\Delta\lambda\cos\varphi}{\left(1 - e^2 sen^2\varphi\right)^{1/2}}; \qquad AB = \frac{a(1-e)^2\Delta\lambda}{\left(1 - e^2 sen^2\varphi\right)^{3/2}}.$$

sustituyendo estas expresiones en la fórmula (359) tendremos:

$$\tan R_v = \frac{a\Delta\lambda\left(1 - e^2 sen^2\varphi\right)^{3/2}\cos\varphi}{\left(1 - e^2 sen^2\varphi\right)^{1/2}(1-e)^2\Delta\varphi} = \frac{\left(1 - e^2 sen^2\varphi\right)\Delta\lambda\cos\varphi}{(1-e)^2\Delta\varphi}.$$

Sustituyendo los incrementos $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$ por sus diferenciales $d\varphi$ y $d\lambda$, por analogía con la expresión (70) obtenemos:

$$d\lambda = \tan R_v \frac{\left(1 - e^2\right)d\varphi}{\left(1 - e^2 sen^2\varphi\right)\cos\varphi}. \qquad (73)$$

Integrando esta expresión entre los límites φ_1, λ_1 (punto A) y φ_2, λ_2 (punto B) y considerando tan R_v= const..; obtenemos la ecuación de la loxodromia en la superficie del elipsoide terrestre:

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \tan R_v\left[\ln\tan\left(45° + \frac{\varphi_2}{2}\right)\left(\frac{1 - esen\varphi_2}{1 + esen\varphi_2}\right)^{\frac{e}{2}} - \ln\tan\left(45° + \frac{\varphi_1}{2}\right)\left(\frac{1 - esen\varphi_1}{1 + esen\varphi_1}\right)^{\frac{e}{2}}\right]. \qquad (74)$$

Si suponemos, que la loxodrómica corta al ecuador en un punto determinado A cuyas coordenadas son $\varphi_1 = 0°$, $\lambda_1 = \lambda_2$, siendo las coordenadas de un punto arbitrario $\varphi_2 = \varphi$ y $\lambda_2 = \lambda$ (Fig. 113), entonces la ecuación de la loxodrómica para la esfera toma la forma:

$$\lambda - \lambda_0 = \tan R_v \ln\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right);$$

$$\lambda = \lambda_0 + \tan R_v \ln\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right), \qquad (75)$$

para el elipsoide:

$$\lambda = \lambda_0 + \tan Rv \left[\ln \tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)\left(\frac{1 - e\,\mathrm{sen}\varphi}{1 + e\,\mathrm{sen}\varphi}\right)^{\frac{e}{2}} \right].$$

La interpretación física de la ecuación (75) consiste en lo siguiente.

Si se conoce la longitud del punto de corte del ecuador por la loxodromía, entonces dando diferentes valores de latitud (φ, ...φ_n), se pueden obtener las longitudes de los puntos de la loxodromía (λ .....λ_n).
Ploteando los puntos de acuerdo a estas coordenadas en la esfera y uniéndolos por una línea curva obtenemos la loxodromía.

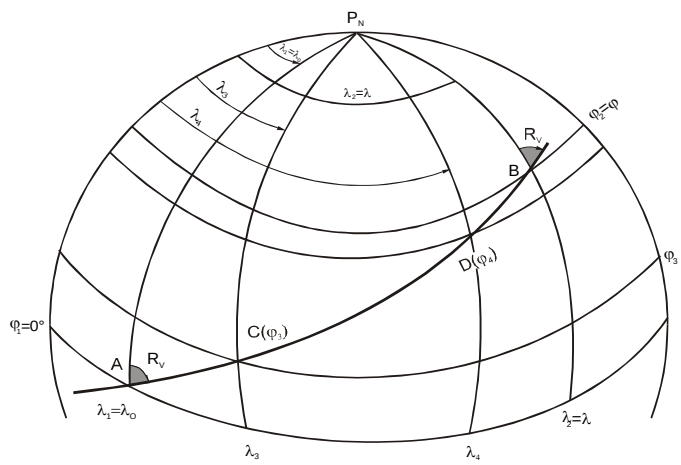


Fig. 113 Para el análisis de la ecuación de la loxodrómica

Analicemos la ecuación de la loxodromía para comprender sus propiedades en la esfera.

En los rumbos $R_v = 0°$ ó $R_v = 180°$ el primer miembro de la ecuación tiende a cero (ya que tan 0° = tan 180° = 0). Esto significa que $\lambda_2 - \lambda_1 = 0$ ó $\lambda_1 = \lambda_2$, o sea, en el proceso de la navegación la longitud no varía.

Por consiguiente en los rumbos 0 y 180° la loxodromía coincide con los meridianos, transformándose en un arco de círculo máximo que pasa por ambos polos.

Escribamos la ecuación de la loxodromía (72) en la forma:

$$\tan Rv = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\ln \tan\left(45° + \frac{\varphi_2}{2}\right) - \ln \tan\left(45° + \frac{\varphi_1}{2}\right)}. \qquad (76)$$

Para Rv = 90° ó Rv = 270° la posición tiende a infinito $\left(\tan 90° = \tan 270° = \infty\right)$, que es posible si el denominador es igual a cero, ya que $\lambda_2 - \lambda_1$, es una magnitud finita.

$\ln \tan\left(45° + \frac{\varphi_2}{2}\right) - \ln \tan\left(45° + \frac{\varphi_1}{2}\right) = 0$, lo que significa que $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$, es decir la latitud durante la navegación no varía.

Por lo tanto en los rumbos 90° y 270° la loxodromía se convierte en un círculo menor que coincide con los paralelos y cuando $\varphi_1 = \varphi_2 = 0°$ se transforma en un circulo máximo, coincidiendo con el ecuador.

Si a la ecuación (75) se dan diferentes valores de latitud, se puede obtener las longitudes correspondientes de los puntos que se encuentran en la loxodromía. De aquí se deduce que en rumbos diferentes de 0 y 270° la loxodromía cortará los paralelos una vez solamente (Fig 114).

Mostremos la ecuación (75) en la forma.

$$\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right) = e^{(\lambda - \lambda_0)\cot R}. \qquad (77)$$

Si ahora asumimos diferentes valores de longitudes en la ecuación (77), cada una de las cuales se diferencia de la anterior en la magnitud 2π, es decir, λ_1, $\lambda_1 + 2\pi$, $\lambda_1 + 4\pi$, $\lambda_1 + 6\pi$, etc.,entonses se puede obtener diferentes puntos de latitud (φ.....φ_v), que se encuentran en la loxodromía.De esto se deduce, que en rumbos que se diferencian de 90 y 270, la loxodromía corta cada meridiano un sin número de veces, Interrumpidamente se acerca a los polos pero nunca lo alcanza. (excepto en los rumbo 0 y 180°) P_NA en los puntos B (φ_2, $\lambda_1 + 2\pi$), C (φ_3, $\lambda_1 + 4\pi$), D (φ_4, $\lambda_1 + 6\pi$), y así sucesivamente.

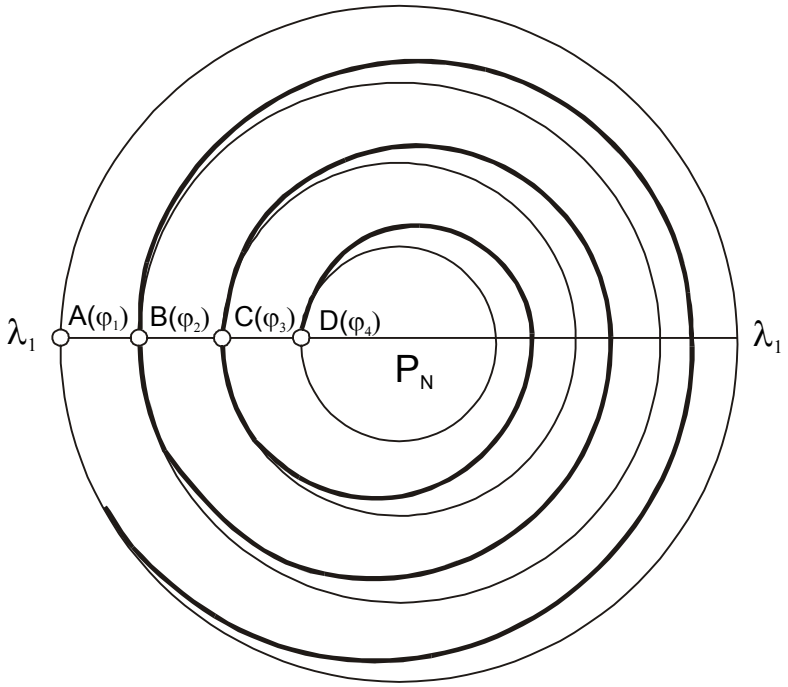


Fig. 114 Para el análisis de la ecuación de la loxodromía

En la figura 114 está mostrado que para longitudes λ_1, $\lambda_1 + 2\pi$, $\lambda_1 + 4\pi$, $\lambda_1 + 6\pi$, etc., la loxodromíca corta los meridianos Pn A en los puntos B φ_2, $\lambda_1 + 2\pi$), C(φ_3, $\lambda_1 + 4\pi$), D(φ_4, $\lambda_1 + 6\pi$),etc.

4.12 Ecuación general de las proyecciones cilíndricas

Como ya se señaló anteriormente, las proyecciones cilíndricas (en este caso normal) se obtiene como resultado de la proyección de la superficie interior del cilíndro con la condición de que sus ejes coincidan.

En este método de proyección las líneas de coordenadas en esta última se muestran:

- los meridianos por líneas paralelas entre sí
- los paralelos por líneas rectas paralelas perpendiculares a los meridianos.

La ecuación de cualquier proyección cilíndrica tiene la forma:

- ecuación de los paralelos $x = f(\varphi)$
- ecuación de los meridianos $y = C\lambda$

donde: x - distancia por el meridiano entre el ecuador y el paralelo.

y - distancia por el ecuador desde el meridiano inicial hasta los meridianos.

c - coeficiente de proporcionalidad, del cual depende la distancia entre los meridianos.

En este tipo de proyección la distancia desde el ecuador así como la distancia entre los paralelos se determinan por las condiciones planteadas durante la confección de las cartas, o sea por el tipo de función $f(\varphi)$. En este caso la distancia entre los paralelos situados en diferentes latitudes pueden ser diferentes.

La distancia entre los meridianos contiguos en cualquier latitud será la misma e igual a las distancias entre ellos en el ecuador. Esto se explica porque los paralelos en la proyección se alargaron y se hicieron iguales, en toda su longitud, al ecuador, al mismo tiempo que los meridianos fueron proyectado al plano de proyección sin variar su longitud.

Se conoce que la longitud del paralelo en la latitud φ, y la longitud del ecuador están relacionados por la expresión $2\pi r = 2\pi R \cos\varphi_1$, donde, r - radio del paralelo, R - radio de la Tierra (esfera).

Suponiendo que $2\pi r = 2\pi R \cos\varphi_1$, entonces la proyección de cualquier paralelo se alarga en $\sec\varphi_1$ veces. Una de las propiedades pricipales de cualquier proyección cartográfica es el carácter de varaición de la escala.

Para explicar el carácters de esta variación de la escala en las proyecciones cilíndricas determinamos las escalas en las direcciones principales perpendiculares entre sí: los paralelos y meridianos.

Tomemos en la superficie de la esfera arbitraria un trapecio infinitamente pequeño $A_oB_oC_oD_o$ (Fig. 115) y traslademos éste hacia el plano (carta) en la escala principal $\mu = 1 : 1$. En el plano este trapecio se muestra como rectángulo infinitamente pequeño $A_1B_1C_1D_1$ partiendo de la definición general de escala, escribamos la escala por el meridiano $m = \frac{A_1D_1}{A_0D_0} = \frac{dx}{dx_0}$ pero del triangulo A_oD_oO $dx_0 = Rd\varphi$, entonces

$$m = \frac{dx}{Rd\varphi}$$

La escala por el paralelo $n = \frac{A_1B_1}{A_0B_0} = \frac{dy}{dY_0}$ pero del triángulo $O_1A_oB_o$ $dy_o = rd\lambda$, y del triángulo OO_1A_o $r = R\cos\varphi$, por eso $dY_0 = Rd\lambda\cos\varphi$ y finalmente $n = \frac{dy}{Rd\lambda\cos\varphi}$

Ya que en la proyección todos los paralelos se alargan hasta la longitud del ecuador de la esfera arbitraria es decir $dy = Cd\lambda$, entonces escala por el paralelo se determina por la expresión

$$n = \frac{dy}{dY_0} = \frac{Cd\lambda}{Rd\lambda\cos\varphi} = \frac{C}{R}\frac{1}{\cos\varphi} = \frac{C}{R}\sec\varphi. \qquad (78)$$

De la fórmula (78) se observa que la escala por el paralelo depende del coeficiente C, el cual determina la distancia entre los meridianos.

Esta magnitud se obtiene partiendo de las siguientes consideraciones.

En latitud 0°, n = 1, ya que la longitud del arco de ecuador de la esfera arbitraria se traslada a la proyección sin deformaciones (la así llamada proyección hacia el cilindro tangente al ecuador). Por consiguiente la escala en el ecuador será:

$$1=\frac{C}{R}\sec 0°=\frac{C}{R} \quad \text{ó} \quad .\,C=R \text{ entonces } n=\sec\varphi \tag{79}$$

De esta forma en las proyecciones cilíndricas la escala por los paralelos a medida que se alejan del ecuador aumenta proporcional a secφ. La proyección obtenida se relaciona a los tipos de proyecciones conforme (isogónicas), ya que los meridianos son trasladados al plano de proyección sin deformaciones, lo que significa que la escala a lo largo de éstos se mantiene constante.

Realmente $dx = dx_o$,

donde $m=\frac{dx}{dx_0}=1.$

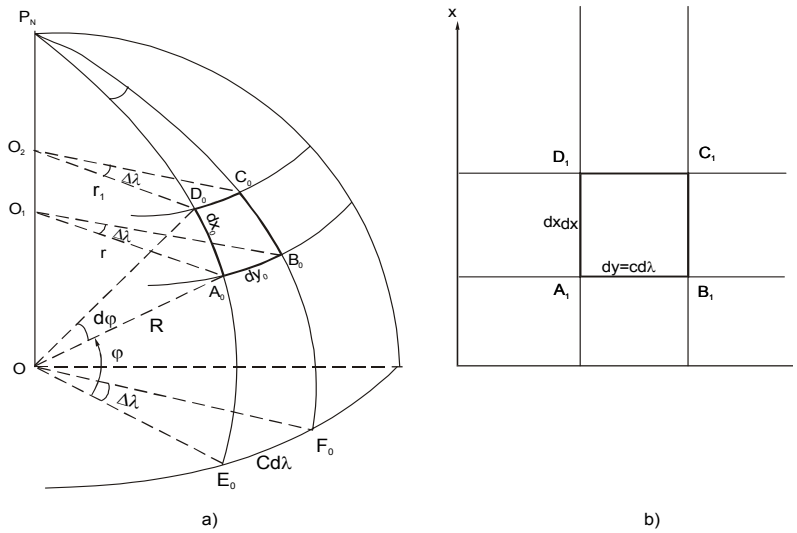


Fig. 115 Variación de la escala en la proyección Mercator

En otros tipos de proyecciones cilíndricas los meridianos se trasladan al plano de proyección con distorciones lo que origina la variación de la escala por el meridiano.

Como la igualdad de ángulo de distancia o de dimensiones de las proyecciones cilíndricas se determina por la forma de la función f(φ), el carácter de variación de la escala por el meridiano se determina por la forma de la propia funcíon.

4.13 Ecuaciones principales de la proyección Mercator para la esfera y el elipsoide

La principal proyección cartográfica utilizada para la construcción de las cartas náuticas es la proyección Mercator.

La proyección Mercator por el carácter de distorción pertenece al tipo de las proyecciones conforme y por la forma de la red cartográfica normal es una proyección cilíndrica.

Como se señaló anteriormente, en cualquier proyección cilíndrica la escala por el meridiano se determina

por la forma de la función f(φ) y por el paralelo aumenta proporcionalmente a la sec φ (en la escala del ecuador es igual a uno).

Evidentemente para adicionar a la proyección cilíndrica la igualdad de ángulo es necesario dar a la función f(φ) tal valor, para el cual la escala por las direcciones principales, es decir por los paralelos y meridianos, se hagan iguales.

La interpretación física de esta acción consiste en que en la proyección los meridianos en cada uno de sus puntos se alargan en la misma magnitud que se alargan los paralelos en estos mismos puntos o sea, en secφ veces).

Con otras palabras, es necesario sin variar la escala por el paralelo aumentar en secφ veces la escala por el meridiano. En este caso la elipse infinitamente pequeña en la proyección se transforma en una circunferencia infinitamente pequeña en la esfera arbitraria. El radio de esta circunferencia es igual al semieje mayor de la elipse, es decir, en secφ veces mayor que el radio de la circunsferencia en la esfera arbitraria (Fig. 116).

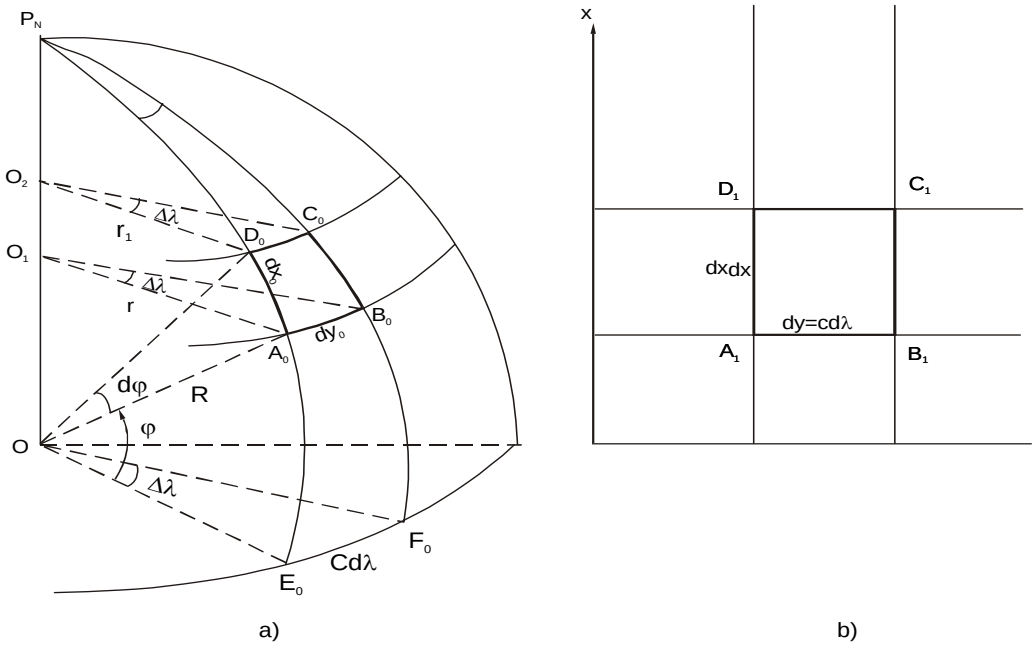


Fig. 116 Adición de la propiedad de igualdad de ángulo a la proyección cilíndrica

Para deducir la ecuación de la proyección Mercator utilizaremos las ecuaciones generales de las proyecciones cilíndricas: y = Cλ y x = f (φ).

Debido a que el coeficiente de proporcionalidad C es igual R, en la escala principal μ_o la ecuación de los meridianos de la proyección Mercator tendrá la forma:

$$y = \mu_o R \text{ arc } 1'\lambda' \qquad (80)$$

donde: y - distancia por el ecuador desde el meridiano inicial hasta el meridiano λ'.

Para establecer la forma de la función x = f(φ) igualamos las escalas en las direcciones principales m = n y sustituyendo sus valores obtenemos:

$$\frac{dx}{dx_0} = \frac{dy}{dy_0}; \quad \frac{dx}{Rd\varphi} = \frac{dy}{Rd\lambda\cos\varphi}$$

pero $dy = Cd\lambda$

Entonces:

$$\frac{dx}{Rd\varphi} = \frac{Cd\lambda}{Rd\lambda\cos\varphi} \quad ó \quad \frac{dx}{d\varphi} = \frac{C}{\cos\varphi},$$

donde:

$$dx = C\frac{d\varphi}{\cos\varphi}. \qquad (81)$$

Integrando la expresión (81) respecto a las variables x y φ, tendrenos que:

$$\int_0^x dx = C\int_0^\varphi \frac{d\varphi}{\cos\varphi}.$$

Transformando correspondientemente el integrando $\frac{d\varphi}{\cos\varphi}$, se puede escribir :. $x = C\ln\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)$

Sustituyendo C por R en la escala principal μ_o, obtenemos la ecuación de los paralelos de la proyección Mercator.

$$x = \mu_0 R\ln\tan\left(45° + \frac{\varphi}{2}\right) \qquad (82)$$

donde: x - distancia por el meridiano desde el ecuador hasta el paralelo φ.

De esta forma, si representamos en el plano del ecuador ($\varphi_o = 0°$) y el meridiano inicial ($\lambda_o = 0°$) y luego en las distancias determinadas por las ecuación es (80) y (82) se trazan los paralelos y meridianos, se puede obtener una red en la proyección cilíndrica normal equidistante Mercator.

En la deducción de las ecuaciones de la proyección Mercator para el elipsoide terrestre, en lugar de r (radio de la esfera) se sustituye los valores de los radios de curvatura de los meridianos y paralelos M y N.

Entonces:

$$y = \mu_o \text{ a arc } 1'\lambda' \qquad (83)$$

donde: $d_o = Md\varphi$; $dY_o = Nd\lambda \cos\varphi$

$$m = \frac{dx}{Md\varphi} = \frac{dx\left(1 - e^2 sen^2\varphi\right)^{\frac{3}{2}}}{a\left(1 - e^2\right)d\varphi}.$$

pero $dy = ady$, ya que el elipsoide terrestre por analogia con la esfera $C = a$, entonces

$$n = \frac{ad\lambda\left(1 - e^2 sen^2\varphi\right)^{\frac{1}{2}}}{ad\lambda\cos\varphi} = \frac{\left(1 - e^2 sen^2\varphi\right)^{\frac{1}{2}}}{\cos\varphi},$$

Igualando las escalas tenemos:

$$\frac{dx\left(1-e^2sen^2\varphi\right)^{\frac{3}{2}}}{a\left(1-e^2\right)d\varphi}=\frac{\left(1-e^2sen^2\varphi\right)^{\frac{1}{2}}}{\cos\varphi},$$

donde: $$dx=\frac{a\left(1-e^2\right)d\varphi}{\left(1-e^2sen^2\varphi\right)\cos\varphi}. \qquad (84)$$

Integrando la expresión (84) respecto a las variables φ y x:

$$\int_0^x dx=a\int_0^\varphi\frac{\left(1-e^2\right)d\varphi}{\left(1-e^2sen^2\varphi\right)}\frac{d\varphi}{\cos\varphi}.$$

donde, expresando **a** en la escala principal μ_o, tendremos que:

$$x=\mu_0 a\ln\tan\left(45°+\frac{\varphi}{2}\right)\left(\frac{1-esen\varphi}{1+esen\varphi}\right)^{\frac{e}{2}}. \qquad (85)$$

La distancia (x) por el meridiano desde el ecuador hasta el paralelo dado φ se debe expresar en unidades constantes.

Para esto se utiliza la longitud del arco de ecuador:

pe = a arc 1' = 1855, 356 metros

Evidentemente para que la magnitud x en la ecuación (85) se exprese en minutos ecuatoriales es necesario expresar la magnitud a en estas unidades.

La distancia por el meridiano desde el ecuador hasta el paralelo dado expresada en minutos del ecuador se denomina parte meridional de este paralelo (PM ó D = x).

Suponiendo que p_e = 1', a' = $\frac{1}{arc1'}=$ 3437,7468, la ecuación (85) se escribe de la siguiente forma:

$$x=3437{,}7468'\ln\tan\left(45°+\frac{\varphi}{2}\right)\left(\frac{1-esen\varphi}{1+esen\varphi}\right)^{\frac{e}{2}}. \qquad (86)$$

Para convertir los logaritmos naturales a los logaritmos vulgares, el primer miembro de la ecuación (86) se divide por el "módulo de converción".

Mod = 0,434294

Entonces la parte meridional del paralelo en el elipsoide se determina por la expresión.

$$D=7915{,}70447'\log\tan\left(45°+\frac{\varphi_2}{2}\right)\left(\frac{1-esen\varphi}{1+esen\varphi}\right)^{\frac{e}{2}}, \qquad (87)$$

y para la esfera

$$D = 7915{,}70447' \log \tan\left(45° + \frac{\varphi_2}{2}\right) \qquad (88)$$

La tabla (TUN) está confeccionada por la fórmula (87) y la tabla 2 de las tablas cartográficas. La distancia por el meridiano entre los paralelos, expresada en minutos, se llama **diferencia de partes meridionales** (DPM ó ΔPM):

$$\Delta PM = PM_2 - PM_1 \quad ó \quad \Delta D = D_2 - D_1$$

donde: PM_2 - partes meridionales del paralelo en la latitud φ_2

PM_1 - partes meridionales del paralelo en la latitud φ_1

El signo de ΔPM de dos puntos es el mismo que la diferencia de la latitud.

Ejemplo φ_1= 58°10,0'N φ_2= 58°50,0' N. Calcular ΔPM

φ_2.....PM_2 = 4370,0' por la tabla 3 (TUN)
φ_1.....PM_1 = 4293,6'
$\Delta PM = +$ 76,4'

Si en la carta de proyección Mercator se trazan los paralelos cada un minuto de latitud ($\Delta\varphi$ = 1'), la diferencia de partes meridionales de estos paralelos representan la longitud de arco de meridiano expresado en minutos de ecuador. Tal Dpm se denomina milla mercatoriana y repreasenta gráficamente un minuto de meridiano (**milla náutica**) en la latitud dada.

La milla mercatoriana se da en los marcos laterales de la carta en forma de escala lineal y se utiliza para la medición de las latitudes y distancias al trabajar en la carta.

4.14 Variación de la escala en la proyección Mercator

Para la conservación de la igualdad de los ángulos al construir las redes cartográficas en la proyección Mercator los meridianos se alargan proporcinalmente a la secφ de la misma forma que los paralelos. Como consecuencia de esto las dimensiones lineales de la milla mercatoriana en diferentes latitudes será diferente.

Para $\varphi = 60°$: 1' de arco de meridiano =1milla mercatoriana =1,997 millas ecuatoriales;

Para $\varphi = 30°$: 1' de arco de meridiano =1milla mercatoriana =1,148 millas ecuatoriales, o sea en $\varphi = 60°$ una milla mercatoriana es 1, 74 veces mayor, que en $\varphi = 30°$

Por consiguiente cuanto mayor sea la latitud más se alargará el meridiano para conservar la igualdad de ángulo y significa que 1' de arco de meridiano (una milla mercatoriana) se representará por un segmento mayor.

De esta forma, la escala de la carta, conservando en todas las direcciones de un punto dado el valor constante, variará al pasar de un punto a otro. Por eso al medir la distancia en la carta es necesario utilizar la escala lineal de aquella latitud, donde se realizan las mediciones.

Determinemos el carácter de variación de la escala en la proyección Mercator, para lo cual compararemos entre sí las escalas particulares en diferentes partes de la carta.

Considerando que en la carta de proyección Mercator las escalas por las direcciones principales son iguales, se pueden comparar las escalas de la punta A_o y C_o tanto por los paralelos como por los meridianos (Fig. 116) particulares en diferentes partes de la carta.

La escala en el punto A' en la proyección por el paralelo φ_1 es igual:

$$n_1 = \frac{A'B'}{A_oB_o} = \frac{ad\lambda}{r_1 d\lambda} = \frac{a}{r_1} = \frac{a}{N_1 \cos\varphi_1} \qquad (89)$$

donde $ad\lambda$ - largo del segmento representado en la proyección, igual al segmento correspondiente de ecuador (a - radio ecuatorial).

$V_1 d\lambda$ – longitud correspondiente de ecuador en la esfera arbitraria en la latitud φ_1;

$N_1 \cos\varphi_1$ – radio de curvatura del paralelo φ_1.

En la fórmula (89) se observa que a lo largo del paralelo A'B' la escala no variará, ya que las magnitudes a, r_1 y φ_1 son constantes. Al variar la latitud el radio del paralelo variará (disminuye con el aumento de la latitud) y la magnitud del radio ecuatorial se mantendrá constante, lo que conlleva al aumento de la escala.

Por analogía obtenemos la escala en el punto C' para el paralelo con latitud φ_2:

$$n_2 = \frac{C'D'}{C_0D_0} = \frac{ad\lambda}{r_2 d\lambda} = \frac{a}{r_2} = \frac{a}{N_2 \cos\varphi_2}. \qquad (90)$$

Para la comparación de las escalas en los puntos A' y C' tomemos la relación:

para el elipsoide

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{a}{N_2 \cos\varphi_2} \cdot \frac{a}{N_1 \cos\varphi_1} = \frac{N_1 \cos\varphi_1}{N_2 \cos\varphi_2}; \qquad (91)$$

para la esfera

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{R\cos\varphi_1}{R\cos\varphi_2} = \frac{r_1}{r_2} \quad \text{ó} \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{\cos\varphi_1}{\cos\varphi_2}. \qquad (92)$$

demos los valores $n_1 = \mu_1 = \frac{1}{C_1}$ (escala particular en la latitud φ_1);

$n_2 = \mu_2 = \frac{1}{C_2}$ (escala particular en latitud φ_2).

Entonces

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{1 : C_2}{1 : C_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{r_1 arc1'}{r_2 arc1'} \qquad (93)$$

Pero r_1 arc 1' y r_2 arc1' es la longitud de 1' de arco de los paralelos correspondientes y se toma de la tabla 2 de las tablas cartográficas. Con el aumento de la latitud el radio de los paralelos disminuye: $r_2 < r_1$, lo que significa que la relación C_1 / C_2 aumenta, siendo esto posible sólo aumentando C_2.

Si C_2 - denominador de la escala particular en el paralelo - disminuye , significa que la propia escala aumenta.

De esta forma, en la carta de proyección Mercator al aumentar la latitud la escala aumenta.

Se puede llegar a la misma conclusión si se comparan las escalas de los puntos A' y C' por los meridianos, ya que m = n.

4.15 Concepto de paralelo principal

En la construcción de las cartas en la proyección Mercator se crea una escala principal μ_o, relacionando ésta con el ecuador o con otro paralelo cualquiera.

El paralelo, al cual está relacionada la escala principal se llama **paralelo principal**.

La interpretación física del paralelo principal consiste en que la esfera arbitraria se proyecta en un cilindro secante y no en el cilindro tangente. El paralelo dado para el corte será el paralelo principal (AoBo) (Fig. 117)

En tal método de proyección el paralelo principal se traslada de la superficie del globo arbitrario hacia el plano de proyección sin deformaciones, es decir, la escala en él es igual a la escala principal: $n_o = \mu_o$.

El resto de los paralelos, y entre ellos el ecuador, serán deformados en el plano de proyección.

De la Fig. 117 se puede observar que los paralelos situados en latitudes mayores al paralelo principal se alargan (FoLo = FL = AoBo) y las escalas en ellos aumentan: $n_1 > n_2$. Los paralelos, cuyas latitudes son menores que la latitud del paralelo principal se acortan (CoDo = CD = AoBo) y las escalas en ellos disminuyen: $n_2 < n_o$.

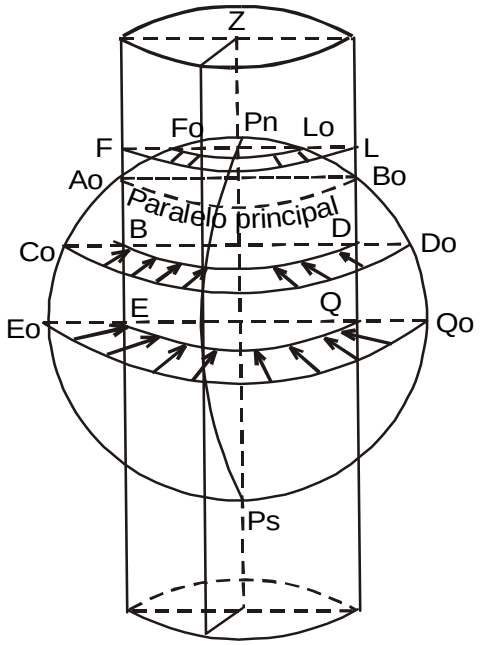


Fig. 117 Paralelo principal

Tradicionalmente en la confección de las cartas náuticas se toma como paralelo principal el paralelo medio del mar (región del oceáno). A tal paralelo principal se le denomina estandar.

Por ejemplo, para el mar negro el paralelo principal estandar es el paralelo 44° y para el Mar de Japón 40°, etc.

La confección de las cartas de una zona marítima determinada en la escala , al paralelo principal estandar permite solapar éstas, ya que las escalas particulares en las mismas latitudes serán iguales.

A veces se hace necesario calcular la escala en cualquier punto de la proyección por el paralelo φ_1, conociendo la escala por el paralelo principal φ_o.

Para la comparación de las escalas por los paralelos φ_o y φ_1 hallamos su relación:

$$\frac{n_1}{n_0}=\frac{R\cos\varphi_0}{R\cos\varphi_1}=\frac{r_0}{r_1}(paralaesfera).$$

suponiendo

$$n_1=\frac{1}{C_1}\ y\ n_0=\frac{1}{C_0}$$

donde C_1 - denominador de la escala particular por el paralelo φ_1;

C_o - denominador de la escala principal por el paralelo principal φ_o.

tendremos

$$\frac{r_0}{r_1}=\frac{1:C_1}{1:C_0}=\frac{C_0}{C_1} \qquad (94)$$

La relación entre los denominadores de la escala principal y la escala particular se llama **módulo del paralelo**:

$$\frac{C_0}{C_1}=\nu \qquad (95)$$

De donde

$$C_1=\frac{C_0}{\nu} \qquad (96)$$

De esta forma dividiendo el denominador de la escala principal por el módulo del paralelo se puede obtener la escala particular de cualquier paralelo.

Para calcular el módulo del paralelo multipliquemos y dividamos el primer miembro de la igualdad (94) el arc 1', $\frac{r_0 arc1'}{r_1 arc1'}=\frac{C_0}{C_1}=\nu$, es decir . Pero r_o arc 1' = p_o y r_1 arc 1' = p_1 representan la longitud de 1' del paralelo principal φ_0 y φ_1 el paralelo dado y pueden ser hallados de la tabla 2 de las tablas cartográficas.

Entonces: $\nu=\frac{\rho_0}{\rho_1}$ (97)

Ejemplo. Calcular la escala particular en el paralelo 46,0°.

Solución 1. En la tabla 2 de las tablas cartográficas:

p_o = 1336792 mm;
p_1 = 1291077 mm.

2. $\nu = \frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{1336792}{1291070} = 1{,}0354.$

3. $C_1 = \frac{C_0}{\nu} = \frac{200000}{1{,}0354} = 1{,}93162$, es decir $\mu_1 = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{19362}$.

Concluyendo señalemos que el módulo del paralelo es una magnitud inversa al aumento de la escala.

Realmente:

$$C = \frac{C_1}{C_0}; \tag{98}$$

$$\nu = \frac{C_0}{C_1}, \tag{99}$$

es decir $\nu = \frac{1}{C}$.

La escala particular se puede calcular por otros métodos.

Sin considerar el achatamiento de la Tierra se puede plantear:

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{R\cos\varphi_0}{R\cos\varphi_1} = \frac{\cos\varphi_0}{\cos\varphi_1}. \tag{100}$$

Tomando los valores $n_1 = \frac{1}{C_1}$ y $n_0 = \frac{1}{C_0}$, tendremos:

$$\frac{1:C_2}{1:C_1} = \frac{\cos\varphi_0}{\cos\varphi_1}, \quad \frac{C_0}{C_1} = \frac{\cos\varphi_0}{\cos\varphi_1}.$$

donde

$$C_1 = C_0\frac{\cos\varphi_0}{\cos\varphi_1} = C_0\cos\varphi_0\sec\varphi_1. \tag{101}$$

Ejemplo. $\mu_0 = 1:C_0 = 1:300\,000$; $\varphi_0 = 60°$.

Calcular la escala por el paralelo φ_1 = 58,0°

Solución.

sustituyendo $C_1 = C_o \cos\varphi_o \sec\varphi_1$
= 300 000 cos 60° sec 58°
= 300 000x0,5 x 1, 88708 = 283062 (utilizando la calculadora)
C_1 = 283060, o sea $\mu_1 = 1:C_1 = 1:283062$

4.16 Cálculo y confección de las redes cartográfica Mercator y ploteo en ellas de los puntos de referencia y otras particularidades

Para el cálculo de la red cartográfica en la proyección Mercator se utiliza una magnitud constante llamada **unidad de la carta**. **(e)**.

La unidad de la carta es la longitud de un minuto de arco del ecuador del elipsoide terrestre en la carta en la proyección Mercator expresado en milímetros.

Debido a que en la proyección Mercator todos los paralelos se alargaron hasta la longitud del ecuador, la unidad expresa igualmente la longitud de un minuto de cualquier paralelo incluyendo el paralelo principal (φ_o).

Es conocido que en el terreno la longitud de un minuto de arco del ecuador del elipsoide terrestre es igual a p_o = a arc 1'.

En la proyección, considerando la escala, de longitud de 1' de arco de ecuador (y por consiguiente, de cualquier paralelo) se determina de la expresión.

$$e_{mm} = \frac{a\,arc}{C_e} = \frac{p_e}{C_e} = const, \qquad (102)$$

donde p_e - longitud de 1' de arco de ecuador;

C_e - denominador de la escala por el ecuador

En la confección de la carta se toma el paralelo principal φ_o y la escala principal μ_o= 1/Co.

Anotemos la expresión de la unidad de la carta para el paralelo principal dado y escala principal.

$$e_{mm} = \frac{N \cos \varphi_0 arc1'}{C_0} = \frac{p_0}{C_0}, \qquad (103)$$

donde N cos φ_o = r_o - radio de curvatura del paralelo principal;
C_o - denominador de la escala principal;
p_o - longitud de un mínuto del paralelo principal mm.

Por la fórmula (103) para los paralelos principales estandar está confeccionada la tabla 4 de las tablas cartográficas.

En el cálculo de las redes cartográficas en la proyección Mercator se dan:
- los paralelos límites φ_N y φ_S y los meridianos λ_E y λ_W de la porción proyectada de la superficie de la Tierra;
- la latitud del paralelo principal φ_o;
- la escala principal de la carta μ_o= 1/C_o.

El orden de cálculo de la red cartográfica es el siguiente:

1. Se calculan las dimensiones del marco de la carta:

- longitud del marco inferior (superior) en milimetros:

$$a_{mm} = e_c\,(\lambda_E - \lambda_W)'; \qquad (104)$$

- longitud de los marcos laterales en milimetros:

$$b_{mm} = e_c\,(D_N - D_S)'; \qquad (105)$$

donde e - unidad de la carta de la tabla 4;

D_N - D_S - diferencia de partes meridionales de los marcos norte y sur de la carta D_N y D_S se toman de la tabla 1;

λ_E y λ_W - diferencia de longitud en mínutos para los marcos este y oeste de la carta ($\Delta\lambda$).

Para el control se calcula la diagonal del marco de la carta:

$$d=\sqrt{a^2+b^2}. \qquad (106)$$

2. Se calculan los alejamientos de los meridianos intermedios λ_i respecto a los meridianos límites oeste y_i y este y'_i:

$$y_i = e_c\ (\lambda_i - \lambda_W)\ '; \qquad (107)$$

$$y'_i = e_c\ (\lambda_E - \lambda_i)'. \qquad (108)$$

donde λ_i - longitud de los meridianos intermedios.

Cuando los cálculos son correctos $y_i + y'_i = a_{mm}$.

Los meridianos intermedios por lo general se trazan con intervalos de $\Delta\lambda$ = 5' - 10' a una distancia de 150 - 200 mm uno del otro.

Para el ploteo de la escala de longitudes, el segmento inferior (superior) del marco de la carta entre los meridianos vecinos se divide en partes iguales, correspondientes por lo general a 1' de longitud.

3. Se calcula el alejamiento de los paralelos intermedios respecto al marco sur y norte x_i de la carta:

$$x_i = e_c\ (D_i - D_s)'; \qquad (109)$$

$$x'_i = e_c\ (D_N - D_i)', \qquad (110)$$

donde D_i - parte meridional del paralelo dado.

En los calculos correctos $x_i + x'_i = b_{mm}$.

Si los meridianos se pueden trazar con cualquier intervalo $\Delta\lambda$, los paralelos intermedios deben trazarse exactamente con determinados intervalos $\Delta\varphi$.

Esta situación se explica porque la longitud de un mínuto de meridiano (milla mercatoriana, que es la escala lineal) con el aumento de la latitud crece constantemente.

Por eso al situar la escala de las latitudes en el marco lateral de la carta sería necesario dividir estos segmentos de diferentes longitudes, lo que será más incomodo. Por eso primero se determina cierto intervalo de latitud $\Delta\varphi$, dentro del cual la variación de las dimensione lineales de la milla mercatoriana es tan pequeña que permite dividir el marco lateral de la carta en partes iguales, correspondiente al valor medio de la milla mercatoriana en el intervalo dado.

La magnitud $\Delta\varphi$ se calcula por la fórmula:

$$\Delta\varphi = \sqrt{\frac{C_1 \cot\varphi_1}{675}}, \qquad (111)$$

donde C_1 - denominador de la escala particular de la carta en la latitud φ_1;

φ_1 - latitud más próxima al polo del marco de la carta.

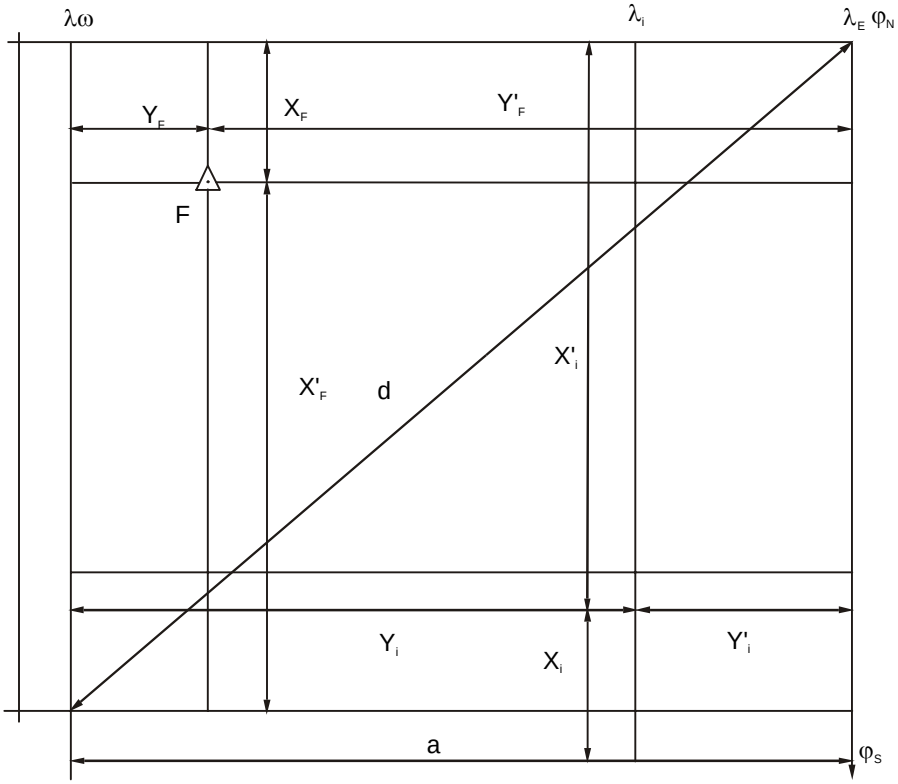


Fig. 118a Construcción de la red cartográfica Mercator

Por la fórmula (111) está confeccionada la tabla 6 de las tablas cartográficas. La magnitud obtenida de $\Delta\varphi$ siempre se aproxima hacia el lado menor hasta la magnitud múltiple de 5' o 10' y se toma en calidad de intervalos de latitud, a través del cual se trazan los paralelos intermedios.

4. Se calculan los alejamientos de los paralelos x_m y x'_m y los meridianos y_m y y'_m de los puntos de referencia y otras particularidades (línea de la costa, señales de profundidad etc) desde los marco correspondientes de la carta:

$$x_m = e_c\,(D_m - D_S)'; \qquad x'_m = e_c\,(D_N - D_m)'; \qquad (112)$$

$$y_m = e_c\,(\lambda_m - \lambda_W)'; \qquad y'_m = e_c\,(\lambda_E - \lambda_W)'. \qquad (113)$$

control:

$$x_m + x'_m = b;$$
$$y_m + y'_m = a.$$

En las separaciones calculadas se trazan los paralelos y meridianos y de esta forma se plotean en la carta los puntos de referencia y otros detalles de la costa y el mar, utilizando para ello los símbolos utilizados en cartográfia (Fig. 118a).

Resumiendo señalaremos, que los errores en los cálculos de la red cartográfica no deben superar la exactitud de las construcciones gráficas (0,2 mm).

Ejemplo. Calcular la red cartográfica en la proyección Mercator para la región limitada por los paralelos φ_s= 36°20,0'N; φ_N= 37°00,0'N y los meridianos: λ_W = 1°10,0'E y λ_E = 2°20,0E en la escala 1:200 000 por el paralelo principal 40°00,0'. Los paralelos y meridianos se trazan con intervalos de 20,0'. Colocar los puntos de referencia:

- faro Tenes φ = 33,0°'N; λ = 1°20,5' E;

- faro Shershel: φ = 36°36,9'N; λ = 2°11,3'E.

Solución. 1. Cálculo de las dimensiones del marco de la carta:

La unidad de la carta $e_c = \frac{p_0}{C_0}$; $p_0 = 142325$ se toma de la tabla 2*.

** Si no se dispone de la tabla 2 u otra similar, el cálculo se realiza utilizando la fórmula :*

p_o = N arc 1' cos φ_o (numerador de la fórmula (103))

donde:

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 sen^2\varphi}} \quad ó \quad N = \frac{a}{(1 - e^2 sen^2\varphi)^{1/2}}.$$

Datos: *a = 6378245 metros (eje mayor del elipsoide)*

b = 6356863 metros (eje menor del elipsoide)

$$e^2 = 0,0066934 \rightarrow \left(e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a} \text{excentricidad} \right)$$

Sustituyendo los valores en (4) tenemos:

$$N = \frac{6378245}{\sqrt{(1 - 0,00656934\ sen^2 40°)}} = \frac{6378245}{0,9986162668}$$

$$N = 6387083,018701$$

Cálculo de p_o

$$p_o = 6387083018,701\ arc\ 1'\ cos\ 40° \qquad \left(arc1' = \frac{1}{3437,7467} \right)$$

$$= \frac{6387083018,701}{3437,7467}\ cos40°$$

$$= 1423254,789$$

$$P_o = 1423255$$

****

$$e = \frac{1423275}{200000} = 7{,}11628 \text{ mm o por la tabla 4, de acuerdo a } \varphi = 40°00{,}0' \text{ y}$$

C_o = 200 000, e_c = 7,11628

a = e_c (λ_E - λ_W)' = 7 11628 (2°20,0' - 1°10,0') = 498, 1396 mm.

b = e_c (D_N -D_S)' = 7, 11628 (2378, 771' - 2304, 453) = 528, 868 mm.

$d = \sqrt{a^2 + b^2} = 726{,}5$ mm.

2. Cálculo de la separación de los meridianos del marco oeste de la carta

$y_i = e_c (\lambda_i - \lambda_W)$, e_c = 7,11628

λ_i	$\lambda_i - \lambda_W$	$y_i = e(\lambda_i - \lambda_w)_{mm}$
2°20,0’	70,0’	498,1’
2°00,0’	50,0’	355,8’
1°40,0’	30,0’	213,5’
1°20,0’	10,0’	71,2’
1°10,0’	-	-

3. Cálculo de la separación de los meridianos del marco este de la carta

$y'_i = e_c(\lambda_E - \lambda_i)$ e_c = 7,11628

λ_i	$\lambda_E - \lambda_i$	$y'_i = e(\lambda_E - \lambda_i)$	y_i	$a = y_i + y'_i$
2°20,0’	00,0’	-	498,1	498,10
2°00,0’	20,0’	142,30	355,8	498,10
1°40,0’	40,0’	284,60	213,5	498,10
1°20,0’	60,0’	426,98	71,16	498,14
1°10,0’	70,0’	498,74	-	498,14

4. Cálculo de la separación de los paralelos del marco inferior de la carta

$x_i = e_c (D_i - D_s)$ e_c = 7,11628

$\Delta\varphi$ = 20,4 $\approx$ 20' (tabla 6)

φ_i	D_i	D_s	$D_i - D_s$	$x_i = e(D_N - D_i)$
37°00,0’	2378,771’	2304,453’	74,318	528,9
36°40,0’	2353,891’	2304,453’	49,438	351,8
36°20,0’	2329,118’	2304,453’	24,665	175,5
36°20,0’	2304,453’	2304,453’	-	-

5. Cálculo de la separación de los paralelos del marco superior de la carta

$$x'_i = e_c(D_N - D_i) \qquad e_c = 7{,}11628$$

φ_i	D_i	D_N	$D_N - D_i$	$x'_i = e(D_N - D_i)$	x_i	$b = x_i + x'_i$
37°00,0’	2378,771’	2378,771’	-	-	-	528,9
36°40,0’	2353,891’	2378,771’	24,880	177,1	528,9	528,9
36°20,0’	2329,118’	2378,771’	49,653	353,4	351,8	528,9
36°00,0’	2378,453’	2378,771’	74,318	528,9	175,5	528,9

6. Cálculo de la separación de los meridianos de los puntos notable del marco oeste de la carta

$$Y_m = e_c(\lambda_m - \lambda_W); \qquad \lambda_W = 1°10{,}0'E$$

Punto notable	λ_m	$\lambda_m - \lambda_W$	$y_i = e(\lambda_m - \lambda_W)_{mm}$
Faro Tenes	001°20,5’	10,5’	74,7 mm
Faro Shershel	003°11,3’	61,3’	436,2 mm

7. Cálculo de la separación de los paralelos de los puntos notables del marco sur de la carta

$$x_m = e_c(D_m - D_s)_{mm} \qquad e_c = 7{,}11628$$
$$\varphi_S = 36°00{,}0'N$$

Puntos notables	φ_m	D_m	D_s	$D_m - D_s$	$x_m = e_c(D_m - D_s)_{mm}$
Faro Tenes	36°33,0’	2345,208’	2304,453’	40,755’	290,0’
Faro Shershel	36°36,9’	2345,044’	2304,453’	45,591’	324,4’

4.17 Confección de una carta Mercator dada las dimensiones del marco

Para confeccionar una carta Mercator, primero seleccione las dimensiones y proceda de la siguiente forma:

Trace una serie de líneas verticales para representar los meridianos, separados de acuerdo con la escala seleccionada.

Si la carta incluye el ecuador, la distancia a los diferentes paralelos desde éste son dados directamente de la tabla 26a (TUN), aunque es deseable convertir los valores tabulados a unidades más conveniente. Por tanto, si 1°(60') de longitud está mostrado como un centimetro, cada parte meridional será 1/60 ó 0, 01667 cm de longitud.

La distancia en centímetros de cualquier paralelo desde el ecuador es entonces determinado dividiendo sus partes meridionales por 60 ó multiplicando éstas por 0, 01667.

Si el ecuador no está incluido, en este caso se utiliza la diferencia de partes meridionales.

Frecuentemente se desea mostrar un área mínima en una carta limitada por sus dimensiones, en una escala lo más grande posible.

Por lo tanto la escala es establecida por las limitaciones.

Cuando la retícula ha sido confeccionada, los puntos notables a mostrar son localizada por medio de la escala de latitud y longitud.

Ejemplo: Se desea confeccionar una carta de proyección Mercator a escala máxima en una hoja de papel de 70 x 103 cm con un margen mínimo de 2,5 cm fuera del marco que límita el área de la carta. El área mínima a cubrir es: en latitud 13° - 20°N y en longitud 74° - 85°.

Solución.

1er paso: Determine que dimensiones a ocupar horizontalmente. De la tabla 26a (TUN) la diferencia de partes meridionales es:

$$\begin{array}{l} PM_{20°} = 1217{,}3 \\ PM_{13°} = 781{,}7 \\ \hline \Delta PM = 435{,}6 \end{array}$$

La carta debe cubrir al menos 11° (85° - 74°) de longitud. Por lo que ésta cubrirá una distancia de 11 x 60 = 660 partes meridionales. Ya que como hay mayor número de partes meridionales de longitud que de latitud, debe ser representada, la dimensión mayor horizontalmente.

2do paso. Determine si la latitud o longitud es el factor de escala limitante. El número de centímetros disponible para cubrir la latitud es 65 (70 cm menos 2,5 cms para el margen superior e inferior). Si 435,7 partes meridionales deben estar representadas en 65 cm cada parte meridional será 65/435,7 = 0,149185. Si hay 103 - 5 = 98 cm disponibles para la longitud, por tanto la amplitud de cada parte meridional será 98/660 = 0148484. Así pues la longitud es el factor de escala limitante, ya que toda el área deseada podría no estar representada en el espacio disponible si la escala mayor fuera utilizada (factor de escala de latitud).

Usando la escala más pequeña, se obtiene que 64,69 cms (0,148484 x 435,7). Los márgenes superior e inferior pueden ser incrementados ligeramente, o se puede efectuar un cubrimiento adicional de la latitud. Si se desea este cubrimiento adicional, la cantidad puede ser determinada dividiendo el espacio disponible (65 cms), por la escala 0,148484. Estas son 437,75 partes meridionales, o 6,8'' más que el mínimo. Utilizando la tabla 26a vemos que la latitud pueder ser extendida 2' por debejo de 13° ó 2,5' sobre el paralelo 20°. Suponga que se decide aumentar el margen y que solamente se desea cubrir al mínimo lo mostrado.

3er paso: Determine el espacio entre los meridianos y paralelos.

Los meridianos de 1° ó 60' ocuparán 60 x 0,148484 = 8,9 cms. Posteriormente , determine cada grado de latitud de separación. Primero calcule la diferencia de partes meridionales entre el paralelo inferior y los paralelos que se van a mostrar.

$$\begin{array}{lllll} PM_{14°} = 842{,}3 & PM_{15°} = 904{,}5 & PM_{16°} = 966{,}4 & PM_{17°} = 1028{,}6 & PM_{18°} = 1091{,}1 \\ PM_{13°} = 781{,}6 & PM_{13°} = 781{,}6 & PM_{13°} = 781{,}6 & PM_{13°} = 781{,}6 & PM_{13°} = 781{,}6 \\ \hline \Delta PM = 60{,}6 & \Delta PM = 122{,}9 & \Delta PM = 184{,}8 & \Delta PM = 247{,}0 & \Delta PM = 309{,}5 \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} PM_{19°} = 1154{,}0 & PM_{20°} = 1217{,}3 \\ PM_{13°} = 781{,}6 & PM_{13°} = 781{,}6 \\ \hline \Delta PM = 372{,}4 & \Delta PM = 435{,}7 \end{array}$$

Después, determine la distancia de cada paralelo desde la φ 13°N multiplicando su diferencia de partes meridionales por la escala 0,148484:

$\varphi_{13°}$ a $\varphi_{14°}$ = 0,148484 x 60,6 = 9,0 cms
$\varphi_{13°}$ a $\varphi_{15°}$ = 0,148484 x 122,9 = 18,25 cms
$\varphi_{13°}$ a $\varphi_{16°}$ = 0,148484 x 184,8 = 27,40 cms
$\varphi_{13°}$ a $\varphi_{17°}$ = 0,148484 x 247,0 = 36,67 cms
$\varphi_{13°}$ a $\varphi_{18°}$ = 0,148484 x 309,5 = 45,95 cms
$\varphi_{13°}$ a $\varphi_{19°}$ = 0,148484 x 372,4 = 55,30 cms
$\varphi_{13°}$ a $\varphi_{20°}$ = 0,148484 x 435,7 = 64,7 cms

4to paso. Trazado de la retícula. Trazar una línea horizontal 2, 65 cms $\left(\frac{70-64,69}{2}\right)$ desde el borde inferior. Este es el marco inferior; rotulado "13°N". Trace el marco derecho a 2,65 cm del borde; rotulado "74°W". A lo largo del paralelo inferior mida la distancia en unidades de 89,9 cm desde λ =74°W a la derecha hasta λ = 83° W a la izquierda; a través de estos puntos localizado trace líneas verticales, las cuales van a representar los meridianos.

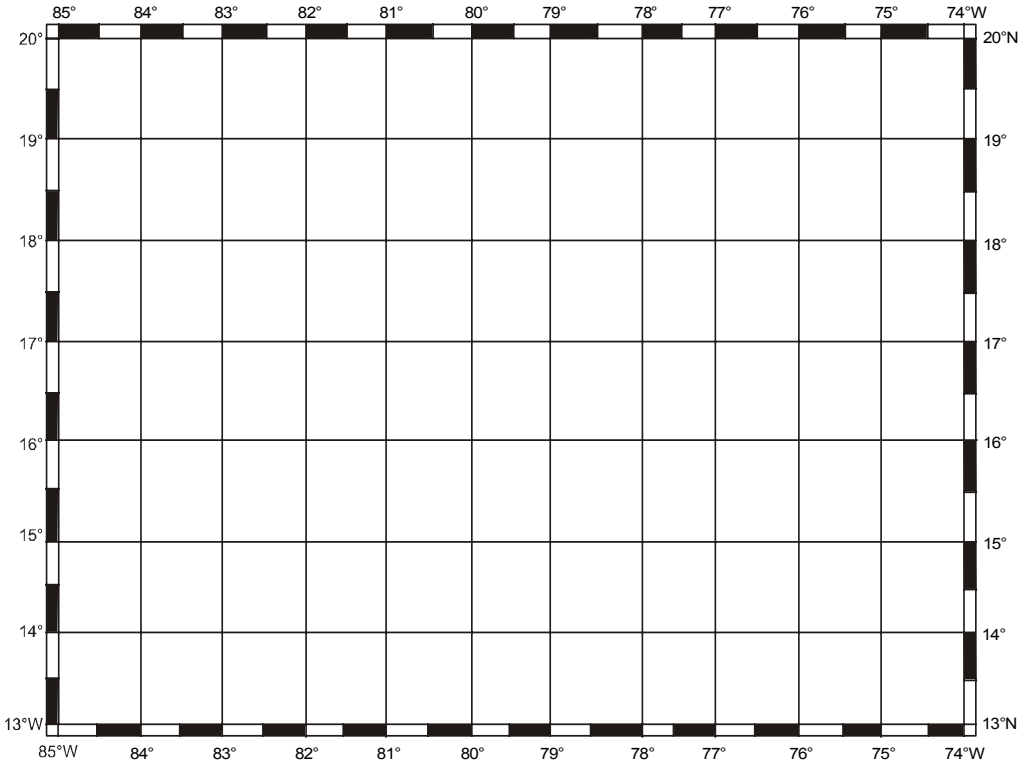


Fig. 118b Retícula de la carta de proyección Mercator

A lo largo de cualquier meridiano mida hacia arriba desde la línea horizontal las distancias calculadas anteriormente (distancia entre los paralelos). El rótulo de los meridianos y paralelos estan mostrados en la figura118b.

5to paso. Rotule los valore de la latitud y longitud en el marco. Las escalas pueden ser graduadas en unidades tan pequeñas como se desee. Determine la escala de longitud dividiendo los grados en partes iguales. Establezca en la escala de latitud cada subdivisión de un grado de la misma forma como fue descrita para todos los grados.

En bajas latitudes los grados de latitud puede ser dividido en partes iguales sin una seria perdida de la exactitud.

6to paso: Llene los detalles deseados .

En latitudes sur la distancia entre dos paralelos consecutivas aumenta hacia el sur. El paralelo superior es trazado primeramente y las distancias medidas hacia abajo. Las latitudes aumentan hacia el sur. En longitud este el marco de longitud aumenta hacia el este (derecha).

4.18 Clasificación de las cartas náuticas, guias de navegación y publicaciones

Las cartas náuticas por su destino se clasifican en dos grupos:

- cartas náuticas para la navegación;

- cartas auxiliares y guias.

Las cartas náuticas para la navegación a su vez se dividen en:

- cartas náuticas corrienete;

- cartas náuticas especiales.

Las cartas náuticas corrientes están destinadas para el estudio de la región de navegación y el ploteo de la derrota. En dependencia de la escala éstas se dividen en:

- De escala pequeña, cartas generales, menores de 1:1 500 000.

- De escala media, cartas de travesía / recalada -1:1 500 000 - 1:750 000.
" " " cartas para la navegación costera - 1:750 000 -- 1:150 000

- De escala grande, cartas de acceso a puertos / aguas costeras congestionadas o tortuosas / fondea deros -1:150 000 -- 1:50 000.

-Cartas de puertos / fondeaderos, canales o estrechos mayores de 1:50 000.

Las cartas náuticas especiales se utilizan para la solución de tareas específica de navegación y se editan en diferentes escala. A ellas se relacionan las así llamadas cartas de ruta , cartas con redes de líneas isométricas de los sistemas de radionavegación etc.

Las cartas guias se utilizan para el estudio de las condiciones físico - geodésicas de navegación. Por ejemplo las cartas de los elementos hidrometeorológicos, elementos del magnetismo terrestre, las cartas de radiofaros y otras.

Las cartas auxiliares contienen en sí una red cartográfica con la representación generalizada de la localidad. Estas se editan en diferentes escalas y proyecciones, cómodas para la realización de diferentes construcciones gráficas. A ellas se relacionan cartas - redes, las cartas operativas etc.

Las guias y publicaciones para la navegación contienen indicaciones especiales para el régimen de navegación y diferentes reglas de observación obligatoria y, de igual forma, datos especiales que facilitan

el trabajo del navegante. De acuerdo a su contenido todas las guias y publicaciones náuticas pueden ser clasificadas en grupos.

1. Descripción de las condiciones de navegación: A ellos se relacionan los derroteros, las descripciones de luces y símbolos, la descripción de los medios radiotécnicos de navegación, las exploraciones hidrográficas de navegación, las descripciones de las zonas minadas, las tablas de mareas, los avisos a los navegantes, etc.

2. Descripción de Ayuda Electrónica a la Navegación y reglas de su explotación.

3. Publicaciones guías. A estas publicaciones se refieren diferentes guías, catálogos de cartas, descripciones de los sistemas de balizamiento, almanaque náutico, tablas de marea y otros.

En los intervalos entre las reediciones las cartas náuticas y las publicaciones se corrigen en las secciones hidrográficas de las flotas y por los navegantes durante la navegación en base a los avisos a los navegantes.

CAPÍTULO V

NAVEGACIÓN DE ESTIMA

Capítulo V

NAVEGACIÓN DE ESTIMA

5. Esencia y destino de la navegación de estima.

Para garantizar la navegación segura y la utilización óptima del armamento, es necesario conocer con exactitud la posición del buque. Para ello se exige un constante control de la derrota, es decir, que se exige llevar la estima.

La esencia de la estima consiste en el trazado del rumbo y el espaciorecorrido desde una posición fija inicial, conocida en la carta náutica, con el objetivo de conocer la posición del buque en un momento dado.

La estima se lleva con ayuda de los siguientes equipos:

- Con ayuda del girocompás se determina el rumbo.

- Mediante de la corredera se determina la velocidad y el espacio recorrido.

En algunos casos la velocidad del buque se determina por el número de revoluciones de las máquinas (rpm) y el espacio recorrido por la velocidad y el tiempo de navegación.

Además, en la estima se considera la influencia que ejercen el viento y la corriente sobre el buque, originando la deriva, el abatimiento, el aumento o disminución de la velocidad del buque.

De esta forma consideramos la navegación de estima como el conjunto de todos los trabajos gráficos en la carta náutica, realizados para obtener la posición en determinado momento de acuerdo a la velocidad, rumbo y tiempo de navegación.

La posición determinada por la estima se llama **posición de estima.**

La estima debe ser ininterrumpida, es decir que debe llevarse desde el comienzo hasta el fin de la navegación, debe llevarse de la forma más simple, clara y exacta.

La estima puede lefectuarse por dos métodos: el **método gráfico** y el **método analítico.**

El método de la estima gráfica prevé el trazado de la derrota, espacio recorrido y la consideración de los elementos evolutivo, asi como la deriva y el abatimiento mediante construcciones gráficas en la carta.

El método analítico prevé el cálculo de las coordenadas de la posición del buque por fórmulas especiales para un momento determinado y su posterior ploteo en la carta (Ver Capítulo XI).

La estima gráfica y analítica pueden llevarse manual o automáticamente.

Cuando la estima se lleva manualmente todo el trabajo gráfico y los cálculos los realiza el navegante con ayuda de los instrumentos de ploteo, tablas y otros materiales.

La estima automática se lleva por las ploteadoras automáticas que son equipos especiales que trabajan

de acuerdo a las indicaciones de la corredera y el compás, trazando la derrota en la carta.
Conjuntamente con el trazado de la derrota del buque, en la carta constantemente se calculan las coordenadas de estima.

El principal método de estima es la gráfica, llevada manualmente por el navegante. Este método es muy claro y permite controlar el movimiento del buque y observar su posición con relación a los objetos circundantes.

La estima automática evidentemente, en un futuro próximo será el pricipal método, ya que en los buques constantemente y con mayor frecuencia se utiliza la técnica de computación (cartas electrónicas), cuando por otra parte las velocidades son cada vez mayores y las condiciones de maniobra se hacen cada vez más complejas.

5.1 Corredera. Principio de funcionamiento.

La corredera es el equipo que se utiliza en navegación para determinar la velocidad y el espacio recorrido por el buque. Las correderas más utilizadas en los buques modernos son las hidrodinamicas y las de inducción.

1. Correderas hidrodinámicas

El principio de funcionamiento de las **correderas hidrodinámicas** se basa en la medición de la presión hidrodinámica del agua cuando el buque se encuentra en movinmiento. El principio de funcionamiento de estas correderas se muestra en la figura 119.

El elemento sensible de la corredera está dividido por un diafragma flexible en dos cámaras: la cámara superior y la inferior, éstas últimas están en contacto con el agua por los tubos 2 y 3. El tubo 2 está destinado para la recepción de la presión dinámica Pd cuando el buque está en movimiento, y está conectado con la cámara inferior del elemento sensible, manteniendo su orificio dirigido hacia proa. El tubo 3 está destinado para la recepción de la presión estática, P_o y se conecta a la cámara superior del elemento sensible de la corredera.

Pd - Presión dinámica, proporcional al cuadrado de la velocidad de movimiento del buque.

P_o - Presión estática, proporcional al calado del buque.

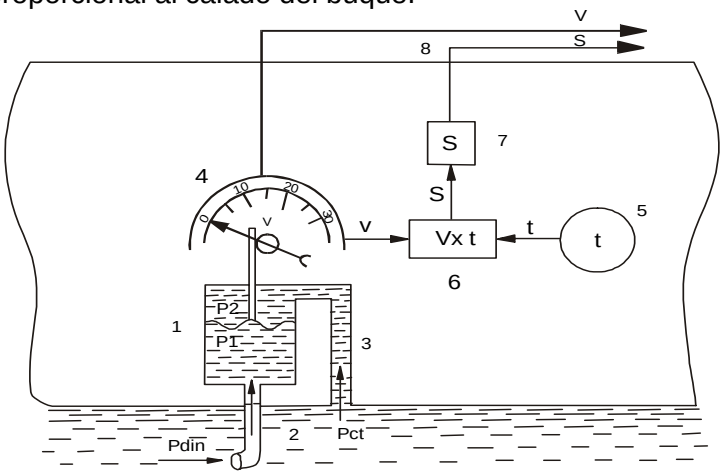


Fig. 119 Esquema de principio de las corredera hidrodinamico

Cuando el buque no está en movimiento en ambas cámaras existirá sólo la presión estática. Las presiones en ambas cámaras será igual a:

$$P_1 = P_2 = P_e \qquad (114)$$

La membrana flexible se encuentra en una posición intermedia, el vástago fijado a la membrana no actuará sobre el mecanismo de velocidad y el indicador de velocidad indicará V = 0.

Con el comienzo del movimiento del buque al orificio receptor del tubo 2 llega la presión dinámica, proporcional al cuadrado de la velocidad de movimiento.

La presión en la cámara inferior crece en una magnitud proporcional a la presión dinámica, es decir:

$$P_1 = P_e + Pd \qquad (115)$$

La presión en la cámara superior queda invariable ya que el tubo 3 no recibe la presión dinámica.

$$P_2 = P_d \qquad (116)$$

Como resultado de la diferencia de ambas presiones $P_1 - P_2 = P_o$, en la magnitud de la presión dinámica, la membrana del elemento sensible se contrae y empuja al vástago hacia arriba, presionando al mecanismo de velocidad, este convierte la presión recibida en unidad de velocidad y el indicador indica la velocidad de movimiento V del buque.

La velocidad obtenida se aplica al mecanismo integrador y donde además, se aplica el tiempo T, desde el mecánismo de tiempo 5 . Como resultado de la multiplicación de V y T se obtiene la magnitud del espacio recorrido por el buque S que se aplica al contador 7. de esta forma el indicador de velocidad mostrará la magnitud de la velocidad en nudos y el indicador de espacio, el espacio recorrido por el buque en millas.

Las magnitudes de la velocidad y el espacio recorrido, a través de una línea eléctrica, se envían a los consumidores, que se encuentran instalados en el cuarto de derrota y otros compartimientos. Cuando el buque se detiene la presión dinámica desaparece. Las presiones se hacen iguales en ambas cámaras $P_1 = P_2$ y la membrana regresa a la posición media, eliminando la acción que ejercía el vástago sobre el macanismo de velocidad. Con esto el indicador de velocidad indica V = 0, deteniendo el contador de espacio recorrido en el valor correspondiente al espacio recorrido por el buque hasta el momento en que se detuvo.

Cuando el buque comience nuevamente a moverse, el indicador del espacio recorrido comienza a hacer el conteo no desde cero, sino desde el valor que tenía cuando el buque estaba detenido.

De esta forma hemos observado, que la corredera indica la velocidad y el espacio recorrido por el buque.

2. Corredera de inducción

Su principio se basa en la Ley de Faraday, donde se platea:

La fem inducida en un conductor (circuito) es igual a la variación del flujo magnético que lo atraviesa.

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

donde: e = fem

ϕ = flujo magnético.

t = tiempo.

Para deducir la dependencia de esta fem con la velocidad, nos apoyaremos en el siguiente esquema.

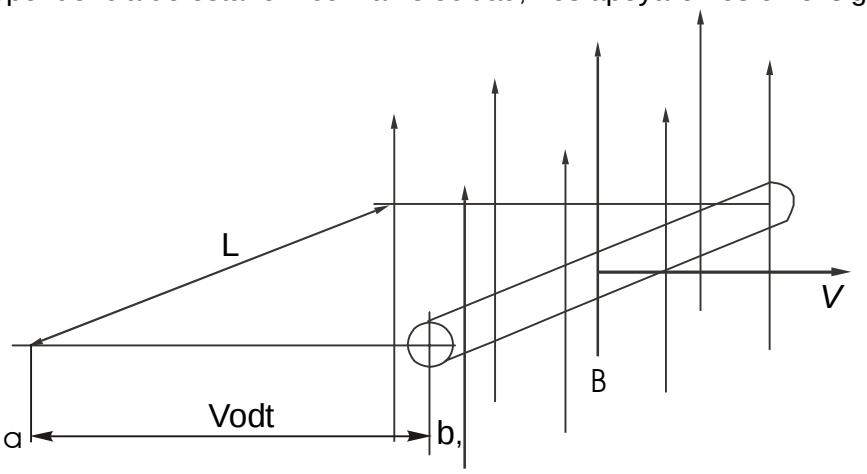


Fig. 120 Desplazamiento del conductor por el flujo magnético

En él se observa un conductor de longitud L que se desplaza desde a hasta b con una velocidad Vo. En el tiempo dt se desplza un espacio Vo. Dt describiendo una superficie ds.

$$ds = L\ Vo\ dt$$

El flujo magnético $d\phi = B\ ds$ B: Inducción magnética del flujo.

Sustituyendo valores:

$$d\phi = B\ L\ Vo\ dt$$

el valor absoluto de la fem será

$$|e| = \frac{d\phi}{dt} = \frac{B.L.Vo.dt}{dt}$$

$$|e| = B.L.Vo$$

siendo $$Vo = \frac{|e|}{B.L} \qquad (118)$$

En esta expresión se observa que la velocidad es proporcional a la fem, puesto que B y L son magnitudes constantes.

En el ejemplo que utilizamos para la deducción de la velocidad, el segmento de circuito es el elemento móvil y el campo electromagnético permanece en el lugar. Esta situación se manifiesta inversa en la realidad. El elemento sensible de la corredera representa un terminal aislado en el cual está instalado el electroimán. En su parte inferior se encuentran ubicados dos electrodos colectores E_1 y E_2 donde se toma la tensión proporcional a la velocidad.

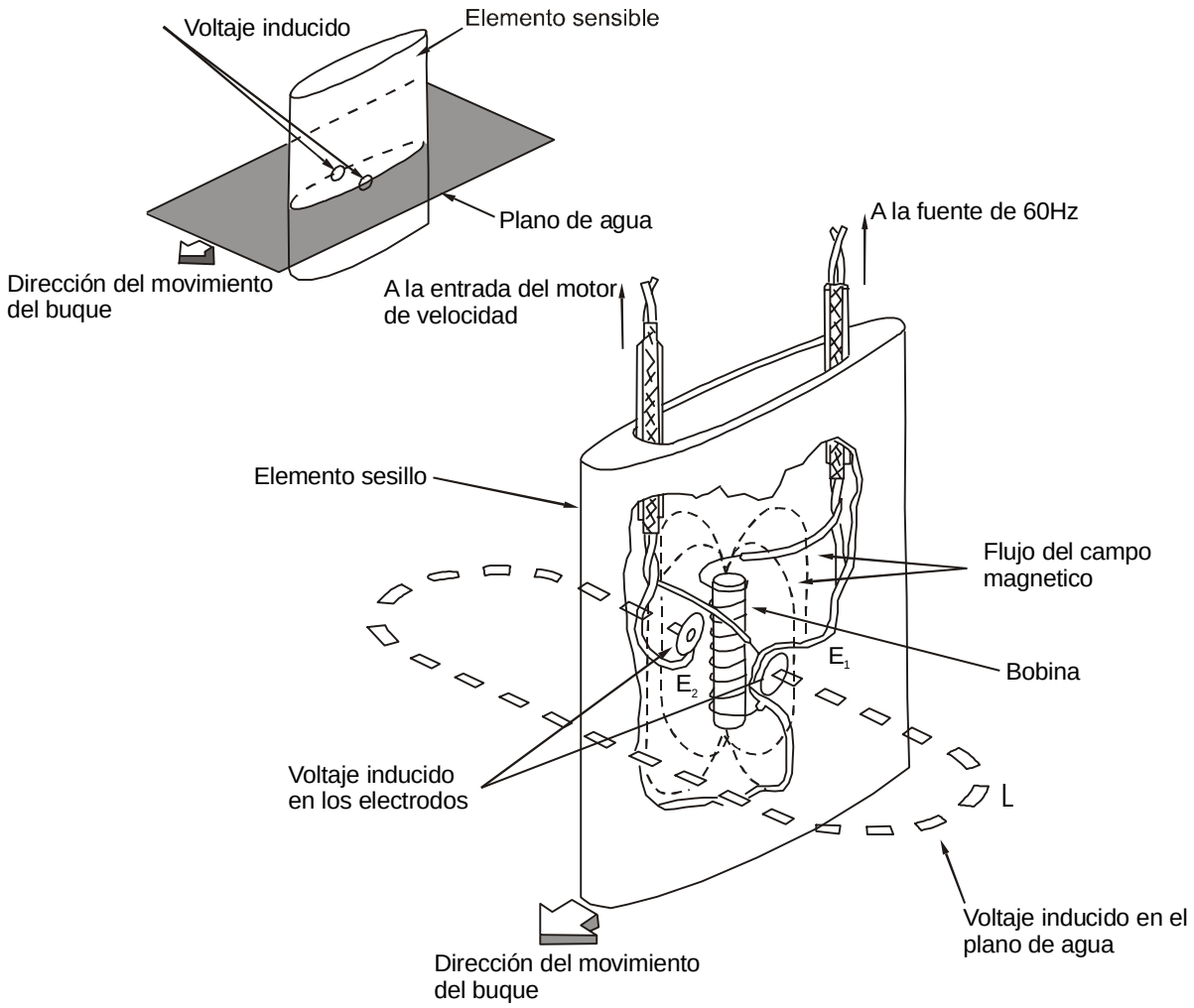


Fig. 121 Elemento sensible de la corredera de inducción

Este dispositivo se encuentra en la obra viva del buque. Con la velocidad de la embarcación Vo., las fuerzas magnéticas atravesarán cierto volumen de agua de mar e inducirán en ella una fem en este volumen de agua, separado simbólicamente en cierto circuito de longitud L, que se cierra en los electrodos E_1 y E_2.

El funcionamiento de una corredera de inducción típica podrá obtenerse a través del esquema que mostramos a continuación. Podremos a partir de él, explicar como se calcula la velocidad y el espacio una vez recepcionada la señal proveniente del tubo receptor. La señal captada por el receptor, es una señal compuesta por tres variables.

1. Uu sen Wt. Componente útil.

2. Uk sen Wt. Componente útil.

3. Uc cos Wt. Componente cuadrantal o parásita.

Ambas componentes pasan del tubo receptor al dispositivo igualador y de ahí al amplificador de canales, el cual, a través de una compuerta electrónica dejará pasar cada componente específica logrando separar la señal útil de la parásita o cuadrantal.Cuando el buque se encuentra detenido, el tubo receptor solo recibe la señal parásita, que surge en el enrollado de la bobina al suministrársele corriente. Esta componente cuadrantal viaja al dispositivo igualador y después al amplificador de canales (AC), pasa por su respectiva puerta electrónica y se conduce por su línea hasta el motor ejecutor No 2 (ME No 2). El cual está unido mecánicamente al corrector de la señal cuadrantal (ccc). El ME No 2 girará en un ángulo proporcional a la señal y el corrector a su salida nos dará entonces una señal parásita pero con fase invertida, que va al dispositivo sumador y de ahí viaja al igualador donde se compara con la señal parásita que viene del tubo receptor. Como ambas son iguales, pero con fases diferentes, se anulan. Dejando así de llegar señal al AC y el ME No 2 se detiene.

Cuando el buque se pone en marcha, al tubo receptor llegan las tres señales, pasan por el dispositivo igualador y viajan al AC, la parásita va al ME No 2 y la útil al ME No 1.

El ME No 1 girará en un ángulo proporcinal a la magnitud de la señal la que es transmitida mecánicamente al corrector de la señal útil (CCU) dando a su salida una señal UusenWt invertida en fase.

El ME No 1mueve ademásen en el mismo ángulo de giro al TG_2 (transformador giratorio), al TG_1 los cuales a su salida darán el dato de Vo (velocidad de la corredera). Mecánicamente está unido además al corrector de velocidad (CV), que dará a su salida la señal útil U^1K sen Wt que faltaba, pero de forma invertida. Las tres señales que salen de los correctores: CCC, CCU y CV, se suman y pasan al dispositivo igualador, donde se comparan con las señales que provienen del tubo receptor, que al hacerse iguales se anulan y detienen el funcionamiento de los motores, quedando marcada digitalmente la velocidad de manera constante, si el buque navegara a una velocidad estable.

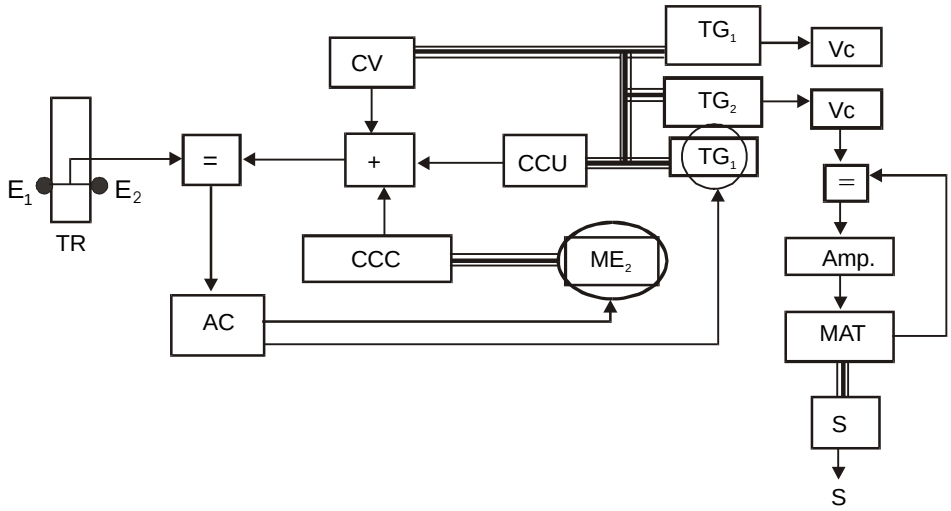


Fig. 122 Esquema funcional de la Corredera de inducción

El cálculo del espacio se realizará cuando la velocidad que proviene del TG_2 se compara con la procedente del motor asincrónico (MAT). La diferencia entre ellas servirá, para una vez que se realice la amplificación de la señal, se alimente el MAT, el cual dará a su salida un impulso mayor del recibido, al dispositivo igualador. Así se mantendrá funcionando el selsín transmisor que recibe la señal en forma macánica del motor asincrónico (espacio recorrido).

Si la velocidad se reduce a cero, al igualador solo llega la corriente del MAT, que será cada vez más débil, hasta detenerse.

3. Determinación del espacio recorrido por la corredera

Para determinar el espacio recorrido por el transmisor (repetidor) en determinado intervalo de tiempo, es necesario anotar las lecturas iniciales de la corredera Lc_1 y final Lc_2 de este intervalo. La diferencia de estas lecturas será el valor de espacio recorrido.

$$\Delta Lc = Lc_2 - Lc_2 \qquad (119)$$

La corredera, al igual que cualquier otro equipo, trabaja con cierto error, por eso la diferencia de lecturas de la corredera no corresponde al valor real del espacio recorrido,es decir:

$$\Delta Lc \neq S$$

Para determinar el espacio recorrido, es necesario determinar el error de la corredera y considerarlo como su corrección. La corrección de la corredera se expresa en porcientos y se simboliza por Δc (Fig. 123).

Supongamos que el buque realiza una travesía desde el punto B, recorriendo un espacio S. En el punto A se tomó la lectura Lc_1 y en el punto B la lectura Lc_2.

La diferencia de lectura Lc_2 - Lc_1 = ΔLc será el espacio recorrido calculado por la corredera en la travesía.

Trazando desde A el espacio S obtenemos el punto C. En este ejemplo la diferencia Lc_2 - Lc_1 es menor que S. El segmento CB = S - ΔLc será la corrección de la corredera.

Para expresar la corrección de la corredera en porcientos Δc %, establezcamos una proporción tomando a ΔLc por 100%.

$$\Delta Lc \rightarrow 100\%$$
$$S - \Delta Lc \rightarrow \Delta c\%$$

De acuerdo a las propiedades de las proporciones se puede plantear que:

$$\Delta c\% = \frac{S - \Delta Lc}{\Delta Lc} 100\% \qquad (120)$$

Δc % tiene signo positivo (+) si $\Delta Lc < S$, es decir, si la corredera indica menos espacio que el que realmente recorrió el buque y tiene signo negativo (-) si $\Delta Lc > S$, es decir si la corredera indica más espacio que el que en realidad recorrió el buque.

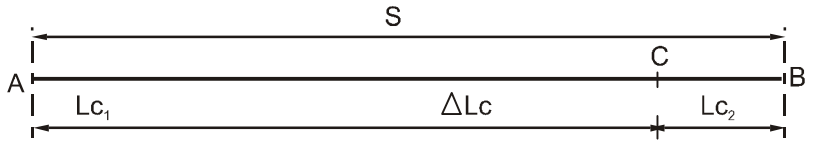


Fig. 123 Corrección de la corredera

Utilizando la fórmula de corrección de la corredera y conociendo esta corrección se puede determinar el espacio recorrido por el buque:

$$S = \Delta c\,\% + \frac{\Delta L\,\%}{100\%}\,\Delta Lc \qquad (121)$$

En lo sucesivo denominaremos el espacio recorrido por el buque y calculado por la corredera por Sc, entonces:

$$Sc = \Delta Lc + \frac{\Delta c\,\%}{100\%}\,\Delta Lc \qquad (122)$$

ó

$$Sc = \Delta Lc\left(1 + \frac{\Delta c}{100}\right)$$

La expresión

$$\left(1 + \frac{\Delta c}{100}\right)$$

se representa por Kc y se llama coeficiente de la corredera . Entonces:

$$Sc = \Delta Lc\ Kc \qquad (123)$$

En la expresión:

$$Kc = 1 + \frac{\Delta c}{100},$$

el valor de la corrección de la corredera se exprsa con su signo.

De acuerdo a la fórmula 104 el coeficiente de la corredera se determina por la expresión.

$$Kc = \frac{Sc}{\Delta Lc}$$

Se llama coeficiente de la corredera Kc a la relación que existe entre el espacio recorrido por el buque y la diferencia de las lecturas de la corredera en un mismo segmento de la travesía.

En la práctica el espacio recorrido por el buque se calcula por la expresión (123) o se escoge en la tabla 28 (TUN). La tabla 28 -a se utiliza cuando la corrección es positiva y la tabla 28 - b, cuando la corrección es negativa. Además, es muy fácil calcular el espacio recorrido por la fórmula (123) con ayuda de una regla de cálculo.

5.2 Determinación del espacio recorrido por la velocidad y el tiempo

En este caso, cuando la corredera no trabaja, el espacio recorrido se determina por el tiempo de navegación y la velocidad.

$$S = V\ T \qquad (124)$$

La velocidad se determina por el número de revoluciones de las máquinas V_{rpm}, por consiguiente el espacio se representa por Sr:

$$Sr = V_{rpm}T \qquad (125)$$

donde Sr - espacio en millas, calculado para la velocidad de travesía, V_{rpm} - Velocidad determinada por el número de revoluciones de las máquinas.

T - Tiempo de navegación en horas.

Si el tiempo de navegación se considera en minutos la fórmula (125) toma la siguiente forma:

$$Sr = \frac{V_{rpm}T}{60} \qquad (126)$$

donde T - tiempo en minutos.

Cuando se determina el espacio recorrido por el buque en pequeños intervalos de tiempo, es más práctico utilizar la expresión:

$$Scab = Vcab/min\ T\ min \qquad (127)$$

Para facilitar los cálculos por las fórmulas (124 y 125) se emplea el nomograma logarítmico tiempo - velocidad - espacio, las fórmulas (124) y (125) pueden ser resueltas por las TUN (tablas 27- a y 27- b)

Nomograma logarítmico tiempo - velocidad - espacio. Este nomograma es frecuentemente utilizado para la solución de la fórmula S = Vt. Está compuesto por tres escalas: la escala derecha graduada logarítmicamente en minutos de tiempo; la escala del centro graduada logarítmicamente en millas y la escala izquierda graduada de forma logarítmica en nudos. Marcando los valores de dos factores conocidos en sus escalas respectivas y uniendo estas marcas por una línea recta, se puede hallar el valor del tercer factor por la intersección de esta línea con la escala restante. En la figura se muestra un ejemplo donde se determina la velocidad cuando una distancia de 3,6 millas es recorrida en 10 minutos.

Solamente una de las tres escalas es la requerida para resolver el tiempo, la velocidad o la distancia si dos de los tres valores son conocidos. Cualquiera de las tres escalas logarítmicas pueden ser usadas de la misma forma que la regla de cáculo para la adición o sustracción de los logarítmos de los números, como la escala derecha tiene mayor longitud, es preferible utilizarla para estos propósitos.

En la figura esta mostrado el uso de la escala derecha para hallar la velocidad en nudos cuando el tiempo en minutos y la distancia en millas son conocidas. En este problema el tiempo es de 10 minutos y la distancia 3,6 millas.Para esto se utiliza un compás de punta seca. Una de las puntas del mismo se coloca en minutos, 10, y la segunda punta en la distancia en millas 3,4. Sin variar la abertura del compás, colocar la primera punta en 60. La segunda punta entonces indicará la velocidad en nudos, 21,8. Si se conocen la velocidad y el tiempo, coloque una de las puntas en 60 y la segunda en la velocidad en nudos 21,8. Sin variar la abertura del compás, coloque la primera punta en el tiempo de 11 minutos.

Entonces la segunda punta indicará la distancia en millas (Fig. 124).

5.3 Determinación de la velocidad del buque y la corrección de la corredera

Para poder determinar el espacio recorrido por el buque es necesario conocer la velocidad y la corrección de la corredera. En la base medida se determina la velocidad del buque para distintos regímenes de trabajo de las máquinas velocidad y la corrección de la corredera para las distintas velocidades. Las base medida se encuentra, generalmente en lugares cercanos a los puertos.

La base debe encontrarse al resguardo de los vientos predominantes en la región, en zonas relativamente profundas y sin peligros para la navegación.

La base medida está compuesta por varias enfilaciones paralelas entre sí, la distancia entre las cuales se determina con gran exactitud (Fig. 125).

La línea de corrida se dispone perpendicular a las enfilaciones. En algunas bases medidas la línea de corrida se simboliza con boyas o enfilaciones. En todo caso el buque se mantiene en la línea de corrida por el compás.

Para la determinación de la velocidad del buque en la base medida, el buque cae a un rumbo perpendicular a las enfilaciones y desarrolla determinado número de revoluciones de las máquinas.

En el momento, cuando se corta la primera enfilación (punto A, fig. 126) se ponen en funcionamiento los cronógrafos, (no más de tres), y cuando se corta la segunda enfilación se detienen los mismos (punto B). El tiempo de corrida se determina como el valor medio de todas las mediciones,es decir:

$$T = \frac{T_1 + T_2 + \ldots + T_n}{n}. \qquad (128)$$

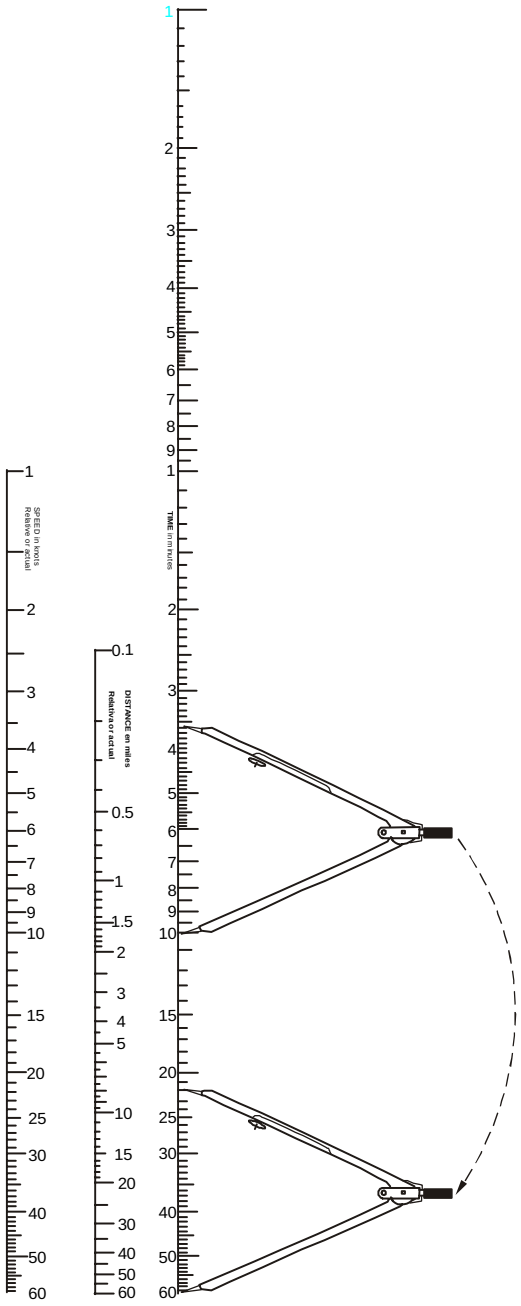


Fig. 124 Nomograma logarítmico tiempo-velocidad-espacio

La distancia recorrida por el buque es el espacio S entre las enfilaciones. De acuerdo al tiempo T y el espacio S se determina la velocidad:

$$V = \frac{S3600}{T} \qquad (129)$$

donde S - espacio recorrido en millas,

T - tiempo de la corrida en segundos.

La velocidad calculada por la fórmula (129) contiene errores debido a la influencia de la corriente en la región.

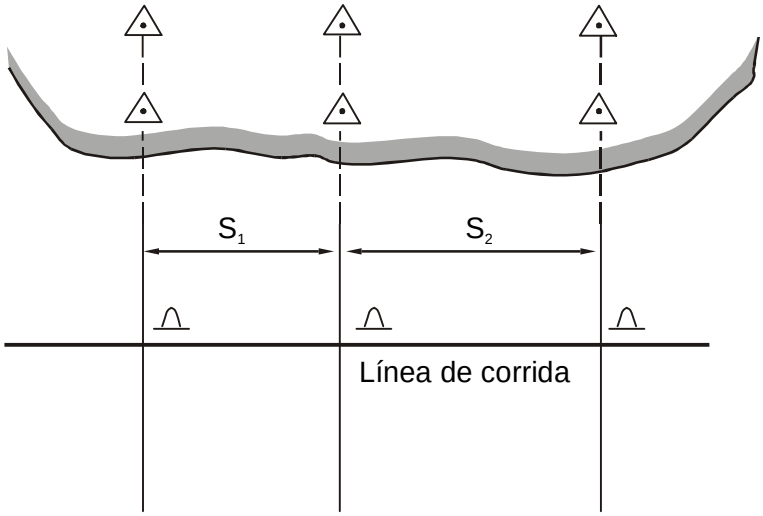


Fig. 125 Base medida

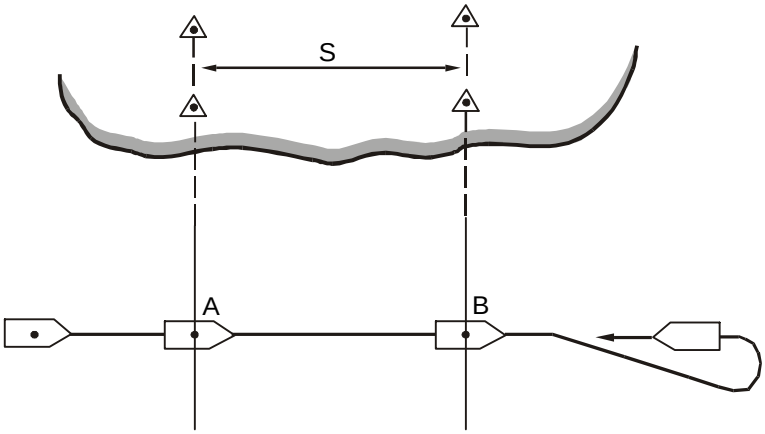


Fig. 126 Corrida de buque en la base medida

5.4 Longitud de la corrida (S)

Para deducir la fórmula , que establece la relación entre la longitud de la corrida y la velocidad, diferenciamos, la expresión conocida.

$$S = V\,t$$

donde: s - longitud de la corrida

v - velocidad determinada

t - duración de la corrida

Entonces

$$ds = dVt + dtV$$

considerando que $t = \frac{S}{V}$ y sustituyendo los diferenciales por sus incrementos obtenemos:

$$S = \frac{V}{\Delta V}\left(\Delta S - \Delta tV\right) \qquad (130)$$

De la expresión (130) se ve que, la longitud de la corrida depende del error relativo en la velocidad determinada, error en la consideración de la longitud de la corrida y la velocidad. Sustituyendo valores concretos a estas magnitudes, se puede obtener la longitud de la corrida.

Para la corrida (la menor distancia entre las líneas de enfilaciones en la base medida), como ya es conocido, generalmente se determina con gran exactitud, y por eso el error ΔS es pequeño y en los análisis posteriores se puede despreciar. Entonces, si se limita el error en la determinación del intervalo de tiempo Δt, en 1,5 seg y se desea obtener la velocidad del buque con un error, que no se exceda del ± 5%, después de transformar, la expresión (130) obtenemos una fórmula más sencilla para el cálculo de la longitud de la base medida.

$$S = \frac{V}{12}$$

donde S - longitud de la corrida en millas

V - velocidad del buque en millas.

La expresión (131) permite establecer los siguientes límites de longitud de la corrida, que aseguran la exactitud necesaria en la determinación de la velocidad:

para V < 12 nudos	S = 1 milla
para V = 12 - 24 nudos	S = 2 millas
para V = 24 - 36 nudos	S= 3 millas
para V > 36 nudos	S = 4 millas

Las velocidades pequeñas (menos de 8 nudos) son útiles para corridas, próximas a las calculadas por la fórmula (131). La velocidad teórica del buque puede ser determinada con más exactitud mientras mayor sea la longitud de la corrida, lo que se corrobora con la fórmula (130), escrita en la forma:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta S - \Delta tV}{S}$$

Sin embargo tal deducción se refuta en la práctica, ya que con el aumento de la longitud y por consiguiente la duración de la corrida generalmente conlleva a notables variaciones de las condiciones externas (velocidad y dirección del viento y la corriente), las cuales introducen más errores en las velocidades determinadas que en la longitud de la corrida limitada. La determinación de los elementos de maniobra del buque se efectuan para vientos menores de fuerza 3. El viento de tal fuerza prácticamente no influye en la velocidad de movimiento de los buques modernos, por eso el factor determinante a considerar posteriormente es la corriente.

5.5 Número de corridas

Para determinar la velocidad de movimiento en ausencia de corriente es suficiente una corrida.

En presencia de una corriente, que tiene una dirección y velocidad constante, es necesario realizar dos corridas en sentidos opuestos.

En este caso con el promedio del resultado de la observación en dos corridas se excluye la influencia de la corriente en la velocidad determinada. Es decir, se obtiene la velocidad del buque respecto al agua. En realidad, si las velocidades observadas del movimiento del buque respecto al fondo en ambas corridas

se designan respectivamente V_1 y V_2 , las velocidades respecto al agua por V_1 y V_2 y la proyección de la velocidad de la corriente en la línea de la corrida del buque por V_β, entonces obtenemos;

en la primera corrida $V_1 = V_1' + V_\beta$

en la segunda corrida $V_2 = V_1' + V_\beta$

y calculando la velocidad media, tendremos:

$$V_0 = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{V_1' + V_\beta + V_2' - V_\beta}{2} = \frac{V_1' + V_2'}{2} \qquad (132)$$

la cual está libre de la influencia de la corriente, de forma análoga a la velocidad, se calcula el valor medio de revoluciones de las máquinas en el régimen de trabajo dado

$$N = \frac{N_1 + N_2}{2} \qquad (133)$$

donde:

N_1 y N_2 - número de revoluciones en ambas corridas

Si en la zona de la base medida actuan corrientes regularmente variables (Fig. 127) para eliminar su influencia es necesario realizar tres corridas en lugar de dos, es decir una corrida más desde el punto A hasta el punto B. En este caso la velocidad en la segunda corrida se multiplica por dos y se divide la suma de las velocidades entre 4.

Demostración:

Designando la variación de la proyección de la velocidad de la corriente en la línea de la corrida del buque a través de ΔV_β, tendremos:

$$V_1 = V_1' + V_\beta$$

$$V_2 = V_2' - (V_\beta + \Delta V_\beta)$$

$$V_3 = V_3' + (V_\beta + 2\Delta V_\beta)$$

Promediando las velocidades observadas por la regla indicada, obtenemos:

$$\frac{V_1 + 2V_2 + V_3}{4} = \frac{V_1' + V_\beta + 2V_2' - 2V_\beta - 2\Delta V_\beta + V_3' + V_\beta + 2\Delta V_\beta}{4} \qquad (134)$$

o sea ante tal orden de cálculo de la velocidad media de movimiento del buque se excluye la influencia de la variación uniforme de la corriente.

En la práctica al determinar la velocidad del buque generalmente se realizan tres corridas para cada régimen de máquinas.

El número de revoluciones de las máquinas se calcula por la fórmula:

$$N = \frac{N_1 + 2N_2 + N_3}{4} \qquad (135)$$

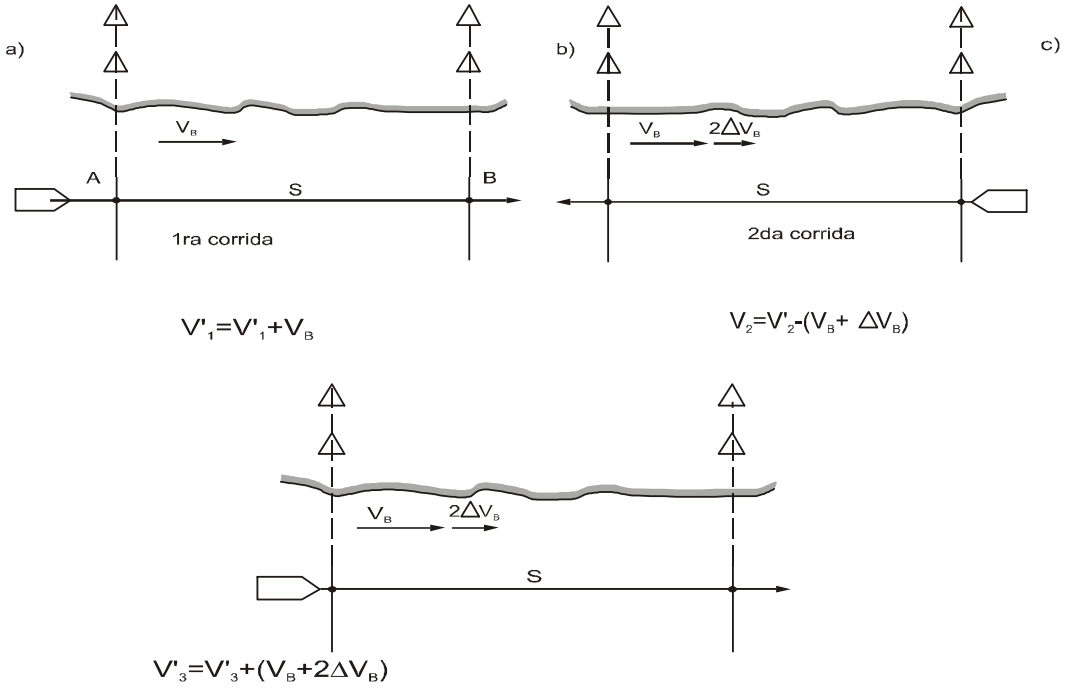


Fig. 127 Corrida de la base medida

Después de determinar la velocidad y el número de revoluciones en un régimen de trabajo de las máquinas, es necesario desarrollar otro régimen y repetir las mediciones.

De está forma se determina la velocidad y el número de revoluciones para varios regímenes de trabajo de las máquinas.

Con los datos obtenidos se construye el gráfico de dependencia entre la velocidad y el número de revoluciones de la propela (Fig.128).

Basándose en el gráfico obtenido se construye la tabla de correspondencia de la velocidad y el número de revoluciones de la propela (Tabla 5.1).

Con esta tabla le es muy fácil al navegante determinar la velocidad, de acuerdo al número de revoluciones de las máquinas.

Si el número de revoluciones se diferencia del valor tabular, la velocidad se determina por una simple interpolación lineal.

Conjuntamente con la velocidad se determina la corrección de la corredera Δc. Para ello en cada corrida se determina la velocidad por la corredera sin considerar su corrección Vc.

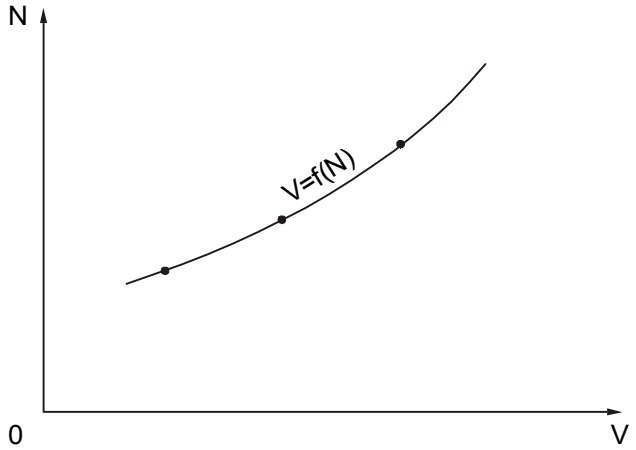


Fig. 128 Gráfico de velocidad contra número de revoluciones de las máquinas

Para la determinación de V'c se anotan dos lecturas Lc_1 y Lc_2. En el momento cuando se anota la primera lectura de la corredera Lc_1, se ponen en funcionamiemto los cronógrafos, y en el momento de anotación de la segunda lectura Lc_2 se detienen. Con la diferencia de lecturas $\Delta Lc = Lc_2 - Lc_1$ y el tiempo en segundos se calcula la velocida V'c:

$$V_0' = \frac{3600\Delta 60}{T} \qquad (136)$$

Tabla 5.1

Toda máquina		Media máquina		Poca máquina	
Nudos	Revoluciones	Nudos	Revoluciones	Nudos	Revoluciones
30	256	22	192	15	145
29	255	22	192	15	145
28	245	21	184	14	139
27	236	20	177	14	139
26	226	20	177	13	134
25	217	19	170	12	134
24	208	18	163	12	129
23	200	17	157	12	129
22	192	17	157	11	124
21	184	16	151	11	124
20	177	15	145	10	119
19	170	16	139	10	119
18	163	14	139	9	114
17	157	13	134	9	114
16	151	12	128	8	110

Para aumentar la exactitud, en cada corrida V'c se determina varias veces y se calcula su valor medio para la corrida:

$$V_c' = \frac{V_{c_1}' + V_{c_2}' + V_{c_3}' + ... + V_{c_n}'}{n} \qquad (137)$$

La corrección de la corredera en la corrida dada, se determina por las fórmulas:

$$\Delta c = \frac{V - V_c'}{V_c'} 100 \qquad (138)$$

$$Kc = \frac{V}{V_c'} \qquad (139)$$

Cuando se realizan dos corridas se calcula el valor medio de la corrección de la corredera:

$$\Delta c = \frac{\Delta c_1 + \Delta c_2}{2} \qquad (140)$$

Si las corridas son tres, entonces el valor medio de la corrección de la corredera se calcula por la fórmula:

$$\Delta c = \frac{\Delta c_1 + 2\Delta c_2 + \Delta c_3}{4} \qquad (141)$$

Después de determinar las correcciones de la corredera en varios regímenes (velocidades) se construye el gráfico de dependencia entre la corrección de la corredera y la velocidad del buque sobre el eje de las abscisas se plotea la velocida en determinada escala y sobre el eje de las ordenadas la corrección de la corredera. Los puntos obtenidos se unen por una línea curva que carateriza la dependencia de la corrección de la corredera de la velocidad del buque. Con ayuda del gráfico se construtye la tabla de correcciones de la corredera, que se utiliza por el navegante para la navegación de estima.

Cuando no existe la base medida, la velocidad del buque y la corrección de la corredera se determina por el radar.

En ocaciones la velocidad del buque y la corrección de la corredera se determinan por observaciones de alta exactitud.

Ejemplo 1: Lc_1 = 24,0; Lc_2 = 27,S = 3,7 millas

Determinar: Δc y Kc

Solución:

$$\Delta c = \frac{S - \Delta Lc}{Lc} 100; \ \Delta Lc = Lc_2 - Lc_1$$

27,5 - 24,0 = 3,5;

$$\Delta c = \frac{3{,}7 - 3{,}5}{3{,}5} 100 = 5{,}7\%$$

$$Kc = 1 + \frac{\Delta c\%}{100}; \ \ Kc = 1 + \frac{5{,}7}{100} = 1{,}057$$

Ejemplo 2:

Lc_1 = 76,4; Lc_2 = 92,6; Δc = + 3% Determinar Sc.

Solución:

$Sc = (Lc_2 - Lc_1)Kc;$

$$Kc = 1 + \frac{3}{100} = 1{,}03$$

Sc = (92,6 - 76,4) 1,03 = 16,2 x 1,03 = 16,7 millas.

Ejemplo 3:

$Lc_1 = 12{,}6;$ $Lc_2 = 24{,}6;$ $\Delta c = -4\%$ Determinar Sc.

Solución:

$\Delta Lc = Lc_2 - Lc_1 = 24{,}6 - 12{,}6 = 12{,}0$

De la tabla 28 - b: TUN por los argumentos.

$\Delta Lc = 12{,}0$ y Δc - 4 % Determinamos: Sc = 11,5 millas.

Ejemplo 4:

$Lc_1 = 10{,}8;$ $Sc = 25{,}2;$ $\Delta c = +4\%$ Determinar Lc_2.

Solución:

De la tabla 28 - a: TUN por los argumentos.

Sc = 25,2 millas y $\Delta c = +4\%$ de forma inversa determinamos: Lc = 24,2

$Lc_2 = Lc_1 + \Delta Lc = 10{,}8 + 24{,}2 = 35{,}0$

Ejemplo 5:

Vrpm = 18 nudos; T = 17 min. Determinar S.

Solución:

$$Vcab/min = \frac{Vnudos}{6} = \frac{18}{6} = 3cab/min.$$

Scab = Vcab / min x Tmin S = 3x17 = 51 cab.

Sr = 5,1 millas.

5.6 Instrumentos de ploteo. Su destino y corrección

Para llevar la estima entre la carta se utilizan los instrumentos de ploteo, entre los cuales se encuentran:

- La regla paralela;

- El transportador;

- El transportador de uso múltiple (TUM)

- El compás de punta seca.

La regla paralela

La regla paralela está compuesta por dos reglas, unidas por dos tirantes móviles de cobre de igual longitud.

Las reglas paralelas se construyen de tres dimensiones: grandes de 600 mm de longitud; medias - de 450 mm de longitud y pequeñas - de 300 mm.

A las reglas paralelas se les presentan las siguientes exigencias:

a) Los bordes exteriores deben ser líneas rectas paralelas entre sí.

b) La líneas transportadas con las reglas paralelas deben ser siempre paralelas a sí mismas.

Para determinar si las reglas paralelas están o no aptas para su utilización existen comprobaciones especiales.

Inspección externa de las reglas

En la inspección externa es necesario cerciorarse que los bordes de las reglas no tengan mellas u otras dañaduras. Cuando se presionan las reglas por un extremo, entre ellas no debe quedar ningún espacio. Las reglas deben girar libremente alrededor de los cojinetes.

Comprobación de los bordes de las reglas

Los bordes de las reglas deben ser rectos. Para comprobarlo debe trazarse en uno de los bordes una línea fina en una hoja de papel, y luego girando las reglas en 180° hacer coincidir este mismo borde con la línea. Si todos los puntos de la línea coinciden con el borde de la regla, quiere decir que está apta para su utilización. De la misma forma debe comprobarse el otro borde.

Comprobación del paralelismo de los bordes

Para realizar esta comprobación se traza una línea fina en un papel a lo largo de uno de los bordes, luego se traslada la regla por el papel hasta hacer coincidir el otro borde con esta línea. Si todos los puntos de la línea coinciden con el otro borde, significa que ambos bordes son paralelos entre sí.

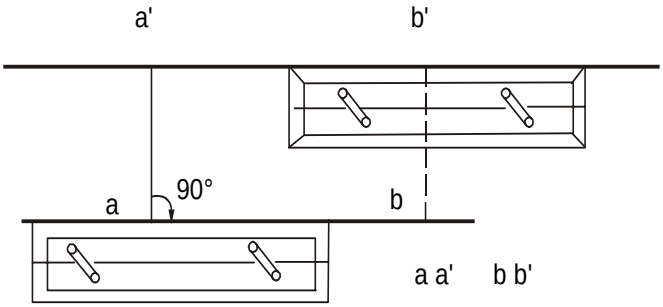


Fig. 129 Regla paralela

Comprobación del paralelismo de la línea transportada

Para efectuar esta comprobación es necesario trazar una línea fina en un papel a lo largo de uno de los bordes de las reglas, luego las reglas se trasladan por el papel a determinada distancia y se traza una

segunda línea. Posteriormente se trazan dos perpendiculares a las paralelas. El espacio entre ambas perpendiculares en las líneas paralelas debe ser igual. En este caso las líneas trazadas son paralelas (Fig. 129)

El transportador

El transportador está es un semicículo con divisiones que van de grado en grado con un diametro de 0°-180° Puede tener diferentes formas, aunque su destino es el mismo- medir las direcciones en la carta tales como Rv, Mv, y Mr.

En la parte inferior del transportador tiene una marca ( ) que sirve como centro al arco que esta dividida en grados y decimas.

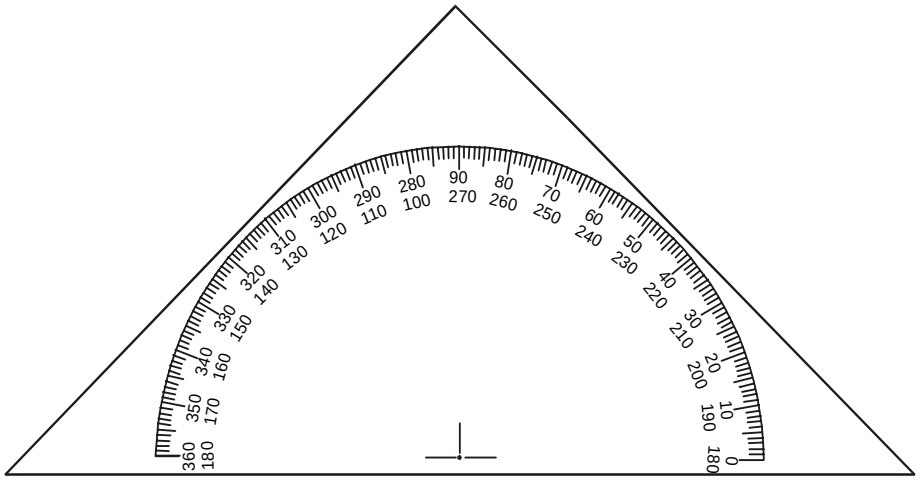


Fig. 130 Transportador de ángulo

El transportador sirve para medir direcciones en la carta, tales como Rv, Mv y Mr.

Ejemplo: Medir una marcación en la carta náutica. Mv = 0,60° (Fig130a).

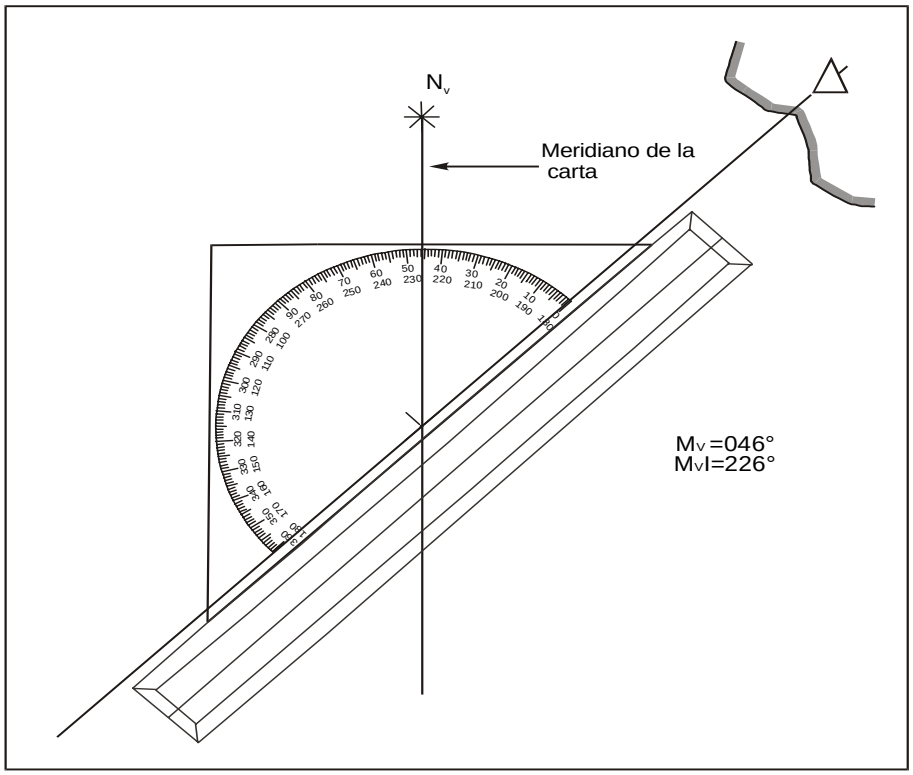


Fig. 130a Medición de la marcación en la carta

Transportador de uso múltiple

El transportador TUM como se puede observar tiene forma cuadrada. Posee dos escalas numéricas. La escala interior está dividida de 0° a 360° en sentido contrario a las agujas del reloj. Esta escala se utiliza para medir o trazar direcciones en la carta (marcaciones y rumbos) : La escala exterior dividida también de 0° a 360° pero en sentido horario se emplea como rosa común. La red de líneas paralelas que se encuentran orientadas en el sentido de las fechas que están a ambos lados del transportador y su índice en forma triangular colocado hacia arriba (en dirección hacia el norte) se utilizan para medir las direcciones).

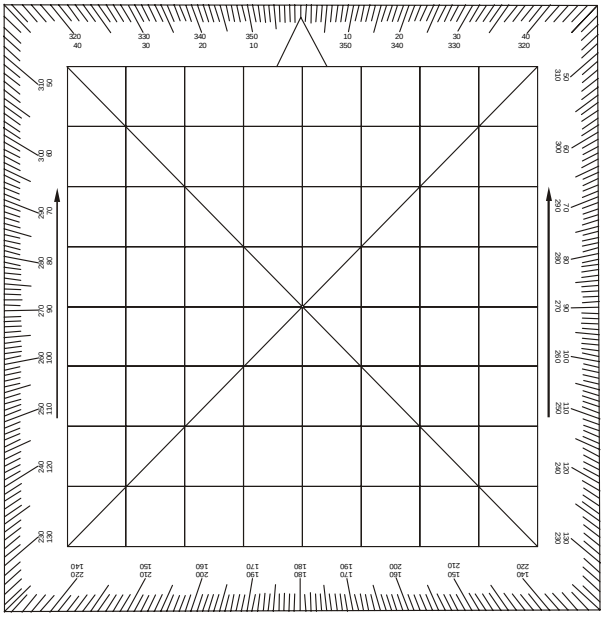


Fig. 131 Transportador de uso múltiple

Instrucciones para su operación

1. Medición de una dirección trazada en la carta.

a). Alinee el borde derecho o izquierdo (donde se encuentran las flechas) o cualquier línea que estén en la misma dirección con la línea de marcación o línea de rumbo.

b) Manteniendo esta alineación, mueva el transportador hasta que su orificio (centro del instrumento) se encuentre en el centro del meridiano más cercano.

c) Haga la lectura en el meridiano por la escala interior.

Ejemplo 1. Determinar el valor de la marcación trazada en la carta (Fig.132)

Ejemplo 2. Trazado de una marcación o rumbo en la carta (Fig.133).

a) Haga coincidir el centro del orificio en el meridiano y utilice la escala interior; coloque el valor de la marcación en el transportador, las flechas orientadas en dirección de la marcación.

b) Trace la línea de marcación por el borde superior o inferior según convenga

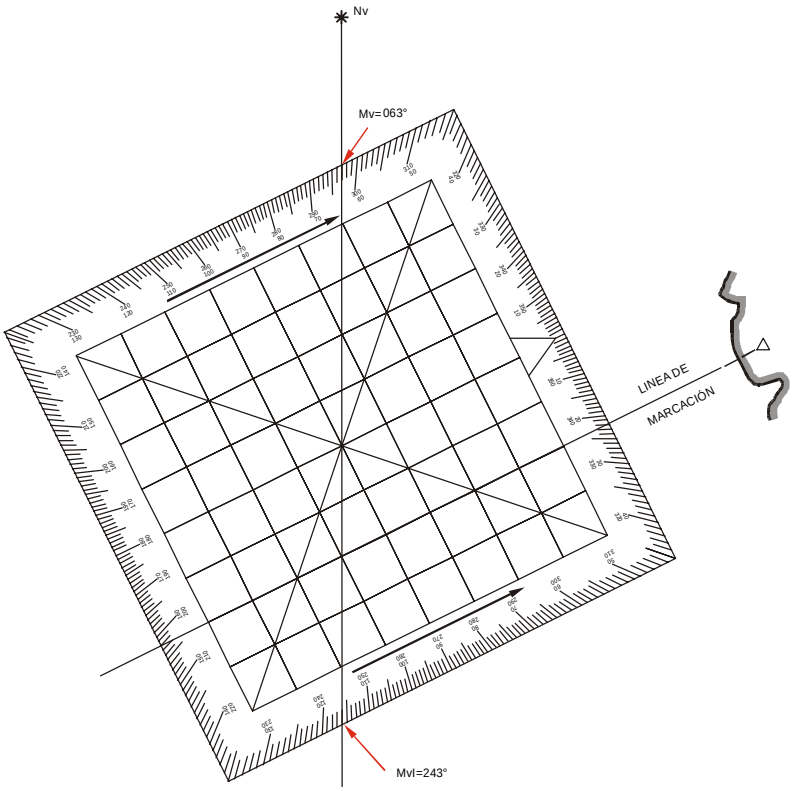


Fig. 132 Determinación del valor de la marcación trazada en la carta

Ejemplo: Trazar Rv=305

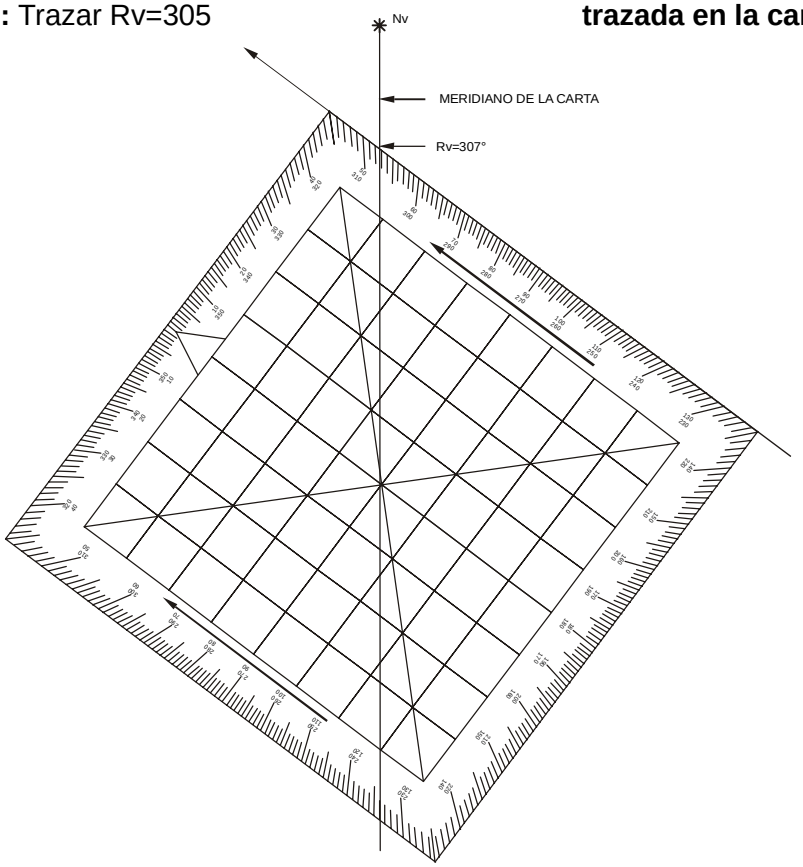


Fig. 133 Trazado del rumbo verdadero en la carta

3. Utilización del transportador como transportador de brazos

Plotee las marcaciones o ángulos horizontales en la superficie del transportador utilizando un lápiz graso o un lápiz blando para cartas y haga coincidir las líneas determinadas por los ángulos con cada uno de los objetos, el centro del orificio será la posición del buque (Fig. 134)

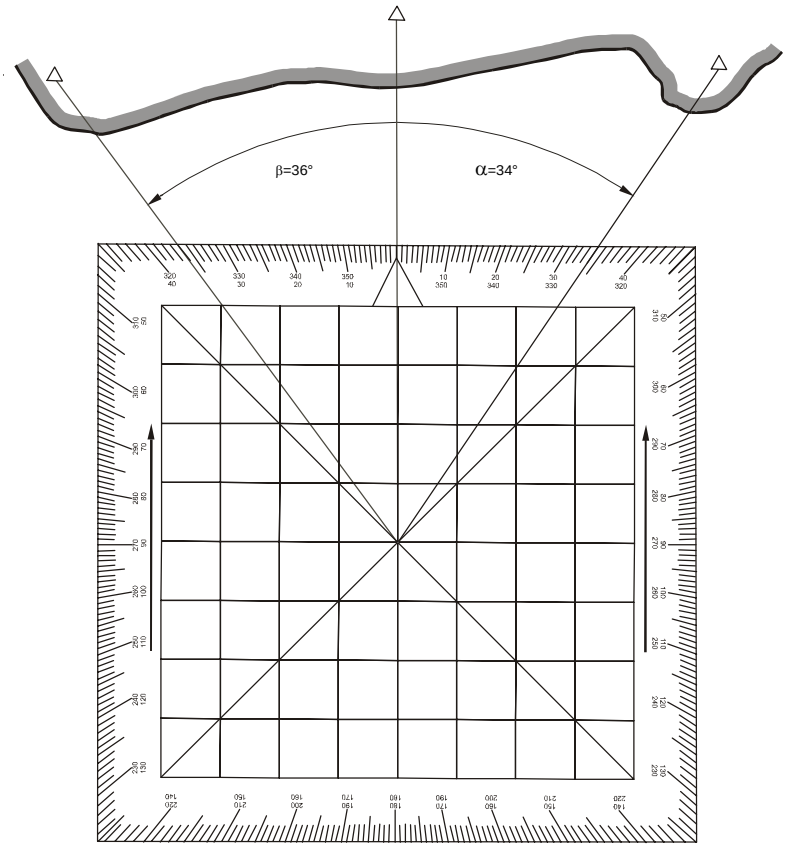


Fig. 134 Determinación de la posición por ángulos horizontales utilizando el transportador de uso múltiple

5.7 Solución de tareas elemetales en la carta náutica

Tarea 1: Tomar las coordenadas φ y λ de un punto dado en la carta

Solución:

Colocamos una punta del compás sobre el punto dado y lo abrimos de forma que la segunda punta, describiendo una circunferencia haga tangencia con el paralelo más cercano.

Con esa misma abertura el compás es llevado a la escala vertical, colocamos una punta sobre el paralelo y la otra punta nos indica la latitud del punto con una exactitud hasta de 0,1'. Para tomar la longitud de un punto hacemos lo mismo pero esta vez hacemos tangencia con el meridiano, y con la misma abertura llevamos el compás a la escala horizontal y leemos la longitud con una exactitud hasta de 0,1' (Fig. 135).

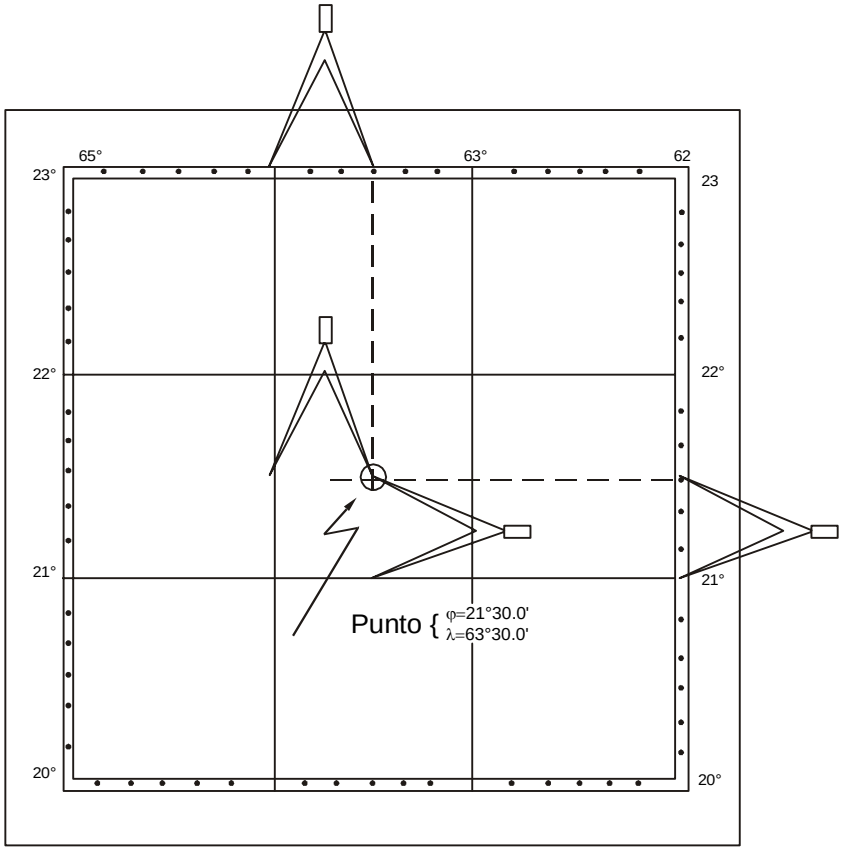


Fig. 135 Toma de coordenadas de un punto

Tarea 2: Plotear en la carta un punto de acuerdo a las coordenadas dadas

En el borde lateral de la carta se plotea la latitud dada y se lleva un borde de las reglas paralelas desde el paralelo más cercano hasta ella. Se determina la longitud correspondiente en el marco superior o inferior de la carta, y se coloca el compás con una abertura igual a la distancia entre el meridiano más cercano y el valor correspondiente a la longitud del punto a plotear.

Con esta misma abertura por el borde de la regla, correspondiente a la longitud y desde el mismo meridiano se traza en la dirección medida. El punto obtenido será el punto que se quería plotear (Fig. 136).

Plotear la posición cuyas coordenadas son: φ = 31°30,0'; λ = 53°33,5'

Tarea 3: Medición de la distancia entre dos puntos

Para la medición de la distancia entre dos puntos, se abre el compás de tal forma que cada pata coincida con uno de los puntos. La abertura del compás correspondiente a esta distancia se traslada al marco vertical de la carta en la misma latitud que se encuentran los puntos. La cantidad de minutos de latitud entre las patas del compás será igual a la distancia medida en millas.

La medición de distancias se realiza con una exactitud de 0,1 millas (Fig. 137)

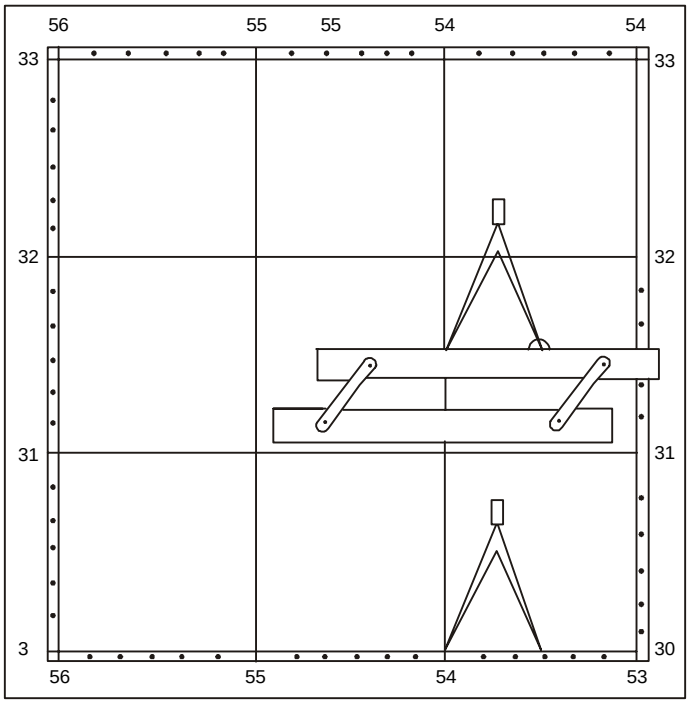


Fig. 136 Ploteo de un punto de acuerdo a sus coordenadas

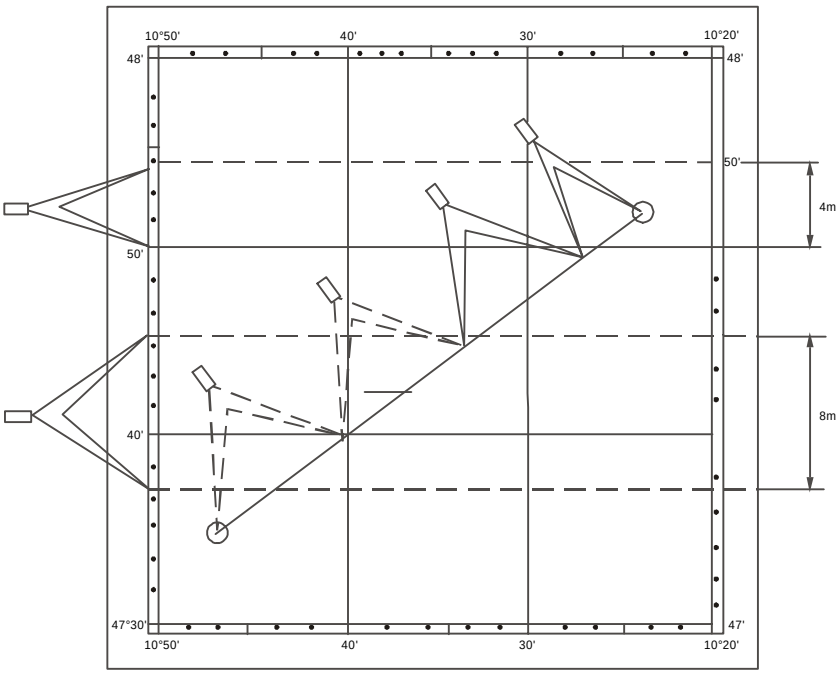


Fig.137 Medición de la distancia entre dos puntos

D_{AB} = 3 veces 8 m + 4 m = 18 m.

Tarea 4: Trazar la marcación o el rumbo verdadero desde un punto dado

Se coloca el transportador en el meridiano más cercano de tal forma, que su punto central y el valor del rumbo o marcación verdadera coincidan con el meridiano.

Se presiona el transportador a la carta y se llevan las reglas paralelas a su regla, luego se retira el transportador y las reglas paralelas se van desplazando hasta que una de ellas coincida con el punto dado. Por el punto y el borde de la regla que coinciden con él se traza una línea que será el rumbo o marcación verdadera dada.

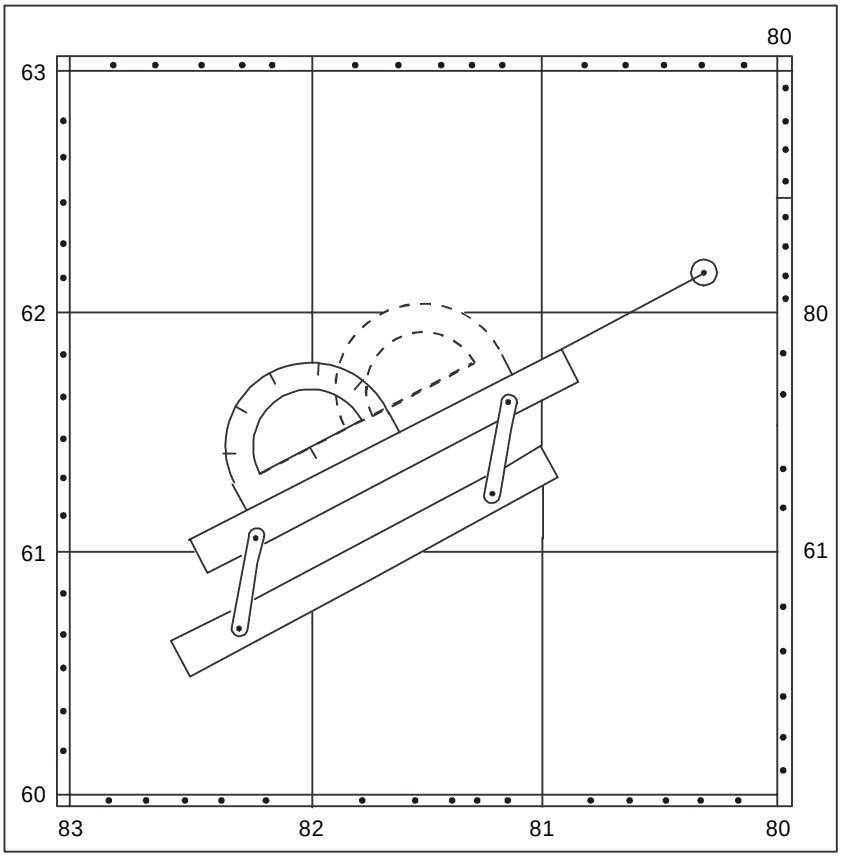


Fig. 138. Trazar la marcación o el rumbo verdadero desde un punto dado.

Tarea 5: Determinación de la dirección de una línea trazada en la carta. (Rumbo verdadero o marcación verdadera).

Las reglas paralelas se colocan de tal forma que uno de sus bordes coincida con la línea trazada, luego se coloca el transportador, haciendo coincidir su regla con el borde de las reglas paralelas y su centro con el meridiano. La lectura del transportador que está frente al meridiano corresponde a la dirección medida (Fig. 139).

Tarea 6: Trazar en la carta determinada distancia desde un punto cuya dirección se conoce.

La distancia a trazar se toma del marco vertical de la carta y en la latitud que se va a plotear, con la abertura del compás. Luego una pata del compás se coloca en el punto dado y en la línea dada, con la otra pata, se marca un punto. El segmento obtenido corresponderá a la distancia a ploteo (Fig. 140).

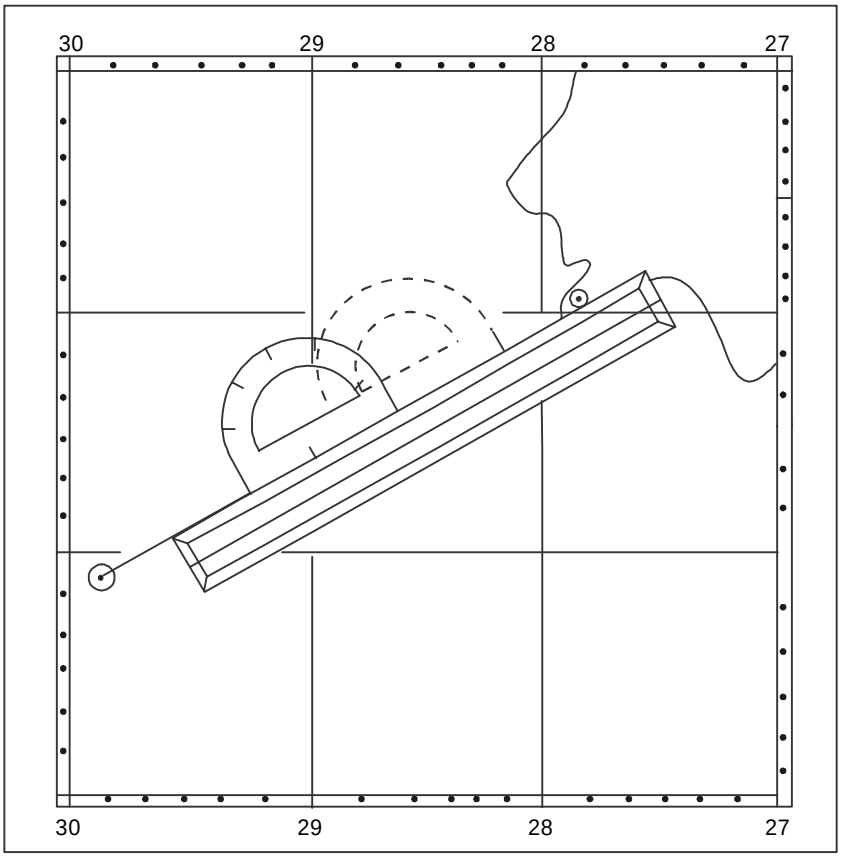


Fig. 139 Determinación de la dirección de una línea trazada en la carta

Tarea 7: Trasladar un punto de una carta a otra

La tarea se resuelve con ayuda de la regla paralela, transportador y compás y puede ser realizada por dos métodos: por las coordenadas geográficas o por marcación y distancia:

1er método: Por las coordenadas geográficas: (Fig 141a)

En la primera carta se miden la latitud y longitud del punto dado (B) y se anotan. Por las coordenadas tomadas, el punto se plotea en la segunda carta . Para el control se mide la latitud longitud del punto ploteado es la segunda carta y se compara con las coordenadas del punto que se encuentra en la primera carta.

2do Método. Por marcación y distancia

Desde el punto dado en la primera carta tomamos una marcación y distancia a un punto de referencia común a las dos cartas. En la segunda carta desde ese punto notable o de referencia trazamos la marcación verdadera anteriormente tomada y marcamos sobre esa marcación la distancia previamente medida. Obtendremos el punto en la segunda carta (Fig. 142).

Este método se utiliza al navegar cerca de la costa y cuando las cartas son de la misma escala.

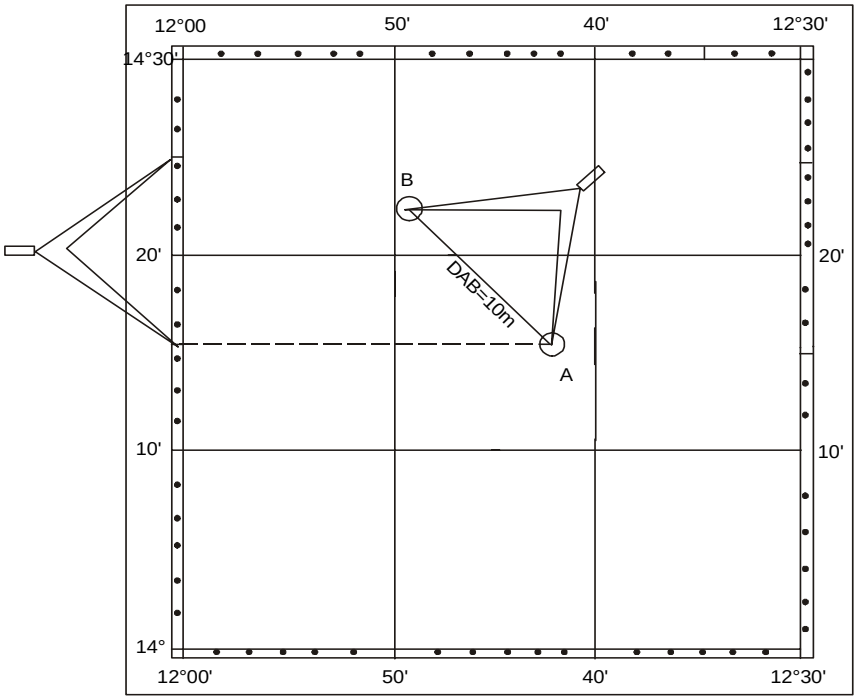


Fig. 140 Trazar determinada distancia desde un punto cuya dirección se conoce

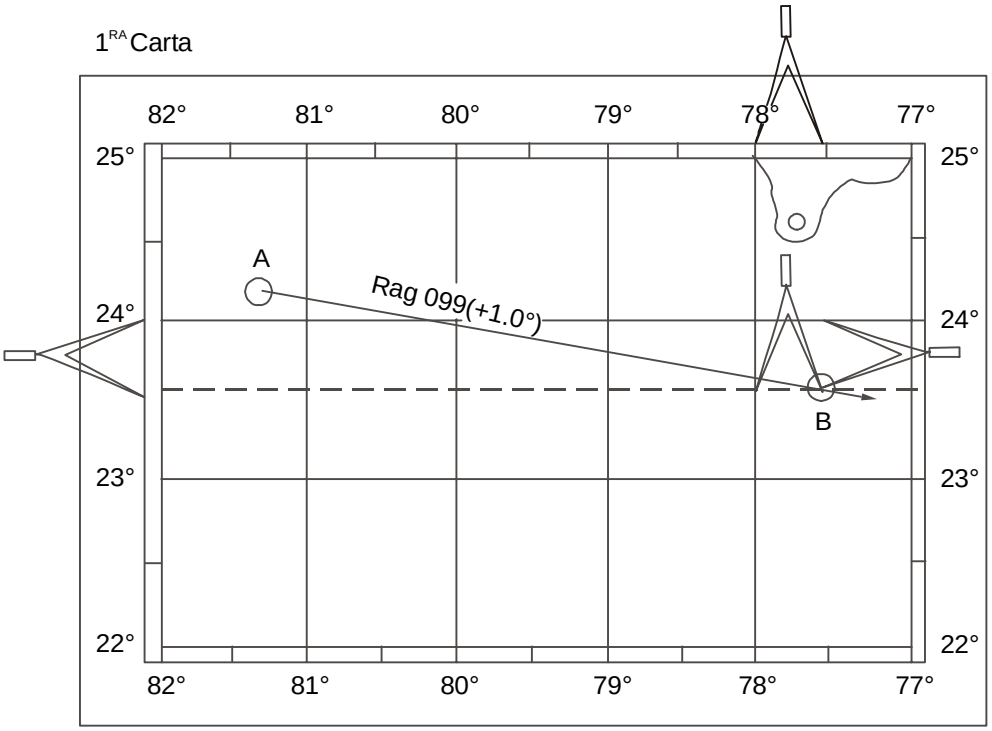


Fig.141a Trasladar un punto de una carta a otra por las coordenadas geográficas

.

2da carta

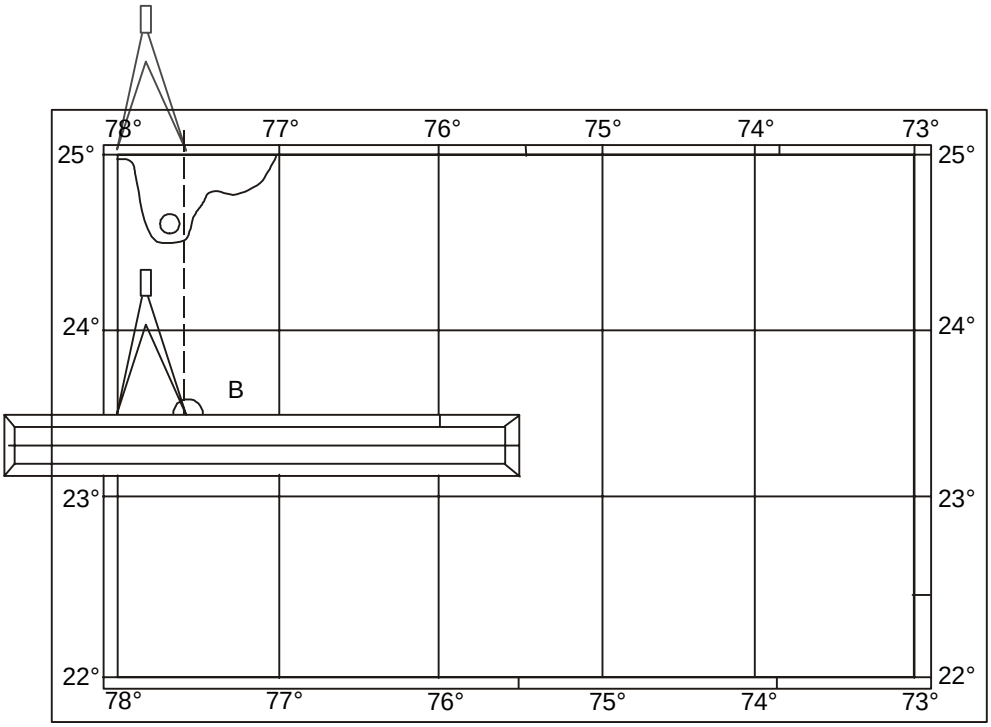


Fig.141b Trasladar un punto de una carta a otra por las coordenadas geográficas

1RA Carta

a)

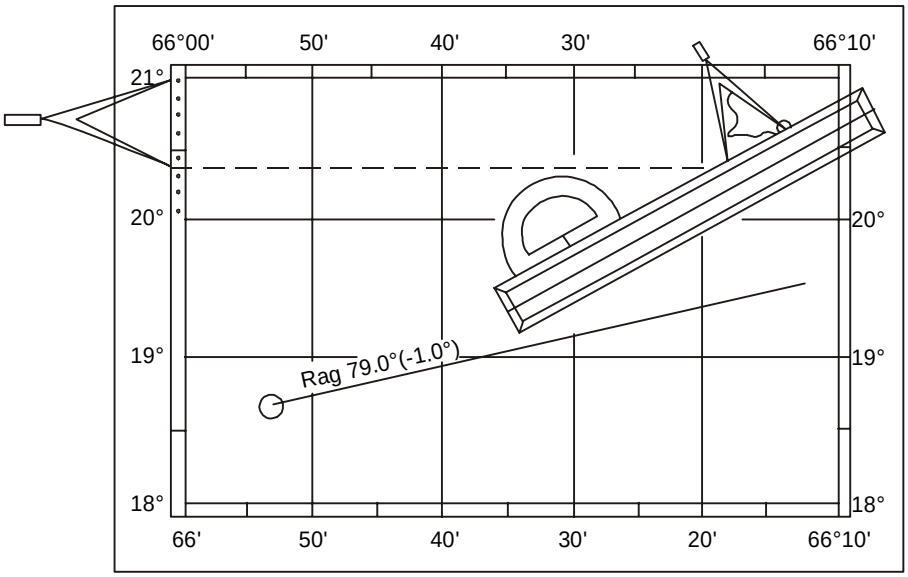


Fig. 142a Trasladar un punto de una carta a otra por marcación y distancia

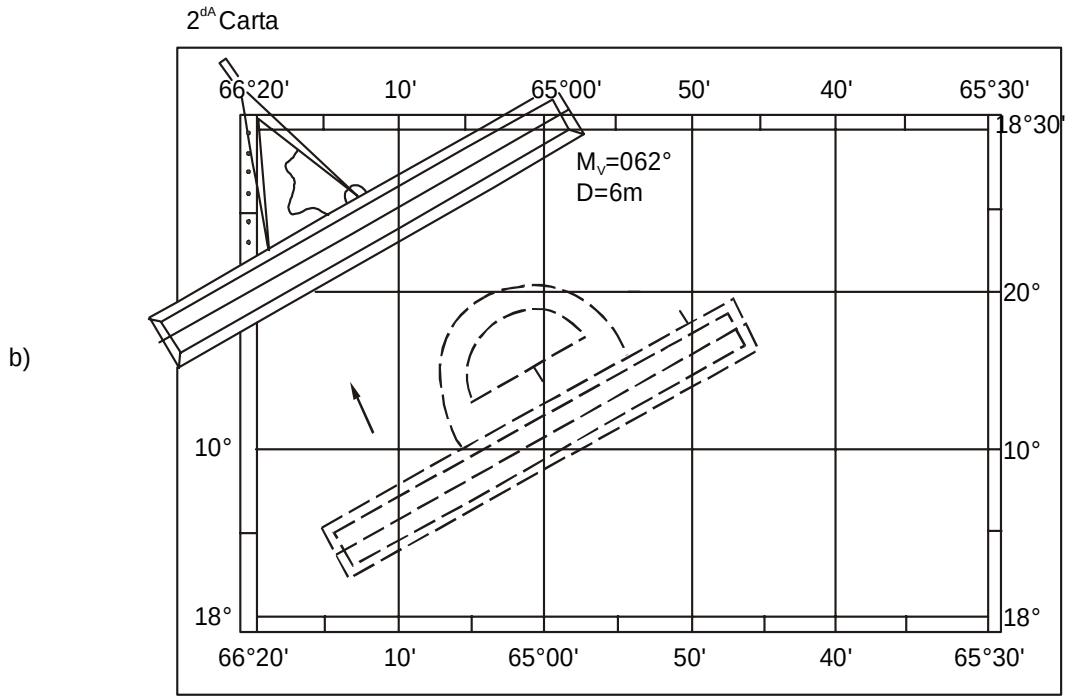


Fig.142b Trasladar un punto de una carta a otra por marcación y distancia

5.8 Nociones sobre el giro. Consideración del círculo de evolución en el método gráfico de la estima

La capacidad que tiene el buque de variar la dirección de su movimiento con ayuda del timón o las máquinas se llama maniobrabilidad.

Cuando el buque varía la dirección de su movimiento (rumbo) se traslada por una trayectoria curva.

La trayectoria curva, por la cual se traslada el buque bajo el efecto del timón o las máquinas se llama **círculo de evolución.**

El círculo de evolución tiene la forma de una línea curva compleja (Fig. 143).

Cuando el timón cae a una banda en el punto A, el buque durante cierto tiempo mantiene su movimiento por el rumbo anterior y sólo se desplaza insignificantemente hacia el lado contrario al giro.

Este intervalo de tiempo se llama intervalo muerto.

Durante el intervalo muerto el buque se traslada hasta el punto B, donde comienza a moverse por la curva que inicialmente tiene curvatura variable, hasta el punto C. El segmento del círculo de evolución BC se llama **giro inestable**.

El giro inestable dura hasta que el rumbo varía en 90° - 120° (punto C).

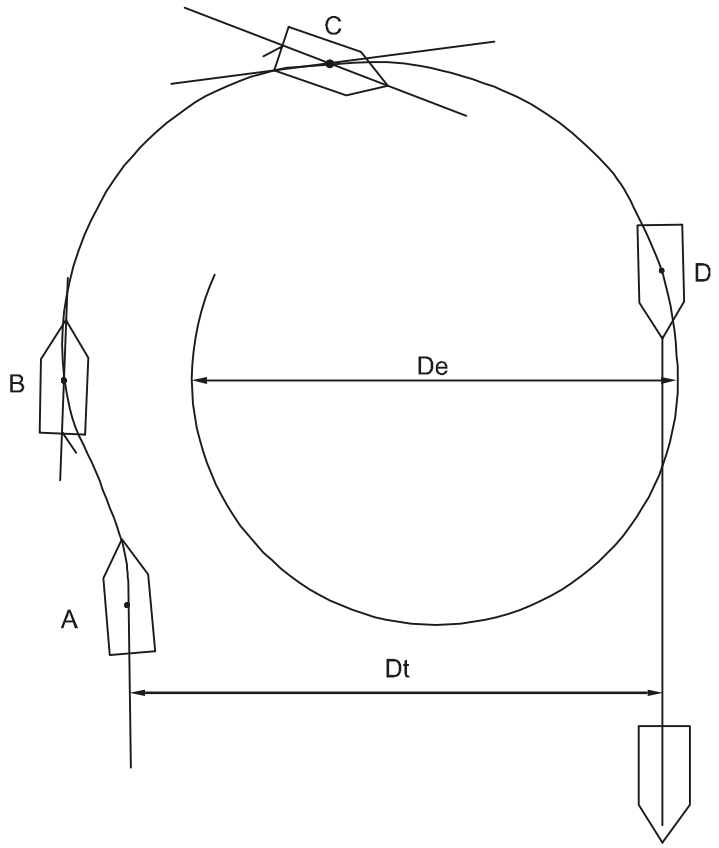


Fig. 143 Círculo de evolución

A partir del punto C la curva del círculo de evolución toma la forma de una circunferencia y este segmento se llama **giro estable**.

Durante el círculo de evolución el plano diametral del buque forma determinado ángulo con la tangente a la curvatura del círculo. Este ángulo se llama **ángulo de abatimiento en el círculo**. El ángulo de abatimiento surge en el punto B y alcanza su valor máximo en el punto D, donde el buque varía su rumbo en 180°.

La distancia entre la línea inicial del rumbo y la línea cuando el rumbo varío 180° se llama **diámetro táctico del círculo de evolución** Dt.

El diámetro de la circunferencia por la cual se trasladará el centro de gravedad del buque en el círculo de evolución estable se llamará diámetro táctico del giro estable De.

El tiempo que transcurre para que el buque varíe su rumbo en los primeros 180° se llama **semiperíodo de giro** $\mathbf{t_{180°}}$.

La presencia del ángulo de abatimiento origina que la resistencia del agua al movimiento del buque sea mayor, por eso se observa una disminución de la velocidad de desplazamiento del buque. Este fenómeno se **llama pérdida de velocidad en el círculo de evolución** y puede alcanzar el 50 - 60% de la velocidad inicial.

Para el cálculo del círculo de evolución en la estima gráfica se utiliza el diámetro táctico del círculo de evolución Dt y el semiperíodo de giro $t_{180°}$.

El diámetro táctico del círculo de evolución depende de las particularidades constructivas del buque (eslora, manga, área de la pala del timón, etc) y del ángulo que forma la pala del timón con el plano diametral. La dependencia que tiene el diámetro táctico del círculo de evolución respecto a la velocidad es insignificante.

El semiperíodo de giro $t_{180°}$ depende del ángulo que forma la pala del timón con el plano diametral y de la velocidad del buque.

1. Determinación del diámetro táctico del círculo evolutivo

El diámetro táctico se puede determinar por diferentes métodos. El más sencillo es determinado en la base medida (Fig.144). Conjuntamente con el diámetro táctico del círculo de evolución se determina el semiéríodo de giro. Para determinar el diámetro táctico se selecciona una de las enfilaciones y una señal de la otra enfilación. La distancia S entre la enfilación y la señal será igual a la distancia entre enfilaciones.

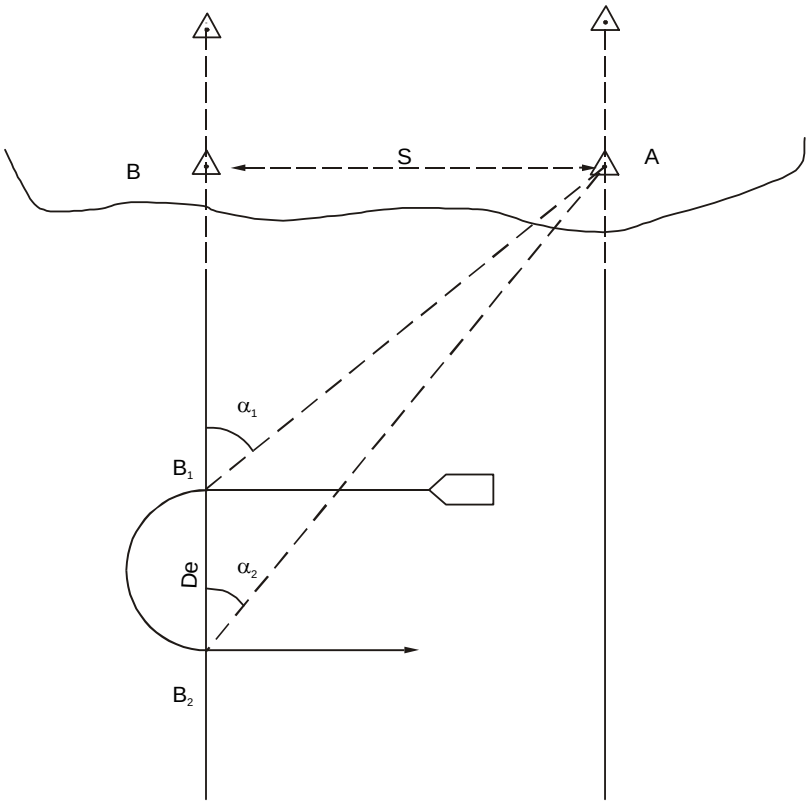


Fig.144 Determinación del diámetro del círculo de evolución

El buque debe caer a un rumbo perpendicular a la línea de enfilación y en el momento en que la carta (punto B_1) se da la orden de dar el giro y se mide el ángulo horizontal α_1 con ayuda del sextante entre la línea de enfilación y la señal. A un mismo tiempo se echa a andar un cronógrafo. Cuando el buque realiza un giro de 180° se detiene el cronógrafo, obteniéndose el semiperíodo de giro, y se da la orden de poner el timón a la vía manteniéndose el rumbo.

En el momento cuando el buque nuevamente corta la línea de enfilación (B_2) se mide el ángulo horizontal α_2 de la señal y la enfilación.
Análogamente se determinan los elementos evolutivos al girar en sentido contrario.

A continuación se repiten las observaciones pero con otro ángulo de timón (E_R 25°;B_R 35°)

El diámetro del círculo de evolución (Dt)se calcula por la fórmula (142) deducida de los triángulos AB_1B y AB_2B, donde:

$$B_1B = AB\cot\alpha_1$$

$$B_2B = AB\cot\alpha_2$$

$$Dt = B_1B - B_2B = AB\cot\alpha_1 - AB\cot\alpha_2$$

$$Dt = AB(\cot\alpha_1 - \cot\alpha_2) \qquad (142)$$

El semiperíodo $T_{180°}$ se calcula por la fórmula $T_{180} = t_2 - t_1$.

2. Por radar

El buque toma un rumbo calculando para pasar por una boya a una distancia S = Dt y desarrollando la velocidad asignada. En el momento en que la boya se encuentra por el través del buque se lleva el timón a un ángulo determinado, se echa a andar los cronógrafos, se toma la lectura de la corredera (Lc_1) y la velocidad (V) , se mide por el radar la Mv y D a la boya, se toma t_2 y Lc_2 en el momento en que el rumbo ha variado en 180°.

Posteriormente se miden las Mv y D cada 10° ó 20° de variación del rumbo. Después se plotea la boya en el centro de una rosa de maniobra y por Mv y D se sitúa la posición del buque (Fig. 145) obteniéndose una serie de puntos, por los cuales, interpolando a simple vista trazamos una circunferencia y medimos Dt y calculamos $T_{180} = t_2 - t_1$.

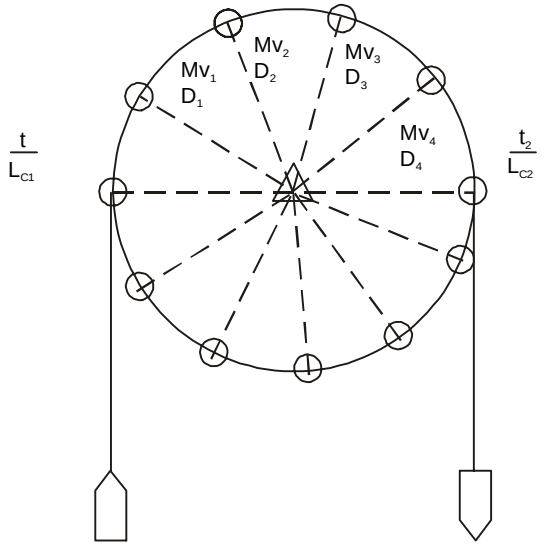


Fig. 145 Determinación del diámetro táctico con ayuda del radar

3. Determinar del diámetro táctico por distancia de través

En el momento cuando el buque se encuentra con un objeto en el través se da la orden al timón para el comienzo del giro y se mide la distancia de través hasta este objeto. Al terminar el giro, es decir cuando

el buque se encuentra en el rumbo inverso, en el momento del través de nuevo se mide la distancia hasta el objeto. El diámetro táctico en este caso es igual a la diferencia de las distancias medidas en el través (Fig. 146).

$Dt = D_2 - D_1$

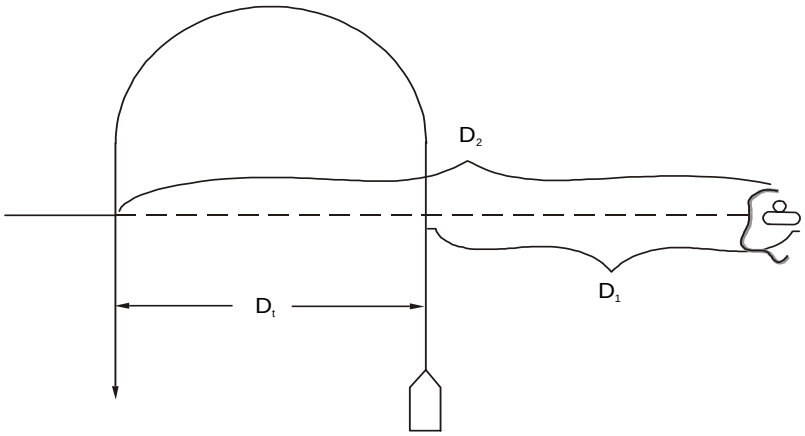


Fig. 146 Determinar del diámetro táctico por distancia de través

4. Determinación del diámetro táctico por la eslora del buque

Después de desarrollar la velocidad establecida del buque se lanza un flotador (boyarín o pedazo de madera), dentro de 15 - 20 segundos se da la orden al timón y el buque comienza a girar. En el rumbo inverso cuando el primer flotador se observe por el través (Fig. 147), se lanza el segundo flotador. Después el buque pasa por la línea que une ambos flotadores, y se mide la distancia entre ambos flotadores mediante la eslora del buque de forma análoga como se hace durante la determinación del espacio recorrido por la inercia del buque. Esta distancia será el diámetro táctico.

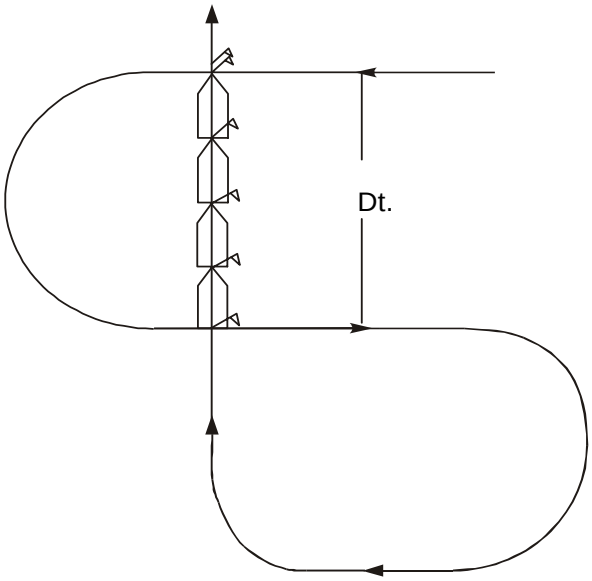


Fig. 147. Determinación del diámetro táctico por la eslora del buque

En la estima gráfica la curva compleja del círculo se sustituye por una circunferencia. El radio de esta circunferencia será el radio del círculo de evolución Rt, determinado experimentalmente, siendo conocido en el buque en todo momento.

La consideración del círculo de evolución en la navegación de estima puede efectuarse gráficamente o por tablas.

1. Consideración gráfica del círculo de evolución:

En el cálculo gráfico la curva del círculo de evolución se traza en la carta con ayuda de un compás. En este método se determinan los puntos de comienzo y fin del giro.

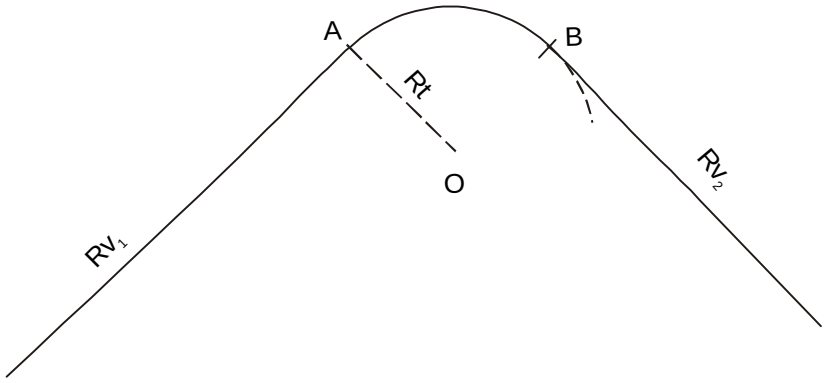


Fig. 148 Cálculo gráfico del círculo de evolución

Tarea 1. Determinar el punto donde final del giro, si se conoce el punto inicial del giro y el nuevo rumbo a tomar

Esta tarea se resuelve de la siguiente forma:

Desde el punto A de comienzo del giro se traza una perpendicular al rumbo inicial Rv_1 hacia el lado del giro. En la perpendicular se traza el radio del círculo de evolución Rt. El punto 0 determinado será el centro de la circunferencia (Fig. 148).

Con un radio igual a Rt desde el punto 0 se traza el arco de circunsferencia, que será la trayectoria del buque durante el giro. Por la tangente al arco de circunferencia se traza la línea del nuevo rumbo Rv_2. El punto B tangente será el punto final del giro.

Tarea 2. Determinar los puntos inicial y final del giro cuando se conoce el rumbo inicial y se tiene en la carta el nuevo rumbo

Esta tarea se resuelve de la siguiente forma:

Las líneas de los rumbos verdaderos Rv_1 y Rv_2 se prolongan hasta su intersección en el punto C. (Fig. 149). Desde dos puntos arbitrarios a y b en la línea del primer y segundo rumbo se trazan arcos de circunferencia con un radio igual a Rt.

Por las tangentes a estos arcos de circunferencia y paralelamente a los rumbos Rv_1 y Rv_2 se trazan dos líneas hasta su intersección en punto 0 , que será el centro de la circunferencia del círculo de evolución. Con un radio igual a Rt y haciendo centro en el punto 0 se traza un arco circunferencia que será el círculo de evolución.

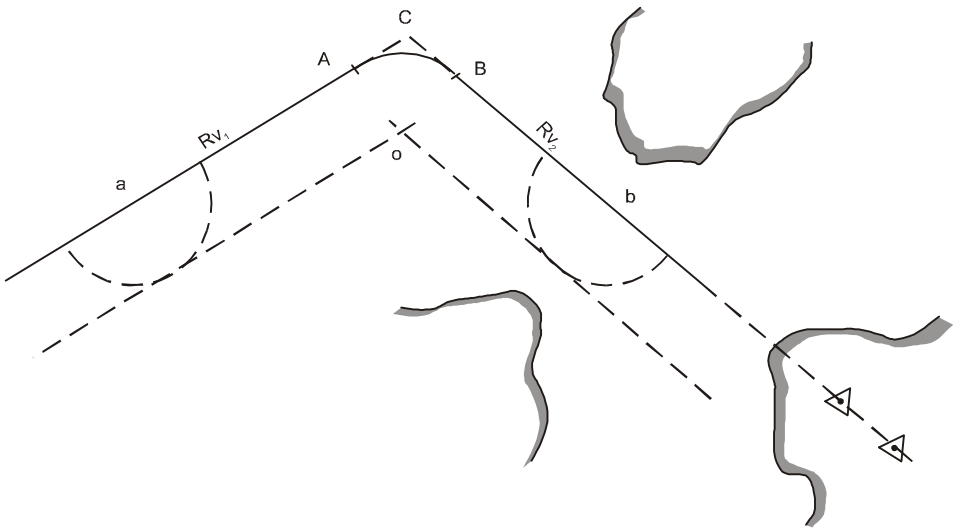


Fig. 149 Cálculo gráfico del punto inicial y final del círculo evolutivo

Los puntos tangentes A, al rumbo inicial Rv_1 y B, al nuevo rumbo Rv_2, serán los puntos inicial y final del giro.

2. Consideración del círculo de evolución por tablas

La esencia del método tabular de consideración del círculo de evolución se encierra en que los puntos inicio y final del giro se determinan por el ploteo de la cuerda AB (Fig.150), la cual determina el arco de circunferencia del círculo de evolución y los segmentos AC y BC son las distancias desde el punto de intersección de las líneas de rumbo hasta los puntos inicial y final de giro.

Para la solución de esta tarea se utiliza la tabla del círculo de evolución que contiene los elementos siguientes:

α - Ángulo de giro (valor de la variación del rumbo).

$$\alpha = Rv_2 - Rv_1$$

d_1 - Distancia desde el inicio del giro hasta la línea del nuevo rumbo.

q - Marcación relativa del rumbo intermedio, que determina la dirección desde el punto inicial del giro A hacia el punto del giro B, con relación a la línea Rv_1.

d - Longitud del rumbo intermedio, que es la distancia entre el punto A, donde comienza el giro y el punto B, donde este termina.

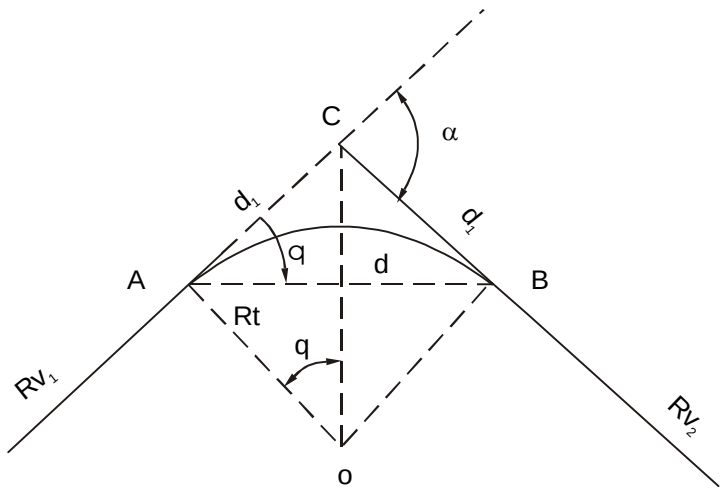


Fig. 150 Deducción de la fórmula para el cálculo del círculo de evolución

Los elementos señalados se calculan por la fórmula propuesta por Domogarov:

$$d_1 = R_t \tan\frac{\alpha}{2}; \tag{143}$$

$$q = \frac{\alpha}{2} = \frac{Rv_1 - Rv_2}{2}; \tag{144}$$

$$d = R_t \operatorname{sen}\frac{\alpha}{2}. \tag{145}$$

Los valores d_1, q, y d se toman de la tabla del círculo de evolución por el ángulo de giro. En las tablas TUN aparece la tabla 30 para el cálculo de los elementos del círculo de evolución del buque.

Cuando se considera el círculo de evolución por tablas se resuelven dos tareas fundamentales:

Tarea 1: Determinar el punto final del giro cuando conoce el punto inicial y el nuevo rumbo

Esta tarea se resuelve por dos métodos.
1er método: Consideración del círculo de evolución por el rumbo intermedio: De acuerdo al ángulo de giro $\alpha = Rv_1 - Rv_2$, en las tablas del círculo de evolución se toma la marcación relativa del rumbo intermedio (q) y su distancia (d).

Se calcula el rumbo intermedio Rv_{int}.

$$Rv_{int} = Rv_1 \pm q \frac{\text{(giro a estribor)}}{\text{(giro a babor)}}.$$

Desde el punto A, donde comienza el giro se traza el rumbo intermedio y en él se plotea la longitud (d). El punto obtenido B es el punto final de giro, a partir del cual se traza la línea del nuevo rumbo (Fig. 151).

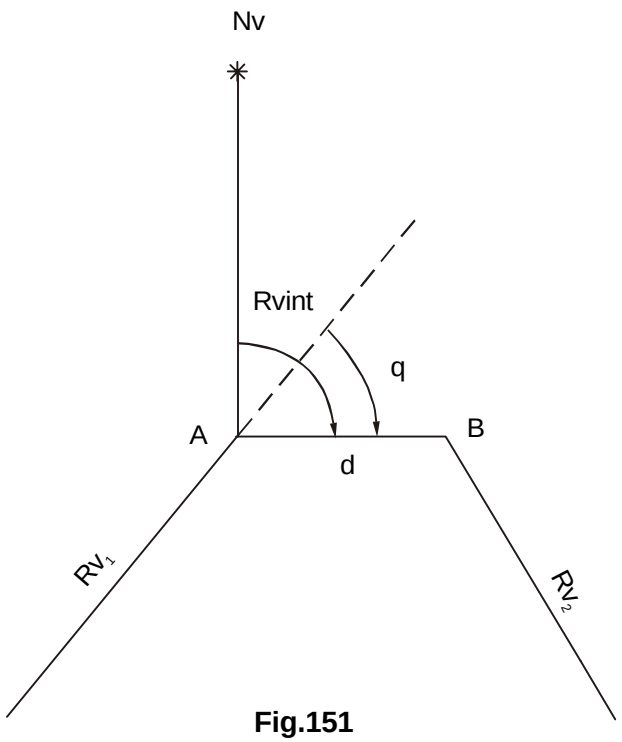


Fig.151

2do método. Consideración del círculo de evolución por la distancia hasta el nuevo rumbo (d_1).

Por el ángulo de giro $\alpha = Rv_2 - Rv_1$, se toma de la tabla la distancia d_1.

Desde el punto inicial de giro (A) se prolonga la línea de rumbo Rv_1, y por ella se traza la distancia (d_1), hasta el nuevo rumbo. Por el punto obtenido (C) se traza la línea de rumbo Rv_2.

Desde el punto C, por la línea del nuevo rumbo se traza la distancia d_1. El punto obtenido (B) es el punto donde finaliza el giro.

En ambos métodos la trayectoria S se toma de las tablas de acuerdo al ángulo de giro.

La elección del método a considerar del círculo de evolución se realiza de acuerdo al ángulo α. Cuando $\alpha < 130°$ el calculo se puede realizar por cualesquiera de los dos métodos.

Cuando $\alpha > 130°$ la consideración del círculo de evolución es conveniente realizarlo a través del rumbo intermedio. Por la distancia hasta el nuevo rumbo es incómodo realizar el cálculo del círculo de evolución, ya que la distancia hasta el nuevo rumbo para $\alpha > 130°$, aumenta bruzcamente y para $\alpha = 180°$ $d_1 \rightarrow \infty$

Tarea 2: Determinar los puntos de inicio y fin del giro cuando se conoce el rumbo inicial Rv_1 **y se toma la distancia hasta el rumbo (d_1)**

a) Para pequeños ángulos de giro. Por el valor de α de la tablilla, se toma la distancia al nuevo rumbo.

Las líneas de los rumbos Rv_1, y Rv_2 se prolongan hasta su intersección en el punto C. Desde este punto, por ambas líneas de rumbos se traza la distancia d_1. Los puntos A y B obtenidos corresponden al inicio y final del giro (Fig. 152).

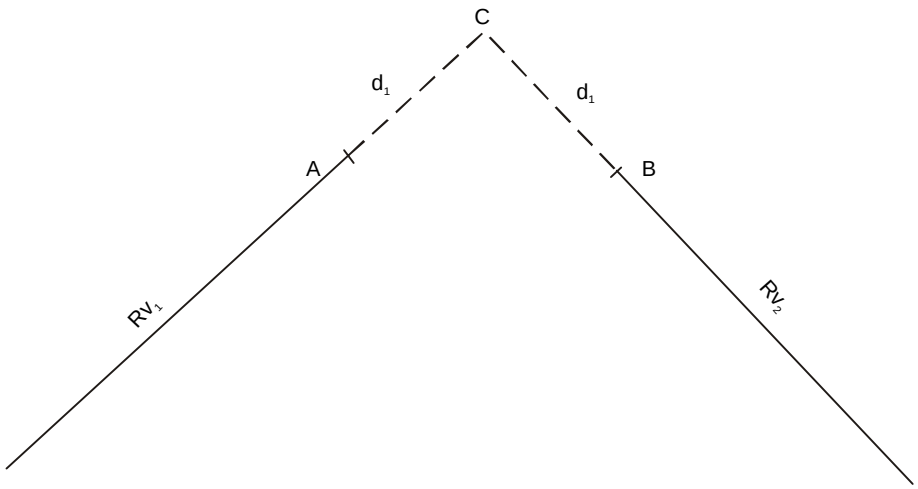


Fig.152

b) Cuando el ángulo de giro es grande, tomándo como argumento este ángulo se elige de las tablas los valores q y d, y se calcula el rumbo intermedio.

$$Rv_{int} = Rv_1 \pm q\frac{(\text{giroaestribor})}{(\text{giroababor})}.$$

Desde un punto arbritario en la línea del rumbo inicial Rv_1 se plotea la línea del rumbo intermedio (Rv_{int}) y en él se traza la distancia (d).

Desde el punto obtenido se traza una línea paralela al rumbo inicial Rv_1hasta su intersección con el nuevo rumbo Rv_2en el punto B, el cual será el punto final de giro.

Desde el punto B se traza una línea paralela (ab), hasta su intersección con la línea del rumbo inicial Rv_1 en el punto A.

Este punto A será el inicio del giro (Fig.153).

En ambos casos la trayectoria S se toma de las tablas del círculo de evolución de acuerdo al ángulo de giro (α) (tabla 5.2).

5.9 Estima gráfica

Las construcciones gráficas del ploteo en las cartas se realizan con lápiz de grafito de una dureza media.

La línea del rumbo se plotea como una línea recta y los círculos de evolución en forma de arcos de circunferencia.

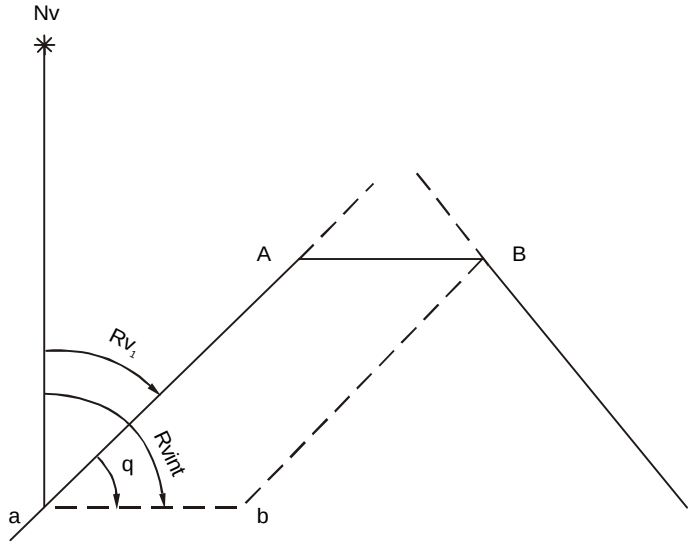


Fig. 153.

Tabla 5.2

V = 18 nudos	Dt = 6 cab	T 180° = 5 min.	Timón = 15°		
Ángulo de giro $\alpha = Rv_2 - Rv_1$	Tiempo de giro. t_α, min.	Trayectoria del giro. S_α, cab.	Rumbo Intermedio		Distancia hasta el nuevo rumbo d_1 cab.
			q	d, cab	
1	2	3	4	5	6
10°	0,3	0,5	5°	0,5	0,5
30°	0,8	1,6	15°	1,6	0,8
50°	1,4	2,6	25°	2,5	1,4
70°	1,9	3,7	35°	3,4	2,1
90°	2,5	4,7	45°	4,3	3,0
110°	3,1	5,8	55°	4,9	4,3
130°	3,6	6,8	65°	5,5	6,4
150°	4,2	7,9	75°	5,8	11,2
170°	4,7	8,9	85°	6,0	
180°	5,0	9,4	90°	6,0	
200°	5,1	10,5	100°	5,9	
220°	6,1	11,5	110°	5,7	
240°	6,6	12,6	120°	5,2	
260°	7,2	13,6	130°	4,8	
270°	7,5	14,1	135°	4,3	
290°	8,1	15,2	145°	3,4	
310°	8,6	16,2	155°	2,5	
330°	9,2	17,3	165°	1,6	
350°	9,7	18,3	175°	0,5	
360°	10,0	18,8	180°	0	

Las líneas deben plotearse con limpieza y su grosor debe ser igual al grosor de las líneas de los paralelos y meridianos.

En la línea de rumbo se señala: los puntos inicial y final de los giros, las posiciones de cambio de velocidad, las posiciones de conexión y desconexión de la corredera, las posiciones correspondientes al **TRAVÉS** con los objetos más visible en la carta, la posición del buque a las horas 0, 4, 8, 12, 16, 20, etc.

Las posiciones de estima se simbolizan por una raya corta de 1 - 2 mm y se plotean perpendicularmente a la línea del rumbo.

Al lado de cada posición se anota, en forma de quebrado, la hora y la lectura de la corredera. La hora se anota con una exactitud de 1 min. y cuando la velocidad es menor de 12 nudos y con una exactitud de 0,5 min cuando la velocidad es de 12 a 24 nudos.

Cuando la velocidad es mayor de 24 nudos la hora se escribe con una exactitud de 0,1min Las lecturas de la corredera se anotan con una exactitud de 0,1 milla.

Si por alguna causa no se puede tomar la lectura de la corredera, entonces cerca de las posiciones se escribe sólo la hora.

El guión que representa el quebrado en la rotulación de las posiciones debe plotearse siempre paralelo a los paralelos de la carta.

A lo largo de la línea del rumbo, en los lugares más cómodos se anota el valor del (Ram) y la corrección total del compás, por el cual se lleva la derrota.

Las posiciones de fondeo se plotean mediante un símbolo que representa un ancla (Fig 154)

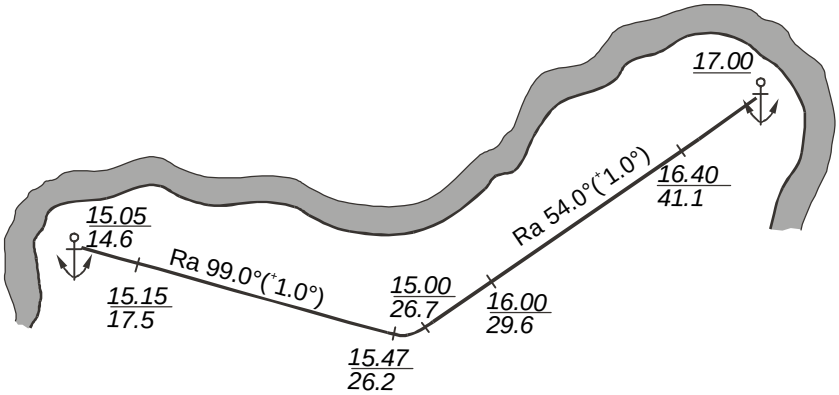


Fig.154 Gráfico del trazado

5.10 Navegación de estima considerando el abatimiento

1. Influencia del viento sobre el buque. Abatimiento

Los buques de superficie y los submarinos al navegar por la superficie del agua se encuentran en la frontera de los medios: acuáticos y aéreos. Las masas de aire que se desplazan, ofrecen determinada presión sobre la obra muerta del buque, lo que ocasiona que éste se desvia de la trayectoria planificada y que su velocidad varíe.

La desviación del buque de la trayectoria planificada bajo la influencia del viento se llama **abatimiento.** El abatimiento es originado por el viento aparente W, que es la suma geométrica del viento verdadero U y el viento V que surgen a causa del movimiento del buque.

$$W = U + V \qquad (146)$$

El viento V, originado por el movimiento del buque, está dirigido al encuentro de éste y su velocidad es igual a la velocidad del buque (Fig. 155).

Como resultado de la acción del viento aparente W en el buque surge la fuerza **aerodinámica** P, aplicada al centro de arboladura de la obra muerta del buque. La dirección de acción de esta fuerza no coincide con la dirección de acción del viento aparente y forma el ángulo $\gamma \neq q_W$ con el plano diametral del buque, (Fig156) donde q_w - marcación relativa del viento aparente.

La fuerza P se puede dividir en dos componentes:

Px - Fuerza paralela al plano diametral del buque.

Py - Fuerza perpendicular al plano diametral.

La componente Px varia la velocidad de movimiento del buque.

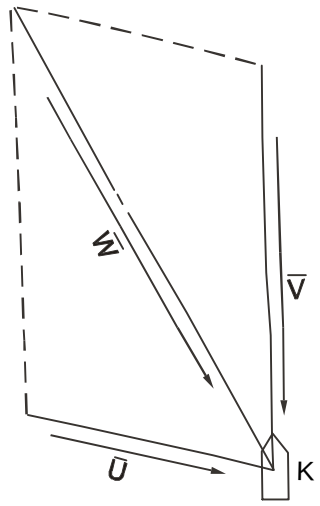


Fig. 155 Esquema para el cálculo del viento aparente

En dependencia de la dirección de esta fuerza la velocidad del buque aumenta o disminuye.

El aumento de la velocidad es poco frecuente, ya que cuando el viento es fuerte, generalmente es acompañado por el oleaje que disminuye la velocidad. En la figura 156, se muestra la disminución de la velocidad en la magnitud ΔVb, originada por la componente Px.

La disminución de la velocidad por la componente Px se considera por la corredera, por lo que es necesario calcularla sólo en aquellos casos, cuando la corredera no funciona.

Como resultado de la acción de la componente Px el buque se moverá por la línea del rumbo verdadero, pero no con la velocidad V_{rpm} (velocidad por el número de revoluciones de las máquinas), sino con la velocidad V_{rpm} - ΔVb.

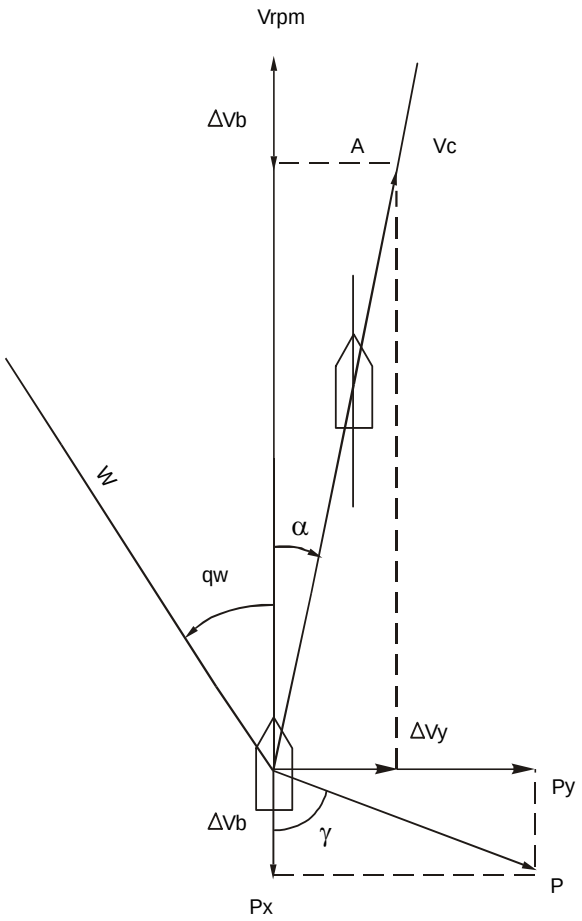


Fig. 156 Acción del viento sobre el buque

La componente Py actúa en dirección perpendicular al plano diámetral y por consiguiente a la línea del rumbo verdadero.

Bajo la acción de esta componente el buque se desviará de la línea del rumbo verdadero con una velocidad ΔVy.

De esta forma el buque participa en dos movimientos:

- El movimiento en la dirección del rumbo verdadero, con una velocidad V_{rpm} - ΔVb.
- El movimiento en la dirección perpendicular al rumbo verdadero del buque, con una velocida ΔVy.

Como resultado de la suma de estos dos movimientos, el buque se trasladará por la línea BA, que se llama **línea del rumbo efectivo por abatimiento**. El ángulo formado entre la parte norte del meridiano verdadero y la línea del rumbo efectivo por abatimiento se llama rumbo efectivo por abatimiento $Re\alpha$ o simplemente rumbo efectivo (Fig.157). La velocidad del movimiento del buque por la línea $Re\alpha$ es igual a Ve. La línea del rumbo verdadero forma con la línea del rumbo efectivo por abatimiento el ángulo a que se llama **ángulo de abatimiento**.

Al ángulo de abatimiento es positivo si el viento sopla a babor, en este caso $Re_{\alpha} > Rv$. Si el viento sopla a estribor al ángulo α es negativo y $Re_{\alpha} < Rv$.

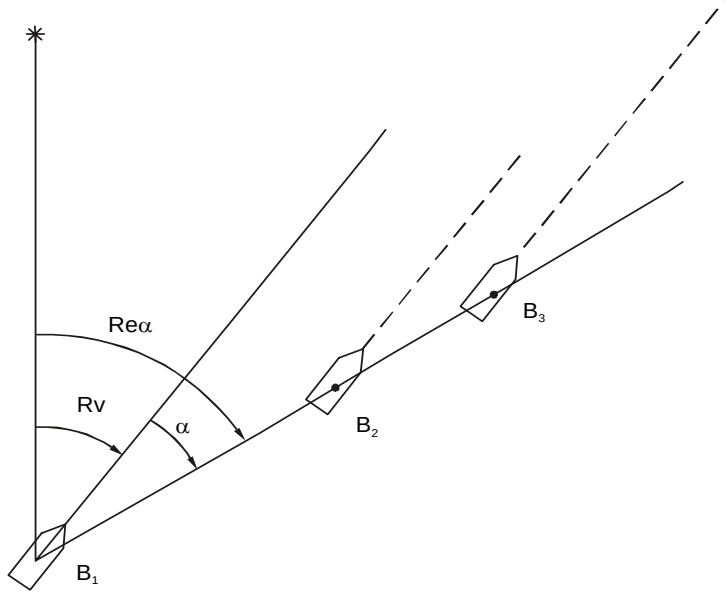


Fig.157 Desplazamiento del buque por la línea del rumbo efectivo

La dependencia existente entre Re_{α}, Rv y α se determina por las expresiones:

$$Re_{\alpha} = Rv + \alpha; \qquad (147)$$
$$Rv = Re_{\alpha} - \alpha;$$
$$\alpha = Re_{\alpha} - Rv.$$

Es necesario señalar que cuando el buque se mueve por la línea del rumbo efectivo su plano diámetral queda paralelo, en todo momento, a la línea del rumbo verdadero. La magnitud del ángulo de abatimiento depende de la velocidad del viento, de marcación relativa , de la velocidad del buque, asi como del calado y del área de la obra muerta del buque.

5.11 Métodos principales para la determinación del ángulo de abatimiento

Para considerar el abatimiento en la estima es necesario conocer la magnitud y signo de su ángulo: El ángulo de abatimiento se determina por diferentes métodos sobre la base de observaciones especiales, en diferentes direcciones y velocidades del buque.

Conjuntamente con la determinación del ángulo de abatimiento se determina la variación de la velocidad del buque, que es necesaria para llevar la estima cuando no funciona la corredera.

a) Determinación del ángulo de abatimiento por observaciones

Este método se utiliza cuando hay objetos costeros visibles y cuando es posible determinar la posición con exactitud.

La determinación de la posición del buque por observaciones a los objetos costeros se denomina **posición observada** . Navegando a determinado rumbo, por observaciones a los objetos costeros se determina la posición en los puntos B_1, B_2 y B_3 (Fig.158).

Uniendo los puntos obtenidos con una línea recta obtenemos la línea del rumbo efectivo y midiendo su dirección con un transportador obtenemos el rumbo efectivo en grados Re_{α}. El ángulo de abatimiento se determina por la fórmula:

$$\alpha = Re_{\alpha} - Rv$$

Para calcular la pérdida efectiva de velocidad ΔV se calcula la velocidad efectiva V.

$$V = \frac{B_1B_3}{T_3 - T_1} \qquad (148)$$

La pérdida de velocidad se calcula por la fórmula:

$$\Delta V = V_{rpm} - V \qquad (149)$$

Como muestra la práctica, la determinación de la posición del buque no es absolutamente exacta, los puntos B_1, B_2 y B_3 no se encuentran en una línea recta. Por eso se traza una línea promedio entre los puntos observados, que corresponderá a la línea del rumbo efectivo.

La desventaja de este método consiste en que el ángulo de abatimiento obtenido se deforma por la influencia de la corriente.

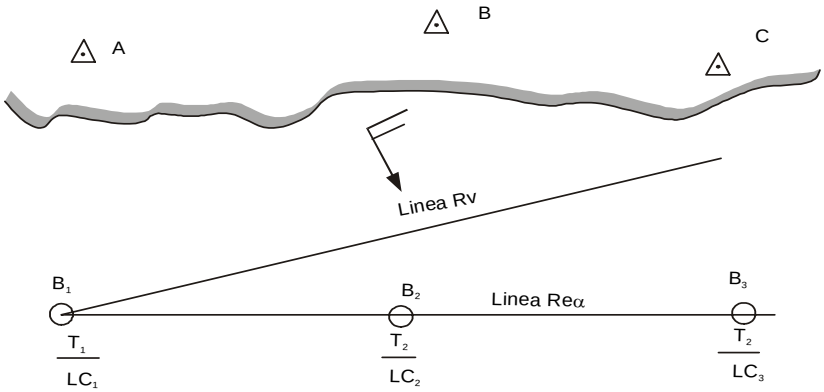


Fig. 158 Determinación del ángulo de abatimiento por observaciones

b) Determinación del ángulo de abatimiento por marcaciones y distancias a un objeto que navega libremente

Cuando se determina el ángulo de abatimiento por este método, en calidad de objeto que navegue libremente, se puede tomar cualquier objeto que tenga poca deriva propia. Generalmente, con este objetivo, se utiliza una boya. La boya está compuesta por una pértiga, con un banderín (1), el estabilizador (2) y el peso (3) (Fig.159).

El peso mantiene la boya en la posición vertical y una pequeña parte de la pértiga con el banderín fuera del agua.

El estabilizador sirve para disminuir la deriva propia de la boya, originada por la acción del viento. Para determinar el ángulo de abatimiento el buque pasa cerca de la boya con un rumbo verdadero dado.

Posteriormente en determinado intervalo de tiempo se toman marcaciones y distancias a la boya.

La construcción gráfica se realiza en una hoja de papel limpio a determinada escala o en un lugar libre de la carta, con la escala dela misma.

Desde un punto arbitrario, considerados como la posición de la boya se trazan las líneas de las MvI y sobre ellas las distancias medidas (Fig. 160).

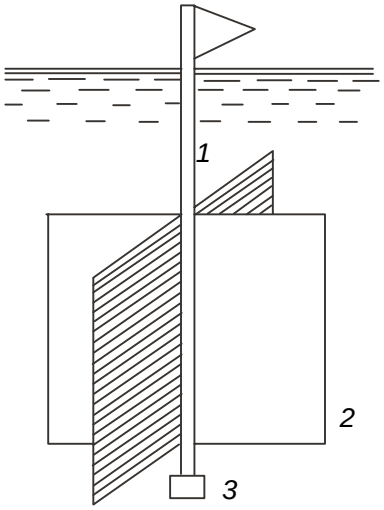


Fig. 159 Boya para la determinación del ángulo de abatimiento

La construcción gráfica se realiza en una hoja de papel limpio a determinada escala o en un lugar libre de la carta, con la escala de ella.

Desde un punto arbitrario, considerados como la posición de la boya se trazan las líneas de las MvI y sobre ellas las distancias medidas (Fig. 160).

Los puntos obtenidos B_1, B_2, B_3 y B_4 serán las posiciones del buque con relación a la boya. Uniendo estos puntos con una línea recta obtenemos la línea del rumbo efectivo y midiendo su dirección con relación a las mediciones obtenemos el valor en grados Re_α. El ángulo de abatimiento se calcula por la fórmula:

$$\alpha = Re_\alpha - Rv$$

Este valor obtenido está libre de la influencia de la corriente, puesto que éste actúa de igual forma sobre el buque y sobre la boya.

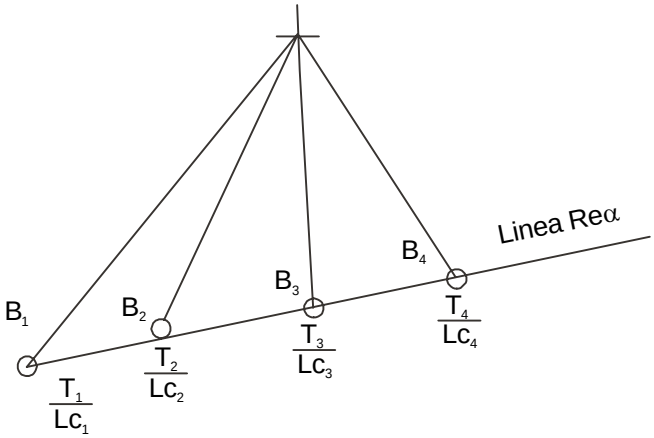


Fig. 160 Determinación de la línea del rumbo efectivo por marcaciones y distancias

Este es uno de los métodos más exactos para la determinación del ángulo de abatimiento.

La velocidad por la línea del rumbo efectivo se determina por la fórmula:

$$V = \frac{B_1 B_4}{T_4 - T_1},$$

entonces la pérdida de velocidad se determina por la expresión:

$$\Delta V = Vrpm - V$$

c) Determinación del ángulo de abatimiento por tres marcaciones a un punto notable

El objeto en este método puede ser un punto notable o un objeto que navegue libremente.

Si el objeto es costero el valor del ángulo de abatimiento estará deformado por la influencia de la corriente y, si el objeto utilizado navega libremente, entonces el valor obtenido del ángulo de abatimiento estará libre de la influencia de la corriente.

Para determinar el ángulo de abatimiento por este método, el buque debe pasar por la zona de visibilidad del objeto a determinado rumbo Rv. En iguales intervalos de tiempo se toman tres marcaciones al objeto. Después de calcular las marcaciones verdaderas Mv_1 éstas se plotean a partir del objeto seleccionado (Fig. 161).

En la dirección de la línea del rumbo verdadero, se traza una línea que corte las tres marcaciones. Ya que las marcaciones fueron tomadas con iguales intervalos de tiempo, el buque debió recorrer espacio iguales entre ellas. Significa que es necesario determinar tal dirección de movimiento del buque, para lo cual los segmentos de la línea de la trayectoria sean iguales. Para ello desde el punto B y por la línea que corta las tres marcaciones se trazan los segmentos BC = BA.

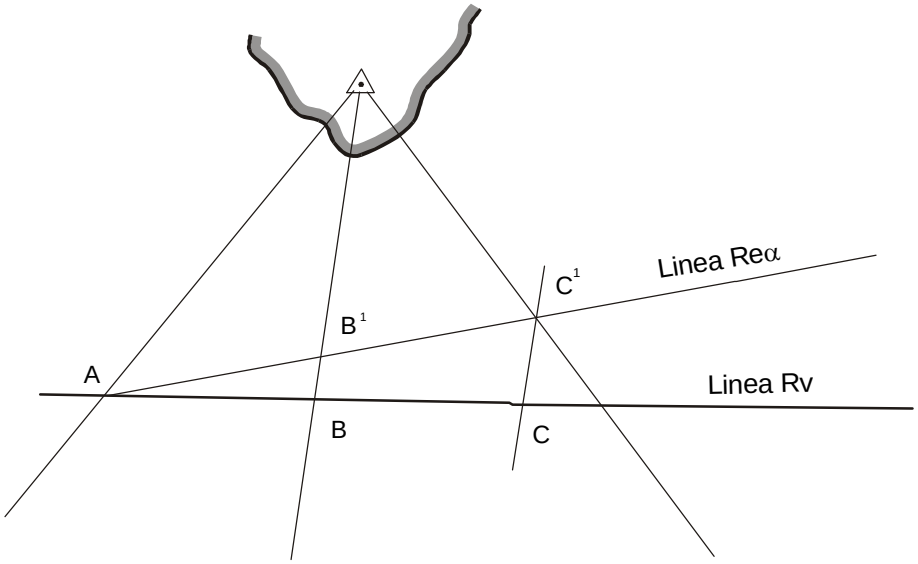


Fig. 161. Determianción del ángulo de abatimiento por tres marcaciones

A través del punto C obtenido se traza una línea paralela a la segunda marcación hasta su intersección con la tercera marcación en el punto C'.

Uniendo el punto A con el punto C' obtenemos una línea paralela a la línea de la trayectoria del buque. Realmente, en tal dirección de movimiento del buque obtenemos: AB' = B' C', es decir que en iguales intervalos de tiempo el buque recorre espacios iguales.

Midiendo esta dirección con ayuda del transportador obtenemos el rumbo efectivo por abatimiento.

El ángulo de abatimiento se calcula por la fórmula:

$$\alpha = Re_{\alpha} - Rv$$

Cuando se determina el ángulo de abatimiento por este método se pueden medir las marcaciones no en iguales intervalos de tiempo.

En este caso los segmentos AB y BC deben ser proporcionales al tiempo de navegación entre los momentos con que se tomaron las marcaciones:

$$BC = AB\frac{T_3 - T_2}{T_2 - T_1},$$

donde:

T_1, T_2 y T_3 _ momentos de medición de las marcaciones.

5.12 Cálculo preliminar del ángulo de abatimiento

Existen distintas fórmulas para el cálculo del ángulo de abatimiento.

De ellas la más simple y fundamentada teóricamente es la fórmula de N.N. Matusevich:

$$\alpha^{\circ} = K^{\circ}\left(\frac{W}{V}\right)^2 \operatorname{sen} q_w, \qquad (150)$$

donde:

a - ángulo de abatimiento en grados.

W - velocidad del viento en m/s.

V - velocidad del buque en m/s.

q_w - marcación relativa del viento aparente.

K - coeficiente de abatimiento en grados.

Cuando se conoce el valor del coeficiente de abatimiento (K), el ángulo de abatimiento (α) puede ser calculado para cualquier valor de W, V y q_w.

El valor de V_w, V y q_w en el buque se determina con facilidad.

El coeficiente de abatimiento K puede ser calculado teóricamente basándose en el estudio de las características aerodinámicas e hidrodinámicas del buque. Este cálculo se realiza en las pruebas de los modelos durante el proceso de creación del tipo de buque, que luego aparece en el formulario táctico de éste.

Si el coeficiente de abatimiento es desconocido para el buque dado, éste se puede determinar por observaciones de los ángulos de abatimiento determinados en diferentes condiciones de navegación.

En la expresión (150) el ángulo de abatimiento se determina por uno de los métodos conocidos; el valor $\left(\frac{W}{V}\right)^2 \text{sen}q_w$ se calcula por las mediciones de W, V y q_w en el buque. Queda por conocer sólo la magnitud K.

Simbolizando la expresión $\left(\frac{W}{V}\right)^2 \text{sen}q_w = a$,

obtenemos: $\alpha° = K°a$ (151)

Para aumentar la exactitud en la determinación de la posición y eliminación de los errores en la observación del coeficiente de abatimiento se determina por observaciones reiteradas.

La elaboración de las observaciones se realiza por el método de los mínimos cuadrados , cuya esencia se encierra en lo siguiente:

- Realizando varias mediciones del ángulo $\alpha°$ y calculando la magnitud de a por los valores W, V y q_w, obtenemos las ecuaciones:

$$\alpha_1^0 = K^0 a_1;$$
$$\alpha_2^0 = K^0 a_2;$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$\alpha_n^0 = K^0 a$$

Ya que las observaciones fueron realizadas en diferentes condiciones de navegación, los ángulos $\alpha°_1, \alpha°_2$ .... $\alpha°_n$ tendrán diferentes valores al igual que a_1, a_2 .....a_n.

El coeficiente K° es una magnitud constante para cada buque.

- Multiplicando cada ecuación por el valor a_i y sumando las ecuaciones obtenidas, tendremos:

$$a_1\alpha_1^0 + a_2\alpha_2^0 + \ldots + a_n\alpha_n^0 = K^0 a_1^2 + K^0 a_2^2 + \ldots + K^0 a_n^2.$$

De la igualdad obtenida determinamos el coeficiente de abatimiento:

$$K^0 = \frac{a_1\alpha_1^0 + a_2\alpha_2^0 + \ldots + a_n\alpha_n^0}{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \ldots + \alpha_n^2} \qquad (152)$$

Para obtener resultados seguros es necesario realizar 40 - 50 determinaciones del ángulo de abatimiento por observaciones exactas en distintas condiciones de navegación.

El coeficiente de abatimiento permite, en lo adelante, calcular el ángulo de abatimiento en diferentes condiciones de navegación.

5.13 Tablas y gráficos de los ángulos de abatimiento y las variaciones de la velocidad del buque

El cálculo del ángulo de abatimiento por la fórmula de Matusevich (150) en la navegación, exige mucho tiempo.

Para simplificar el trabajo en la navegación, los ángulos de deriva se calculan con antelación para diferentes valores de W, V y q_w.

Los resultados de los cálculos se plasman en una tabla, de la cual se elige el valor del ángulo α para su consideración en la estima. En la tabla se incluyen datos sobre la variación de la velocidad, determinados experimentalmente, comparando la velocidad por la corredera y la velocidad por las revoluciones de las máquinas en diferentes condiciones de navegación.

De esta forma la tabla contiene información sobre los ángulos de abatimiento y la variación de la velocidad a causa de la influencia del viento. Esta tabla se llama tabla de abatimiento y variación de la velocidad.

Las tablas de abatimiento y variación de la velocidad pueden tener diferentes formas, pero su esencia es una: de acuerdo a los valores W, V y q_w determinar el valor del ángulo de abatimiento y la variación de la velocidad.

Las tablas 5.3 y 5.4 son las más cómodas en su utilización.

Tablas de abatimiento y variación de la velocidad

Tabla 5.3

	Viento aparente .... m /s (fuerza...)												
q_w Vrpm	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
nudos													
10	$\frac{\alpha°}{\Delta V}$	$\frac{\alpha°}{\Delta V}$	$\frac{\alpha°}{\Delta V}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-												
14	-												
16	-												
18	-												
20	-												
22	-												

En la tabla 5.3 q_w es la marcación relativa del viento aparente; Vrpm velocidad del buque de acuerdo al número de revoluciones de las máquinas.

Esta tabla es muy cómoda para su utilización, puesto que no exige ningún cálculo preliminar y prácticamente no es necesario realizar interpolaciones. El valor del ángulo de abatimiento y la variación de la velocidad se toma por el valor más cercano.

En la tabla, en el numerador se expresa el valor del ángulo de abatimiento sin considerar el signo. El signo se determina de acuerdo a la banda de q_w.

Cuando q_w es a babor α tiene signo más (+), cuando es a estribor α tiene signo menos (-).

En el denominador indica el valor de la variación de la velocidad con su signo: La desventaja de esta tabla incide, en que nos da el valor del ángulo de abatimiento y la variación de la velocidad para un sólo valor de la velocidad del viento aparente. Para poder abarcar todo el diapasón de velocidades posibles es necesario poseer varias tablas. Es suficiente tener las tablas para las velocidades 5, 10, 15, 20 y 25 m/s.

Tabla de abatimiento

Tabla 5.4

q_W \ m	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0 –180°	$\alpha°$	$\alpha°$	$\alpha°$	$\alpha°$	$\alpha°$	$\alpha°$	$\alpha°$	$\alpha°$	$\alpha°$
10°-170°	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20°-160°	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30°-150°	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40°-140°	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50°-130°	-	-	-	-	-	-	-	-	-
.....		-	-	-	-	-	-	-	-
....-90°	-	-	-	-	-	-	-	-	-

En la tabla 5.4 $m = \frac{W}{V}$

W - velocidad del viento aparente (m/s).

V - velocidad del buque (m/s).

q_W - marcación relativa del viento aparente.

Tal tabla incluye todos los valores posibles de la velocidad del buque y el viento aparente.

Además de las tablas se utilizan gráficos para la determinación del ángulo de abatimiento. Estos tiene la ventaja que en su utilización no es necesario hacer interpolación.

Existen diferentes formas de gráficos del ángulo de abatimiento. La forma más simple se muestra en la figura 162.

En este gráfico se puede elegir el ángulo de abatimiento para determinar velocidad del viento aparente W.....m/s, de acuerdo a la marcación relativa del viento aparente q_w y la velocidad del buque V.

Cuando varía la velocidad del viento aparente es necesario utilizar otro gráfico similar, construido para esta velocidad, por consiguiente en el buque deben existir gráficos del ángulo de abatimiento para diferentes velocidades del viento aparente.

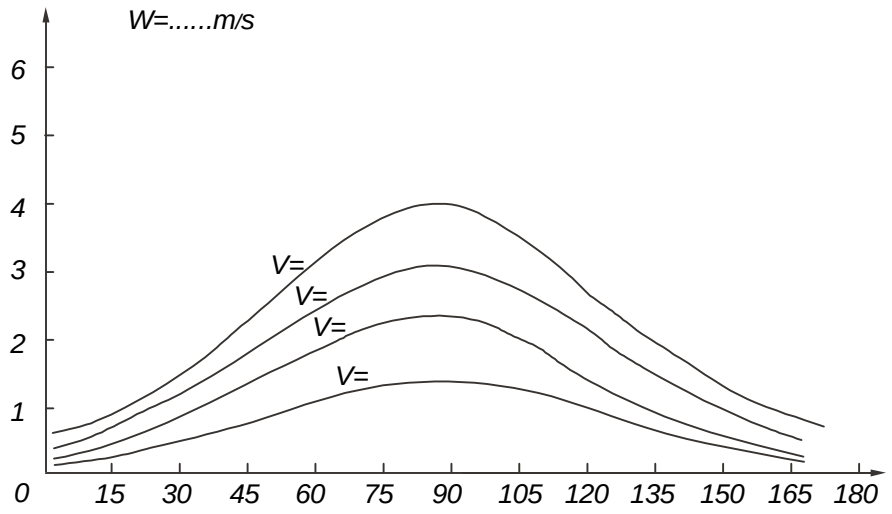


Fig. 162 Gráfico del abatimiento

5.14 Cálculo del abatimiento en la estima gráfica

En la estima gráfica considerando el abatimiento, se trazan dos líneas en la carta: la línea del rumbo verdadero y la línea del rumbo efectivo del buque , **Todas las distancias calculadas por la corredera se plotean en la línea del rumbo efectivo, ya que la corredera considera el abatimiento.**

Si la navegación se realiza sin corredera (por no tenerla a bordo) entonces para el cálculo del espacio recorrido por el tiempo y velocidad de navegación se toma la velocidad del buque V, sobre el rumbo efectivo:

$$V = V_{rpm} - \Delta V;$$

donde:

V - Velocidad del buque por la línea del rumbo efectivo.

V_{rpm} - Velocidad por el número de revoluciones de las máquinas

ΔV - Variación de la velocidad por la influencia del viento; se seleccionan en la tabla de abatimiento y variación de la velocidad.

Generalmente tiene signo menos (-).

La distancia calculada por la velocidad y tiempo de navegación se plotea de igual forma sobre la línea del rumbo efectivo del buque.

Sobre la línea del rumbo efectivo se señalan las posiciones del buque que interesan al navegante. Cerca de cada posición en la línea del rumbo efectivo se anota la hora y lectura de la corredera. A lo largo de la llínea del rumbo efectivo se escribe el valor del rumbo aguja, la corrección del compás y el ángulo de abatimiento por α ejemplo (Fig.163).

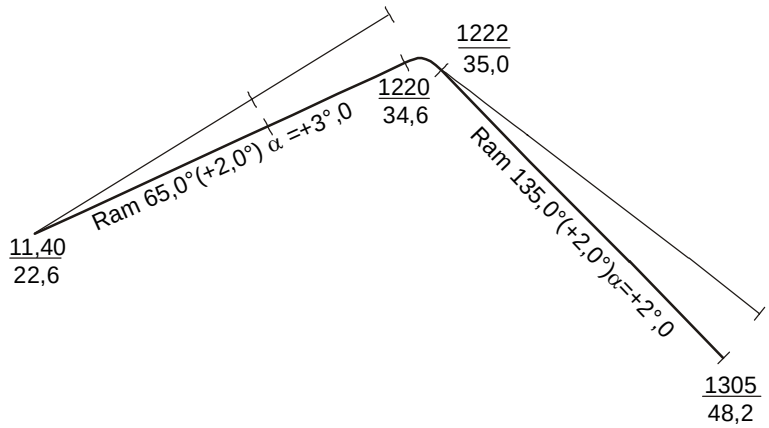


Fig. 163 Esquema del trazado considerando el abatimiento

$$Rag = 65{,}0° \ (+\ 20°)\ \alpha = +2{,}0°$$

Cuando se lleva la estima gráfica considerando el abatimiento se resuelven dos tareas fundamentales:

Tarea 1. Conociendo el rumbo verdadero, la velocidad del buque y la dirección y velocidad del viento aparente, se determina el rumbo efectivo.

Solución:

De acuerdo al rumbo verdadero Rv y la dirección del viento aparente W se calcula la marcación relativa del viento aparente:

$$q_W = W - Rv$$

De acuerdo a la marcación relativa del viento aparente q_w, su velocidad V y la velocidad del buque V_{rpm}, se toma en la tabla de abatimiento el ángulo (α) y se determina su signo.

Por los valores del Rv y α se calcula el rumbo efectivo del buque:

$$Re_\alpha = Rv - \alpha$$

Tarea 2. De acuerdo al Re_α , la velocidad del buque, la dirección y velocidad del viento aparente se determina el rumbo verdadero del buque.

La solución de esta tarea es similar a la solución de la tarea 1. Su diferencia consiste en que en el cálculo de la marcación relativa del viento aparente en lugar del rumbo verdadero se utiliza el rumbo efectivo.

Por eso $q_w = W - Re_\alpha$

El cálculo del rumbo verdadero se realiza por las fórmula:

$$Rv = Re_\alpha - \alpha$$

Además de las dos principales tareas observadas, en la estima gráfica considerando el abatimiento se resuelven otras tareas:

- Determinación del momento del **través.**

- Determinación del momento, cuando el objeto cae en determinada marcación relativa.

- Determinación del momento, cuando el objeto estará a determinada distancia.

Tarea 3. Determinación del momento del **través**.

Se conoce por través ⊥ aquella posición del objeto, cuando se encuentra en Mr = 90°. Para la solución de esta tarea es necesario recordar,que al buque a desplazarse por la línea del rumbo efectivo mantiene su plano diametral paralelo a la línea del rumbo verdadero.

Para determinar la posición del buque en el momento del través se calcula la marcación verdadera inversa MI_v a este objeto correspondiente a este momento.

$$MvI = Rv + 90° \qquad (+\ 90° \text{ si el objeto está a estribor y } -\ 90° \text{ si está a babor}).$$

La MvI calculada se traza desde el ojeto hasta su intersección con la línea del rumbo efectivo (Fig. 164).

El punto B obtenido será la posición del buque en el momento del través al objeto P. Para llegar a este punto el buque debe recorrer la distancia S_c, que se toma de la carta.

El tiempo de navegación se determina por la fórmula:

$$t = \frac{Sc}{Vc} \quad \text{ó} \quad t_{min} = \frac{Sc60}{Vc},$$

donde Sc se mide en millas y Vc en nudos.

El momento de llegada del buque al Través se determina por la expresión:

$$T_2 = T_1 + t$$

Para determinar la lectura de la corredera Lc_2 en el momento del **través** se calcula la diferencia de lecturas de la corredera ΔLc:

$$\Delta Lc = \frac{Sc}{Kc},$$

entonces $Lc_2 = Lc_1 + \Delta Lc$

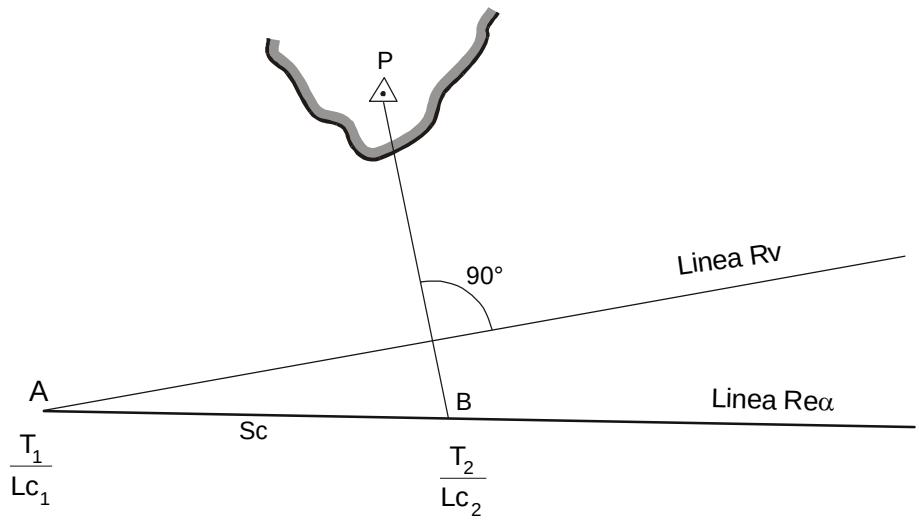


Fig. 164 Cálculo del momento del través

Para registrar el momento cuando el buque se encuentra en el punto dado, se calcula la marcación aguja en el través:

$M_{a\perp} = R_a \pm 90°$ + 90° si el objeto está a estribor y
– 90° si el objeto está a babor.

Cuando se utiliza el compás magnético se calcula la marcación aguja inversa del **través**:

$M_{al\perp} = R_a \mp 90°$ – 90° si el objeto está a estribor y
+ 90° si está a babor).

Para determinar la posición del buque en el momento cuando la marcación relativa al objeto alcanza determinado valor, se obra de la siguiente forma.

Se calcula la marcación verdadera inversa al objeto, correspondiente al valor dado de la marcación relativa:

$$M_{vl} = R_v \pm Mr_{Br}^{Er} \pm 180°,$$

y se plotea desde el objeto hasta su intersección en el punto B con la línea del rumbo efectivo (Fig. 165).

El punto B corresponde a la posición del buque, cuando el objeto P se encuentra en la marcación relativa dada.

El cálculo del momento T_2 o la lectura de la corredera Lc_2 se realiza de la misma forma que en la tarea anterior:

$$t_{min} = \frac{Sc\,60}{Vc}; \qquad T_2 = T_1 + t;$$

$$\Delta Lc = \frac{Sc}{Kc}; \qquad Lc_2 = Lc_1 + \Delta Lc.$$

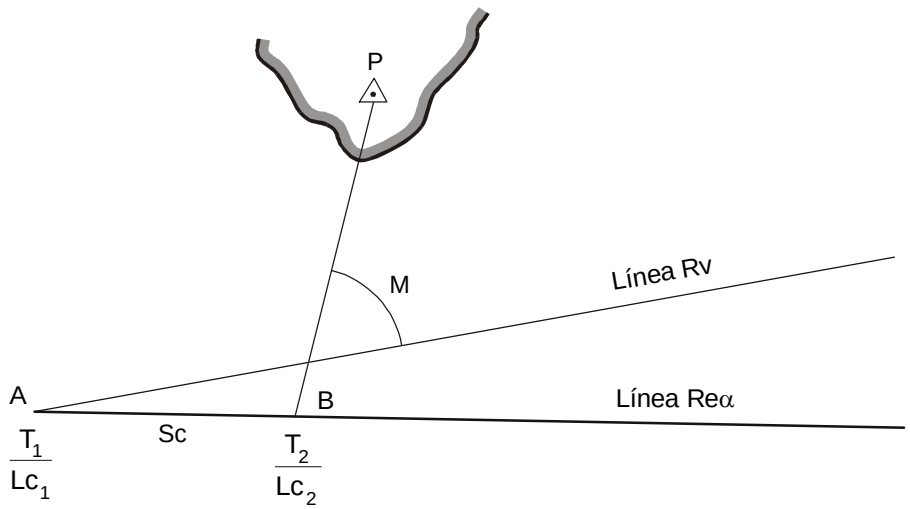


Fig.165 Cálculo del momento de llegada del buque a determinada marcación relativa

En la práctica esta misma tarea se formula de otra forma: determinación del momento cuando el buque llega a una marcación relativa dada del objeto. En este caso, para la determinación de la posición del buque en la línea del rumbo efectivo, desde el objeto se traza una línea en la dirección.

$$M_{vl} = M_v \pm 180°$$

Las demás la tarea se resuelve de la misma forma.

Tarea 4. Determinación del momento cuando el objeto se encuentra a determinada distancia del buque.

Para la solución de esta tarea, desde el objeto y con un radio igual a la distancia dada, se traza un arco de circunferencia que corta en el punto B a la línea del rumbo efectivo.

El punto B obtenido será la posición del buque cuando la distancia hasta el objeto es igual a la distancia dada (Fig.166).

Se calcula el tiempo T_2 y la lectura de la corredera Lc_2:

$$t_{min} = \frac{Sc60}{Vc}; \qquad T_2 = T_1 + t;$$

$$\Delta Lc = \frac{Sc}{Kc}; \qquad Lc_2 = Lc_1 + \Delta Lc.$$

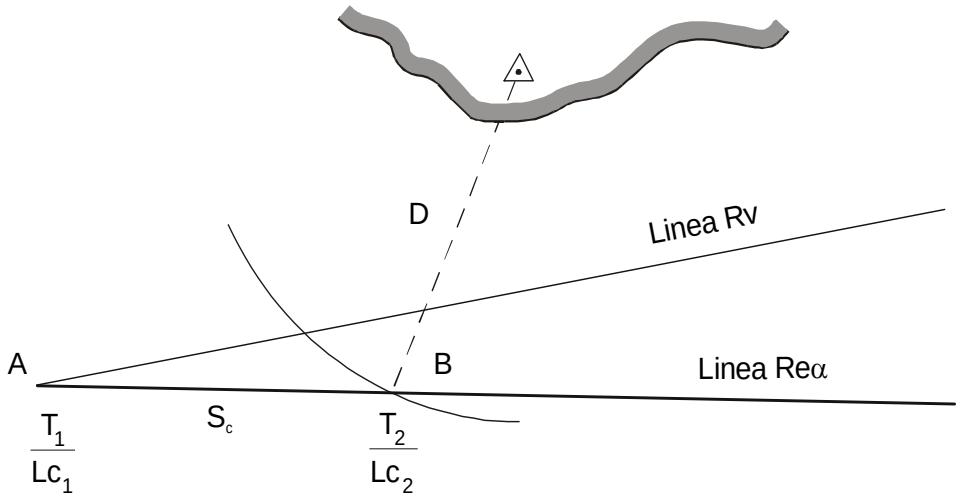


Fig. 166 Cálculo del momento de llegada del buque a la distancia

Debido a que las correderas modernas calculan la velocidad del buque, que coincide con la dirección de su plano diametral, y el buque realmente se mueve por la línea del rumbo efectivo debido al abatimiento, el espacio recorrido verdadero se diferencia de aquél, que se calcula por las indicaciones de la corredera y puede ser determinado por la fórmula .

$$S = S_c \sec \alpha$$

El espacio recorrido por la línea del rumbo efectivo, puede ser determinado tanto por cálculo analítico como gráficamente en la carta.

El cálculo analítico del espacio verdadero recorrido S se efectua por la fórmula.

Para su simplificación desarrollemos en serie sec α y limitando la serie a los dos primeros términos obtenemos que:

$$S = Sc\left(1 + \frac{\alpha^2}{2}\right)$$

pero como $$S = \Delta Lc\left(1 + \frac{\Delta c}{100}\right)$$

entonces $$S = \Delta Lc\left(1 + \frac{\alpha^2}{2}\right)\left(1 + \frac{\Delta c}{100}\right)$$

Expresando el ángulo de abatimiento en grados, tendremos:

$$Lc\left[1 + \frac{\Delta c}{100} + \frac{\alpha^2}{2(57{,}3)^2} + \frac{\Delta c \alpha^2}{200(57{,}3)^2}\right]$$

Despreciando el último término de la fórmula por su pequeñez obtenemos:

$$S = \Delta Lc\left(1 + \frac{\Delta c}{100} + 0{,}00015\alpha^2\right)$$

ó

$$S = \Delta Lc\left(1 + \frac{\Delta c + 0{,}015\alpha^2}{100}\right)$$

Simbolizamos la suma $\Delta c + 0{,}015\ \alpha^2$ por ΔL_α finalmente se tiene que:

$$S = \Delta Lc\left(1 + \frac{\Delta c_\alpha}{100}\right)$$

Por esta fórmula se calcula el espacio verdadero recorrido por el buque considerando el abatimiento .

Entonces, para $\alpha = 4°$

$$\Delta c_\alpha = \Delta c\ \% + 0{,}015 \times 16 = \Delta c\% + 0{,}2\%$$

De esta forma, para un ángulo de abatimientode hasta 4° el aumento de la corrección de la corredera (en 0,2 %) debido al ángulo de abatimiento es numéricamente menor que los errores casuales en la determinación de esta corrección en la base medida. Por eso sin detrimento para la exactitud de la estima este se puede despreciar y por la línea del rumbo efectivo se trazar la distancia igual a Sc.

El método de construcción gráfica consiste en que en la carta se traza la línea del rumbo verdadero del buque y el rumbo efectivo (Fig,167) y por la línea del R_v se plotea el espacio calculado por las indicaciones de la corredera Sc (o por la velocidad del buque). Desde el punto obtenido B se traza una perpendicualr a la línea del rumbo verdadero hasta su intersección con la línea Re_α. El punto B' en esta última será la posición de estima del buque (para α>4°).

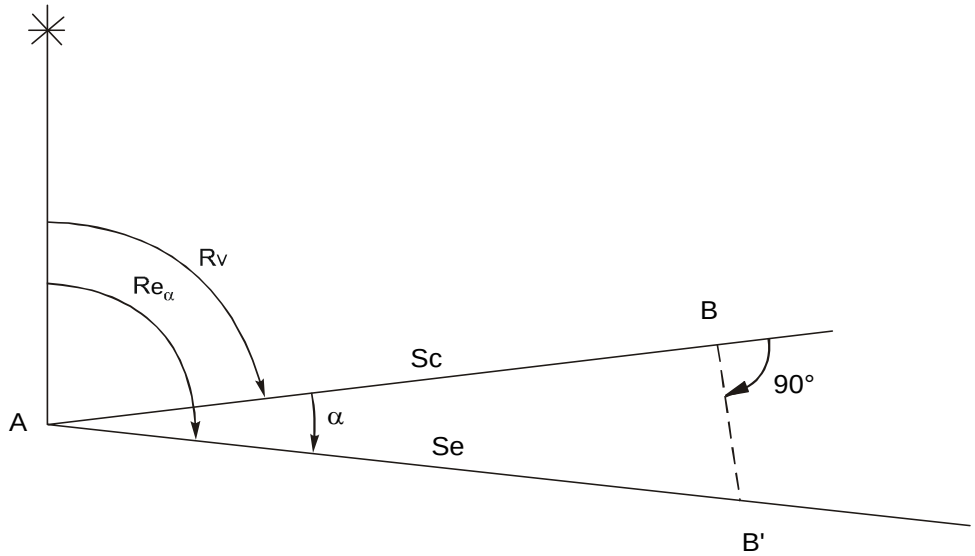


Fig.167 Determinación del espacio recorrido para a >4°

5.15 Estima del buque considerando la corriente

Las masas de agua de los mares y océanos se encuentran en constante movimiento, trasladándose de una a otra región.

La traslación horizontal de las masas de agua en el mar o en el océano se llama **corriente**. Las corrientes se caracterizan por su dirección y velocidad. La dirección de la corriente se mide en grados. Esta se determina por aquel punto del horizonte, hacia donde se dirige.

Se llama **velocidad de la corriente** a la distancia en que se traslada la masa de agua en la unidad de tiempo. La velocidad de la corriente se mide en nudos.

Las corrientes surgen bajo la influencia de diferentes causas que determinan sus características.

Al navegante generalmente sólo le interesan la dirección y velocidad de la corriente. Para poder difereciar las corrientes de acuerdo a su dirección y velocidad, en navegación existe una clasificación. De acuerdo a ellas todas las corrientes se dividen en grupos:

- Corrientes invariables.
- Corrientes periódicas.
- Corrientes temporales.

Las corrientes invariables son aquellas, cuya dirección y velocidad en todo momento son constantes.

Estas son originadas por causas que actúan durante largo tiempo como son los vientos constantes: los alisios, que originan el surgimiento de las corrientes ecuatoriales.

Las corrientes periódicas varían constantemente su dirección y velocidad, repitiendo periódicamente sus valores anteriores. Estas son originadas por fuerzas periódicas.

Un ejemplo de tales fuerzas, son la de atracción del Sol y la Luna. Las corrientes periódicas originadas por tales fuerzas se llaman corrientes de flujo y reflujo.

Las corrientes temporales son aquellas que actúan por cortos intervalos de tiempo, como por ejemplo las corrientes originadas por vientos que soplan en cortos intervalos de tiempo (3 - 5 días). Ellas se originan por la acción de causas temporales.

5.16 Influencia de la corriente sobre el buque en movimiento.

El buque se mueve con relación al agua con ayuda de las máquinas. La dirección de movimiento del buque con relación al agua se determina por el rumbo verdadero y su velocidad corresponde al número de revoluciones de las máquinas.

Esta misma velocidad indica la corredera. Por eso el espacio recorrido será indicado por la corredera con relación al agua.

Las corrientes transportan las masas de agua. Junto con ellas se traslada el buque con la velocidad y dirección de las corrientes.

De esta forma, cuando se navega en regiones donde actúan corrientes, el buque participa en dos movimientos:

- En el movimiento originado por por las máquinas con relación al agua, en la dirección del R_v y con la velocidad V_c ó V_{rpm}.

- En el movimiento originado por la corriente, con su dirección y velocidad.

Para obtener el movimiento resultante del buque, es necesario realizar la suma de dos vectores:
- El vector de movimiento del buque con relación al agua, cuya dirección coíncide con el rumbo verdadero del buque, y cuya magnitud es igual a la velocidad con relación al agua V_c ó V_{rpm}.

- El vector de movimiento del buque conjuntamente con el agua, cuya dirección es la dirección de la corriente y su magnitud igual a la velocidad de la corriente.

Para sumar estos vectores en la carta se plotea la línea del Rv y en ella se traza el espacio recorrido en determinado intervalo de tiempo:

$$S_c = V_c t \qquad ó \qquad S_{rpm} = V_{rpm} \times t$$

Del extremo de este vector se plotea la línea en la dirección de la corriente y en ella se traza la deriva del buque en el mismo intervalo de tiempo:

$$S_\beta = V_\beta t$$

Uniendo el punto A con el B obtenemos el vector del movimiento resultante del buque S (Fig. 168).

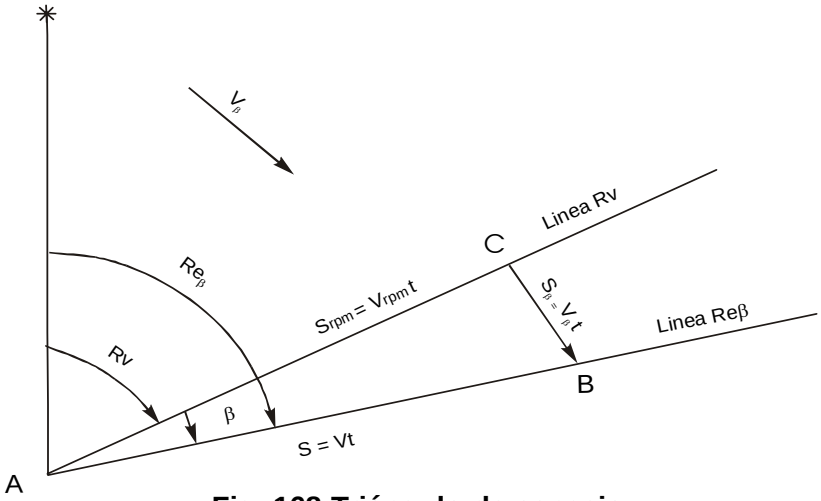


Fig. 168 Triángulo de espacio

La dirección del vector resultante es la dirección del movimiento real del buque con relación al fondo.

La línea de movimiento real del buque cuando se navega considerando la corriente se llama **rumbo efectivo por deriva**.

El ángulo formado entre la mitad norte del meridiano verdadero y la línea del rumbo efectivo se llama rumbo efectivo por deriva de la corriente Re_β.

La magnitud del vector resultante será el espacio recorrido por el buque en la línea del rumbo efectivo durante este intervalo de tiempo t:

$$S = V \times t \qquad (153)$$

El triángulo ABC se llama triángulo de corriente. Generalmente sobre la dirección del rumbo verdadero y la dirección de la corriente se trazan distancias en ñla unidad de tiempo, es decir las velocidades V_c (V_{rpm}) y V_e. En este caso se obtiene un triángulo de velocidades, V_e es la velocidad de movimiento del buque por la línea del rumbo efectivo:

$$V_e = V_c + V \qquad (154)$$

El ángulo entre la línea del rumbo verdadero y la línea del rumbo efectivo se halla el ángulo de deriva β:

$$\beta = Re_{\beta} - Rv \qquad (155)$$

El ángulo de deriva β puede ser positivo y negativo:

- β tiene signo más (+) cuando la corriente está dirigida hacia babor.
- β tiene signo menos (-) cuando la corriente está dirigida hacia estribor.

Es necesario recordar que cuando el buque se desplaza por la línea del rumbo efectivo su plano diametral queda en todo momento paralelo a la línea del rumbo verdadero.

5.17 Consideración de una corriente constante en la estima gráfica.

Las corrientes constantes por mucho tiempo conservan sus direcciones y sus velocidades, es decir V_{β} = const. En la estima gráfica, cuando se considera la corriente constante se resuelven dos tareas fundamentales.

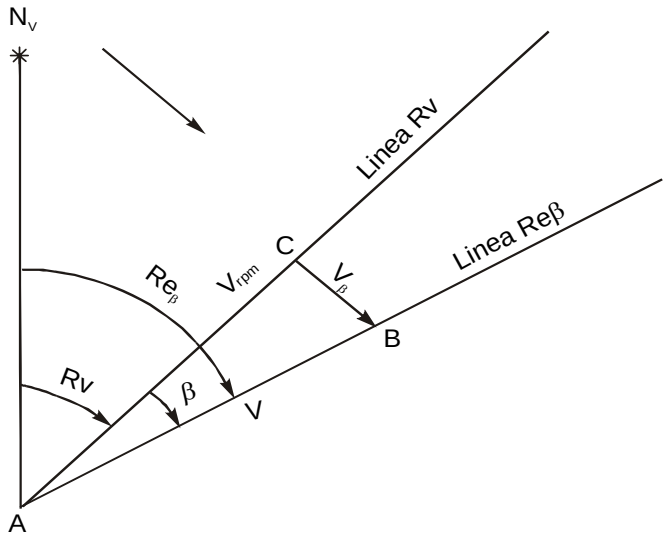


Fig.169 Triángulo de velocidad

Tarea 1: Conociendo el rumbo verdadero, la velocidad del buque y los elementos de la corriente, determinar el rumbo efectivo y la velocidad efectiva (Tarea directa).

La tarea se resuelve de la siguiente forma:

Desde el punto A, en el cual se comienza a considerar la corriente, se traza la línea del rumbo verdadero R_v y en ella el vector de velocidad V_c ó V_{rpm}.

Desde el extremo del vector de velocidad del buque (punto a) se traza una línea en la dirección de la corriente y en ella el vector de la velocidad de la corriente V_{β} (Fig. 169).

Uniendo el punto A con el extremo del vector V_{β} (punto B), obtenemos la línea del rumbo efectivo y midiendo la dirección de ésta obtenemos el valor del rumbo efectivo Re_{β}.

El segmento AB es el vector de la velocidad por el rumbo efectivo V_e. El ángulo entre la línea del rumbo efectivo y la línea del rumbo verdadero será el ángulo de deriva (β). De esta forma se resuelve el triángulo de velocidad, del cual se deduce que:

$\overline{V}e = \overline{V}c + \overline{V}\beta; \quad Rv = Re_\beta - \beta.$

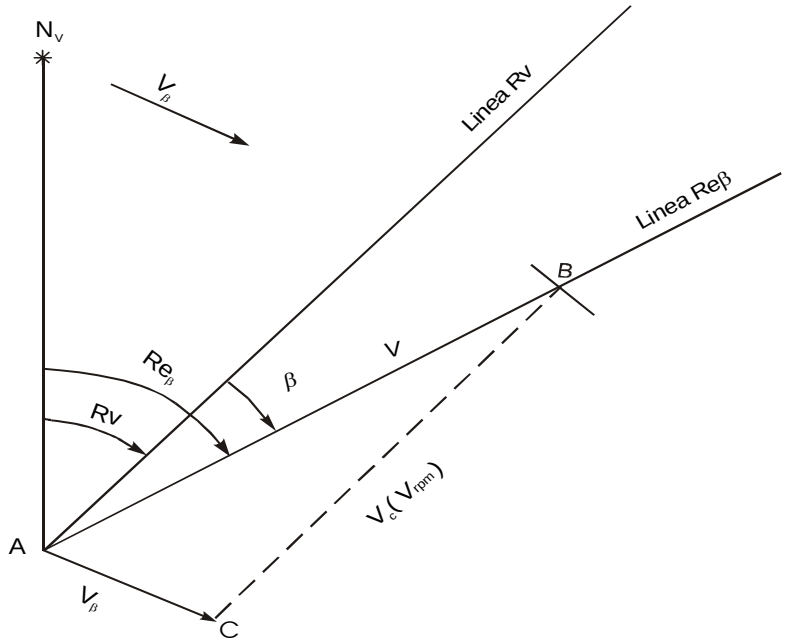


Fig. 170 Cálculo de la línea del rumbo verdadero

Tarea 2: Conociendo el rumbo efectivo Re_β la velocidad del buque y los elementos de la corriente, determinar el rumbo verdadero y la velocidad efectiva V_e (Tarea inversa).

La tarea se resuelve de la siguiente forma: Desde el punto A, se traza la línea del rumbo efectivo y se plotea el vector de la velocidad de la corriente V_β (Fig. 170).

Desde el extremo de este vector (punto C) con ayuda de un compás se toma un segmento igual a la velocidad del buque (Vc ó Vrpm), obtenemos el punto B.

Uniendo el punto B con el punto C obtenemos la línea del rumbo verdadero con ayuda de la paralela, esta línea se traslada al punto A.

Midiendo la dirección de la línea del rumbo verdadero, con la relación al meridiano verdadero, obtenemos el rumbo verdadero del buque Rv.
Con tal construcción se resuelve el triángulo de velocidad en el cual se deduce que:

$$\overline{V}e = \overline{V}c + \overline{V}\beta; \quad Rv = Re_\beta - \beta.$$

Cuando se lleva la estima considerando la corriente en la carta se plotean dos líneas: la línea del rumbo verdadero y la línea del rumbo efectivo (trayectoria del buque). La corredera no considera la corriente, por eso el espacio recorrido por el buque se plotea en la línea del rumbo verdadero. La distancia obtenida en la línea del rumbo verdadero se traslada a la línea del rumbo efectivo paralelamente a la dirección de la corriente. (Fig. 171)

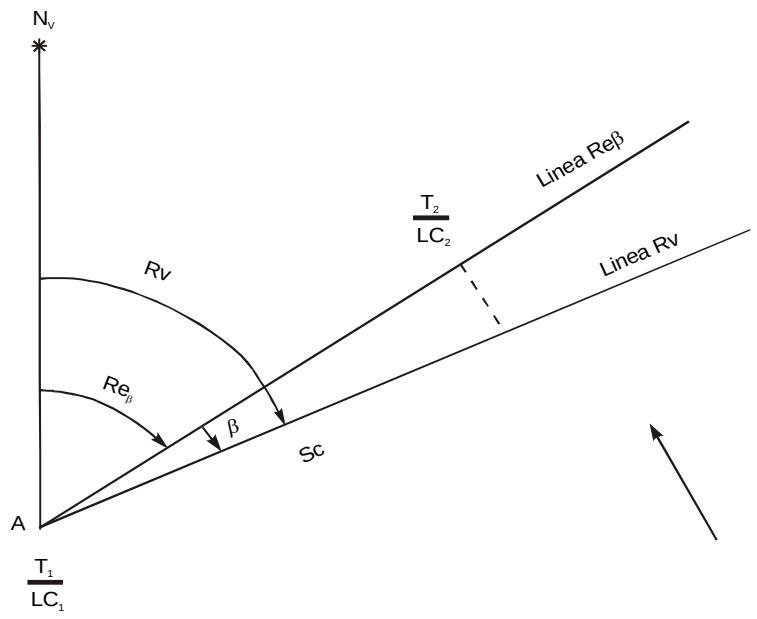


Fig. 171 Cálculo de la línea del rumbo efectivo Re_β

La posición sobre la línea del rumbo efectivo se rotula con la hora y la lectura de la corredera. Sobre la línea del rumbo efectivo se rotula el rumbo aguja del buque (Rag ó Ram), la corrección del compás (₮) ó (Δg) y el ángulo de deriva (β).

5.18 Solución de tareas típicas en la estima gráfica considerando la corriente.

Cuando se lleva la estima gráfica considerando la corriente, el navegante se encuentra con una serie de tareas típicas a resolver, que se diferencian de las planteadas anteriormente.

Tarea 1: Cálculo de la hora y la lectura de la corredera (t_2 y Lc_2) en el momento cuando el objeto se encuentra en el través.

Para solución de esta tarea es necesario recordar que cuando el buque se traslada por la línea del rumbo efectivo su plano diametral queda en todo momento paralelo a la línea del rumbo verdadero (Fig. 172).

Supongamos que el buque comienza a navegar en el punto B_1(T_1 y Lc_1).

En la región de navegación existe una corriente, que se muestra por el vector V_β. En la carta se encuentran ploteadas las líneas del rumbo verdadero y del rumbo efectivo (Fig. 172).

Para resolver esta tarea inicialmente se determina la posición del buque B_2 en el momento del través al objeto. Para ello se calcula:

$$MvI = Rv \pm 90^\circ {}^{Br}_{Er}$$

la cual se plotea desde el objeto hasta su intersección con la línea del rumbo efectivo en el punto B_2. El punto B_2 será la posición del buque en el momento del través.

Desde el punto B_2, en dirección contraria al vector de la corriente y paralelo a él, se traza una línea hasta su intersepción con la línea del rumbo verdadero B'_2.

El punto B'_2 obtenido corresponderá a la posición del buque en el caso cuando no existiera la corriente, donde el buque hubiese recorrido el espacio $Sc = B_1 B'_2$.

Para calcular la lectura de la corredera y el tiempo de navegación es suficiente calcular la hora y la lecrtura de la corredera por la línea del rumbo verdadero, es decir en el momento de llegada al punto B'_2.

$$T_2 = T_1 + t; \qquad T = \frac{Sc}{Vc};$$

$$Lc_2 = Lc_1 + \Delta Lc, \qquad \Delta Lc = \frac{Sc}{Kc}.$$

Los calculos realizados para el punto B'_2 serán reales para el punto B_2, en el cual estará el buque en el momento del través. Para registrar el momento de llegada al través se calcula la marcación aguja en este instante.

Tarea 2: Cálculo de la hora y la lectura de la corredera (T_2 y Lc_2) del momento cuando el buque esté en determinada marcación a un objeto.

Para determinar la posición del buque en el momento dado desde el objeto, se traza la línea de la marcación hasta su intersepción con la línea del rumbo efectivo. El punto B_2 será la posición del buque en el momento cuando se pasa por la marcación dada (Fig. 173).

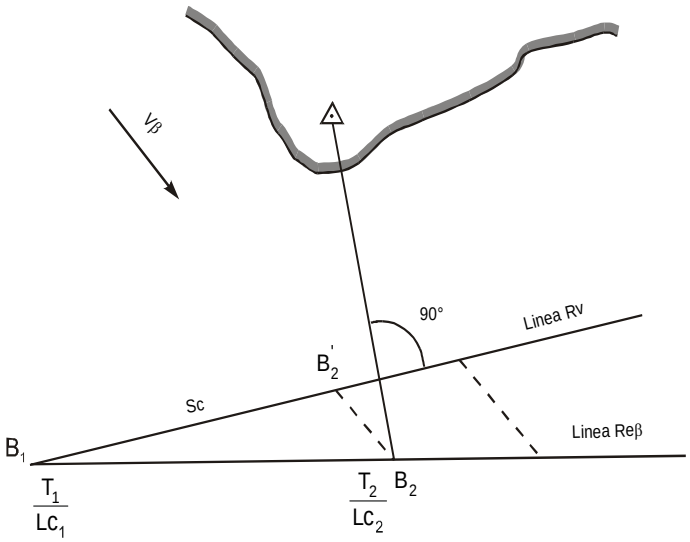


Fig. 172 Momento del través considerando la corriente

Desde el punto B_2 se traza una línea paralela al vector de la corriente y en dirección contraria hasta su interposición con la línea del rumbo verdadero en el punto B'_2. En el punto B_2 estaría el buque si existiera la corriente. Para este punto se realiza el cálculo de la hora T_2 y la lectura de la corredera Lc_2.

Los datos obtenidos se refieren al punto B_2.

$$T_2 = T_1 + t; \qquad t = \frac{Sc}{Vc};$$

$$Lc_2 = Lc_1 + \Delta Lc; \qquad \Delta Lc = \frac{Sc}{Kc}.$$

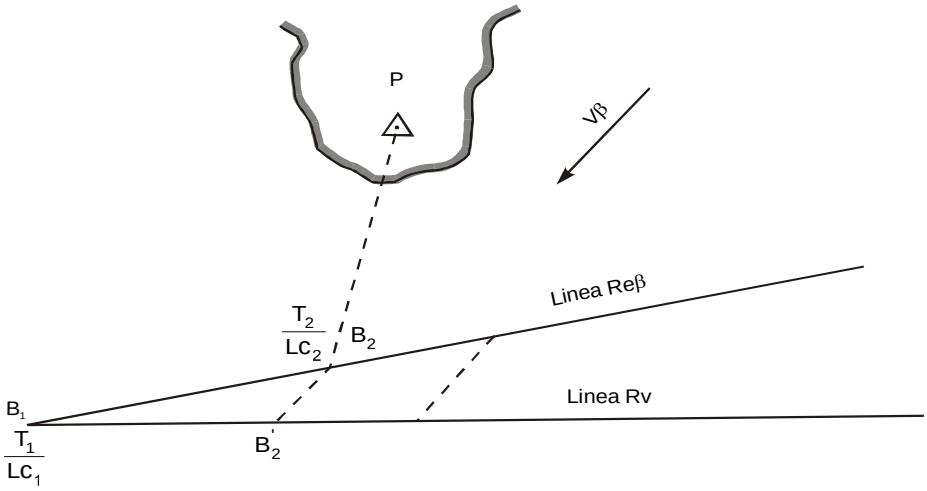


Fig.173 Cálculo del momento de llegada a una marcación dada

Si en los datos de esta tarea en lugar de la marcación verdadera aparece la marcación relativa, entonces es necesario realizar la conversión:

$$Mv = Rv \pm Mv$$

(+ Si la Mr es a estribor y - si es a babor).

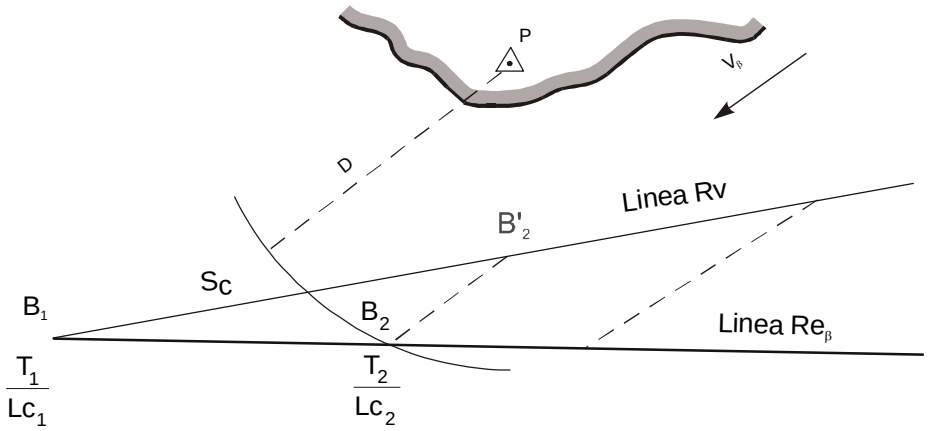


Fig. 174. Cálculo del momento de llegada a una distancia dada.

Tarea 3: Cálculo de la hora y lectura de la corredera (T_2 y Lc_2) en el momento cuando la distancia sea igual a la dada.

Para determinar la posición del buque en un momento dado desde el punto a tomado como centro y con un radio igual a la distancia dada (D) se traza un arco de circunferencia hasta su intercepción con la línea del rumbo efectivo (Fig. 174).

El punto B_2 será la posición del buque. Las operaciones posteriores se hacen de igual forma que en las tareas anteriores.

5.19 Navegación de estima considerando el abatimiento y la deriva

En el caso cuando el buque se encuentra bajo la influencia del abatimiento y la deriva, ambos se consideran conjuntamente.

Es necesario recordar que el movimiento del buque bajo la acción de las máquinas y el viento se efectúa con relación al agua por eso es necesario calcular inicialmente el abatimiento y luego la deriva.

Conociendo la marcación relativa del viento aparente, su velocidad así como la velocidad del buque, se obtiene de las tablas el ángulo de abatimiento.

Por el rumbo verdadero y el ángulo de abatimiento conocido se calcula el rumbo efectivo por abatimiento:

$$Re_{\alpha} = Rv + \alpha$$

La línea del Re_{α} obtenida se traza en la carta (Fig.175a y 175b), sobre ella se traza el vector de la velocidad del buque tomada por la corredera Vc, desde su extremo (punto a) se traza el vector V_{β} .

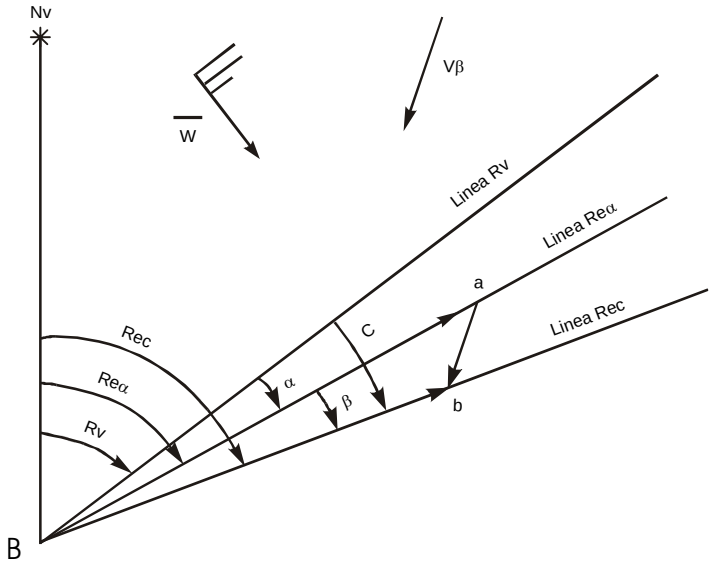


Fig.175a Consideración conjunta del viento y la corrient (tarea directa)

Uniendo el punto B con el extremo del vector de la velocidad de la corriente (punto b) obtenemos la línea del rumbo efectivo del buque y midiendo la dirección de esta línea obtenemos el rumbo efectivo.

El ángulo entre la línea del rumbo efectivo por abatimiento Re_{α} y la línea del rumbo efectivo Re_{c} es el ángulo de deriva (β).

El ángulo entre la línea del rumbo verdadero y la línea del rumbo efectivo se llama **ángulo total de abatimiento y deriva C**.

La magnitud de este ángulo se determina por la expresión:

$$C = \alpha + \beta$$

Esta fórmula es algebraica, por lo que para su solución se deben tener en cuenta los signos de α y β. El segmento de la línea del rumbo efectivo Bb es el vector de la velocidad V del buque.

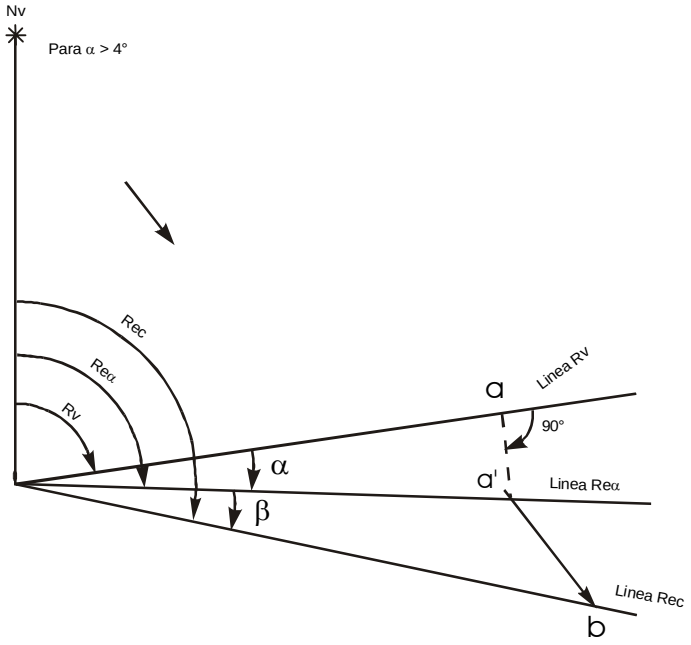


Fig.175b Consideración conjunta del viento y la corriente para α>4°

Si la navegación se realiza sin corredera, para considerar la corriente, sobre la línea del rumbo efectivo por abatimiento se traza la velocidad del buque considerando su variación por el efecto del viento.

Si se conoce el rumbo efectivo que debe hacer el buque, entonces la determinación del rumbo verdadero se realiza en el orden inverso (Tarea inversa).

Inicialmente se determina el rumbo efectivo considerando abatimiento Re_α (Fig.176). Para ello desde el punto B, donde comienza la navegación se plotea el vector de la velocidad de la corriente V_β y desde su extremo con un compás de radio igual a la velocidad del buque por la corredera Vc se traza un arco de circunferencia hasta su intersección con la línea del rumbo efectivo.

Los puntos (A) y (B) se unen con una línea recta que se traslada luego al punto B. Esta línea será la línea del rumbo efectivo considerando el abatimiento Re_α .

De acuerdo a la marcación relativa del viento aparente, su velocidad y la velocidad del buque por la corredera Vc en las tablas se determina el ángulo de abatimiento (α).

El rumbo verdadero se calcula por la fórmula:

$$Rv = Re_\alpha - \alpha$$

Ejercicios resueltos de corriente

1. Un buque navega con Rv = 075°, V = 10 nudos, en una zona donde existe una corriente cuya dirección es de 135 y velocidad (V_β) es de 2 nudos.
Calcular Re_α y Ve

Solución. Desde un punto conveniente (Fig. 177a) trace AB, el rumbo y velocidad del buque en dirección 75°, a una distancia de 10 millas. (escala 1 cm =1n =1milla) (Fig. 177b).

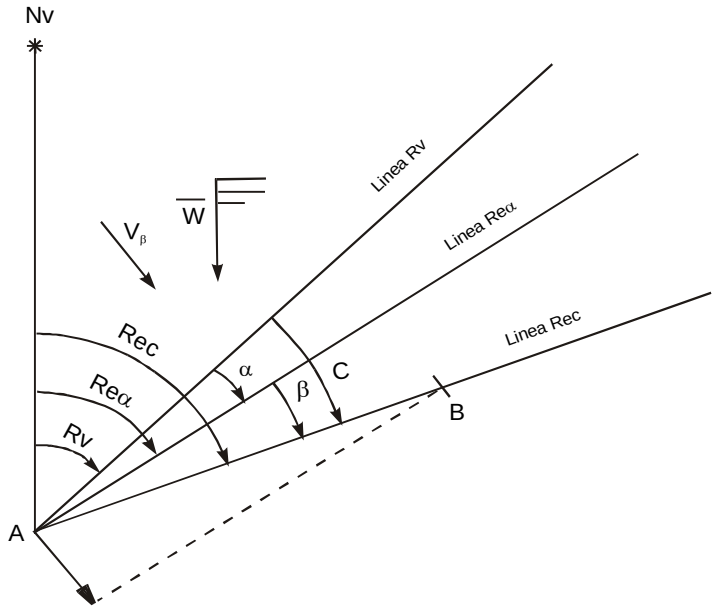


Fig. 176 Consideración conjunta del viento y la corriente (Tarea inversa)

Respuesta Re_{β}= 085°, Ve =11,2n

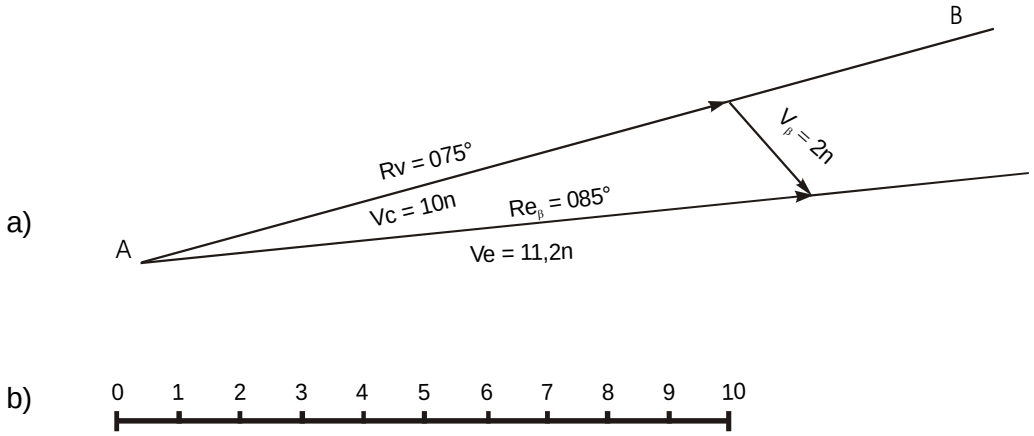


Fig.177

2. El comandante de un buque desea seguir una Re_{β}=100° a traves de una corriente de dirección de 160° y velocidad de 2,5 nudos. Velocidad del buque 14 nudos.

Se desea determinar el rumbo verdadero y la velocidad efectiva.

Solución. Desde un punto, trace la línea AB extendida en la dirección del rumbo efectivo, 100° (Fig. 178).

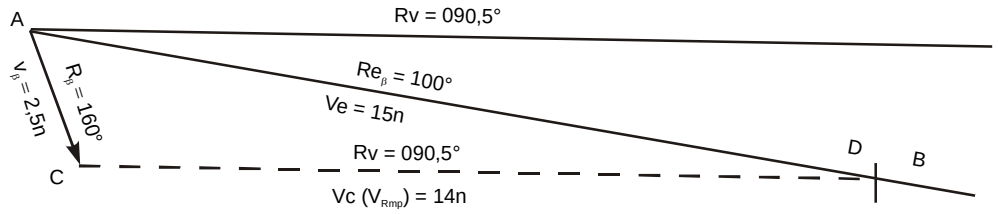


Fig. 178

Desde el punto A trace la dirección y velocidad de la corriente. Haciendo centro en el punto C y con una abertura del compás igual a la velocidad del buque (14 nudos) corte la línea del Re_β en D. Mida la dirección de la línea CD, ésta será el Rv a gobernar en el buque, 090,5°.

Mida la longitud AD, Velocidad efectiva 15n.

Respuesta: Rv = 090,5°, V_e = 15n

3. El capitán desea hacer un Re_β= 260° y velocidad 13 nudos a traves de una corriente de 175°- 3 nudos.

Determine el Rv y la velocidad a efectuar.

Solución. Desde el punto A trace la dirección del rumbo efectivo 260° con una longitud igual a la velocidad efectiva de 12 nudos. Desde el punto A trace la dirección y velocidad de la corriente AC. La dirección de esta línea, es el rumbo deseado a gobernar, y la longitud, es la velocidad deseada (Fig. 179).

Respuesta: Rv = 273°, velocidad a realizar 13,2n.

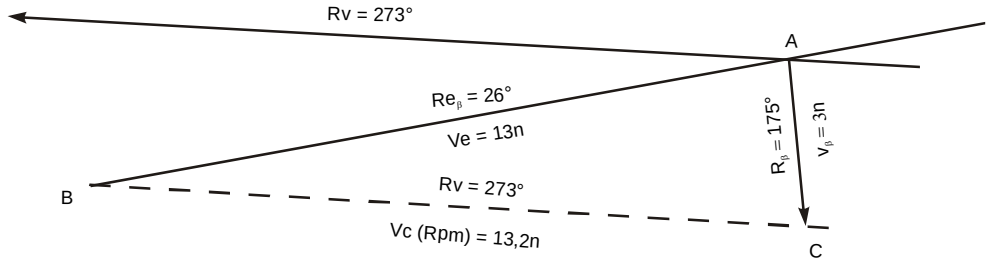


Fig. 179

5.20 Exactitud de la navegación de estima

El cálculo del desplazamiento del buque por el método de estima gráfica se realiza con ayuda de construcciónes geométricas, efectuadas en la carta. Las mismas están expuestas a la presencia de inevitables errores.

Analicemos el valor numérico de estos errores y los métodos de cálculo durante la solución de tareas particulares de ploteo en la estima gráfica. Consideramos, que los instrumentos utilizados en la construcción gráfica en la carta, están correctos. Las insignificantes e imperceptibles errores de los instrumentos para nuestros órganos sensitivos se catalogan en la categoría de errores casuales.

Errores en las mediciones y ploteo de las direcciones con ayuda del transportador y la regla paralela

Estos errores surgen debido a las acciones elementales que realiza el navegante en la carta, siendo las mas frecuentes las siguientes:

- errores en la coincidencia del indice central del transportador con la línea del meridiano de la carta.

- error en la lectura del ángulo (rumbo, marcación) por la escala del transportador.

- error que surge debido a la inexactitud en el ajuste de la regla paralela con el transportador.

- error originado durante el despazamiento de la regla paralela por la carta.

Experimentalmente se establece, que un navegante bien entrenado, si durante el ploteo no realiza considerables desplazamiento de la regla paralela, la magnitud del error cuadrático medio total de los errores de medición y ploteo de la dirección es aproximadamente de 0,1 - 0,2°. Ante considerables desplazamientos de la regla paralela por la carta, el error de ploteo (medición) de la dirección aumenta considerablemente.

Los errores en la medición (ploteo) de las distancias surgen debido a los errores de coincidencia de las puntas del compás con los extremos del segmento medido y los errores en la lectura de la distancia medida por la escala de distancia (por las divisiones de la escala de latitud de la carta). Durante la coincidencia de los puntos del compás se comete un error, cuyo error cuadrático media es aproximadamente m_1 = 0,2 mm (o sea numéricamente igual al límite de la exactitud de la escala de la carta). Para medir la longitud del segmento, se debe efectuar dos veces (m_2 = 0,2 mm). El error en la lectura de la magnitud de la distancia medida por la escala de la latitud de la carta es parte del error por la coincidencia de una de las puntas del compás con una de las marcas (m = 0,2 mm) y el error de apreciación visual de la posición de la otra punta del compás entre la marca aproximada de la escala (interpolación visual), cuyo error cuadrático medio cuadrático se considera igual a 0,06 del valor de la escala (m_4).

El error total de medición (ploteo) de la distancia se determina por la fórmula

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_3^2} \qquad (156)$$

Ejemplo: Evaluar la exactitud de medición de la distancia en una carta de escala de 1: 200 000 para un valor de la escala de latitud de la carta 0,5'.

El error de coincidencia de los puntos del compás con el extremo del segmento medido (marcas de la escala de latitud de la carta) será:

$$m_1 = m_2 = m_3 = 200\ 000 \times 0{,}2 \text{ mm} = 40\ 000\text{mm} = 40 \text{ m}$$

El error de apreciación visual de la posición de la punta del compás entre las marcas de la escala:

$$m_4 = 0{,}06 \times 0{,}5' = 0{,}03 \text{ millas} = 0{,}3\text{cab} = 56 \text{ m}$$

Magnitud del error medio cuadratico resultante.

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_3^2}$$

$$m = \sqrt{40^2 + 40^2 + 40^2 + 56^2} = 89m = 0{,}5cab.$$

Error en la medición de las coordenadas geográficas del punto situado en la carta. La medición de las coordenadas de un punto en la carta de proyección Mercator se reduce, en esencia a la medición de este punto al paralelo y meridiano mas cercano de la carta. Por consiguiente, la apreciación de la exactitud de estas acciones deben realizarse con la misma apreciación de exactitud de medición de la distancia. Al evaluar la medición de la longitud se debe tener en cuenta que, la distancia hasta el meridiano más cercano se expresa en millas náuticas sino en millas ecuatoriales.

Error en el ploteo de un punto en la carta por sus coordenadas geográficas

Durante el ploteo de un punto en la carta su posición se determina por la intersección de dos líneas rectas: meridiano y paralelo, cada una de las cuales se traza con un error, igual al error del ploteo de la distancia. El error cuadrático medio de la elipse, que caracteriza a los posibles errores de la posición del punto, tiene iguales semiejes.

$$a = b = m_{plo}$$

donde m_{plo} - error cuadrático medio del ploteo de la distancia, o sea esta elipse representa propiamente un círculo.

El error cuadrático medio medio del ploteo del punto en la carta es igual.

$$M = \sqrt{2} m_{plo} \qquad (157)$$

Ejemplo: Apreciar el error cuadrático medio del ploteo del punto en la carta de escala 1: 200 000 con un valor de la escala del marco 0,5'.

En correspondencia con los resultados obtenidos en el ejemplo anterior; durante estas condiciones m_{plo}= 89m Por consiguiente, el error cuadrático medio del ploteo del punto en la carta es igual:

$$M = \sqrt{2} m_{plo} = \sqrt{2} x 89m = 130m = 0{,}7cab.$$

5.21 Apreciación de la exactitud en la estima gráfica del buque

Los elementos que caracterizan el movimiento del buque y que se consideran en la estima son: el rumbo verdadero, el espacio recorrido por el buque, el abatimiento, la dirección y velocidad de la corriente, son conocidas con determinado error. Es por eso que aun cuando se lleve la estima lo más esmeradamente posible, las posiciones de estima no estarán excentas de errores.

Las principales fuentes y causas de errores en la estima son:

- errores en el rumbo verdadero y el espacio recorrido.

- errores en el ángulo de abatimiento

- errores en la dirección y velocidad de la corriente.

- errores en la construcción gráfica en la carta.

Observaciones que comparativamente con otros errores, los errores de construcción gráfica, si ellos se cumplimentan con el debido esmero, generalmente son pequeños y durante la apreciación de la exactitud de la estima estos se pueden despreciar. Por eso analizaremos la influencia en la exactitud de la estima, solamente los errores en los elementos del movimiento del buque, es decir los errores en la medición del rumbo, y el espacio recorrido y los errores en el cálculo del ángulo de abatimiento y los elementos de la corriente.

Es conocido que el rumbo verdadero es la suma algebráica del rumbo aguja y la corrección del compás. Por consiguiente el error en el rumbo verdadero depende tanto del error en el rumbo aguja, como del error en la corrección del compás.

El error en el rumbo aguja es igual al error en la lectura del rumbo dado y posee carácter casual. Para los compases magnéticos el error cuadrático medio en la lectura del rumbo m^0_{Ram} puede ser considerado igual a 0,3° - 0,4°, para los girocompás - 0,2° - 0,3°.

La corrección del girocompás puede ser determinada cuando el buque se encuentra atracado en la base con gran exactitud ya que en la estabilidad de su trabajo influyen sólo las oscilaciones en el voltaje y la frecuencia de las corrientes de alimentación.

Cuando el buque se encuentra navegando en mar abierto sobre el girocompás actúa un gran número de factores externos: las oscilaciones de la velocidad y el rumbo , la corriente, el balanceo los giros, las variaciones de la velocidad del buque, etc. los cuales crean grandes aceleraciones, lo que provoca, que el eje del girocompás constantemente, realice oscilaciones irregulares alrededor de la posición de equilibrio de su eje principal.

Por consiguiente el error adoptado de la corrección del girocompás $m^0_{\Delta\bar{\tau}}$ será variable y diferente para cada rumbo . Sumando los errores al cuadrado m^0_{Ram} y $m^0_{\Delta g}$ se puede determinar el error cuadrático medio del rumbo verdadero m^0_{Rv}, cuyo valor de acuerdo a datos experimentales, en dependencia del tipo de girocompás es igual a:

$$m^0_{Rv} = 0{,}2° - 0{,}8°$$

El error en la corrección total del compás magnético $m^0_{\Delta\bar{\tau}}$ se suma con los errores en la determinación y calculo de la declinación magnética y el desvio a causas de la variación del estado magnético del buque.

Para el compás magnético de 127 mm el error cuadrático medio resultante del rumbo verdadero:

$$m^0_{Rv} = 1{,}0° - 1{,}2°$$

El error en el espacio recorrido determinado por la corredera, es igual al error de la corrección de la corredera. Este error es determinado en la base medida, y es aproximadamente igual a 0,5 - 1, 0%.

Los errores en la lectura de la corredera son muy pequeños por lo que éstos pueden ser despreciados.

Si calculamos el espacio recorrido por el tiempo de navegación y la velocidad tomada de una tabla de

acuerdo a las revoluciones de las máquinas, medidas con el tacómetro, el error en el espacio recorrido puede alcanzar valores de 2 - 2,5 %.

El error en la estima debido a los errores en el rumbo verdadero y el espacio recorrido por el buque, como puede observarse, serán comparativamente pequeños y se pueden calcular con suficiente exactitud.

Las principales fuentes y causas de los errores en las estima son los errores en la consideración del abatimiento y la corriente.

El viento actuando directamente sobre la obra muerta del buque lo desvía del rumbo, o sea origina el abatimiento. Además este crea la corriente de deriva, la cual también actúa sobre el buque y por regla general no puede ser determinada con la suficiente exactitud.

El oleaje originado por el viento crea la variación de la velocidad del buque, el zigzagueo en el rumbo, etc.

El conocimiento sobre la acción del viento en el buque son muy limitados, por eso a causa de la consideración incorrecta o la no consideración de la influencia del viento sobre el buque puede originar errores de gran magnitud en la estima.

El error en el ángulo de abatimiento $m°_{\alpha}$ depende del tipo de buque, de su desplazamiento, de la magnitud del ángulo de deriva asumido asi como de una serie de causas y puede alcanzar valores de 0,0° - 4,0° y más.

Sobre las corrientes sólo se conoce sus leyes generales a pesar de todos los trabajos investigativos realizados. Los datos más confiables se poseen para determinadas regiones, donde las corrientes de flujo y reflujo poseen una expresión más acentuada, como son el Mar del Norte, el Canal de La Mancha y otras.

Habitualmente en la estima, los datos de las corrientes se toman de diferentes publicaciones, los cuales están elaboradas basándose en las mediciones instrumentales múltiples sobre las corrientes o de los datos obtenidos por la comparación de las posiciones de estima y las posiciones observadas del buque.

Por eso los elementos de las corrientes tomados de las tablas y manuales, contienen errores, que en mar abierto pueden ser: para la velocidad - 0,5 nudos y para la dirección - hasta 30°.

Con la utilización de atlas especiales de corrientes, en los cuales se informa sobre todas las componentes de las corrientes y se consideran los campos típicos de los vientos, la velocidad de la corriente se determina con un error de hasta 0,2 nudos y la dirección con un error de hasta 20°.

5.22 Errores vectoriales en la estima originadas por los errores en el rumbo, el espacio recorrido por el buque, la consideración del abatimiento y la deriva

Analicemos los errores del rumbo verdadero, espacio recorrido, abatimiento y la corriente como errores casuales.
De acuerdo con las propiedad de los errores casuales la probabilidad de surgimiento de errores iguales en magnitud, pero de signos contrarios será igual.

Por consiguienrte los errores en los elementos de movimiento del buque, en la consideración del abatimiento y los elementos de la corriente actúan en sentidos opuestos, es decir, son errores vectoriales.

En efecto el error en el rumbo del buque $\pm m^0_{Rv}$ da un error vectorial $\overleftrightarrow{l}_1$ dirigido perpendicularmente al rumbo verdadero; el error en el espacio recorrido $\pm m_s$ da un error vectorial $\overleftrightarrow{l}_2$ a lo largo de la línea del rumbo verdadero; el error en el ángulo de deriva $\pm m^0_\alpha$ da un error vectorial $\overleftrightarrow{l}_3$ dirigido perpendicularmente a la línea de fe; el error en la velocidad asumida de la corriente $\pm m_{V\beta}$ da un error vertical $\overleftrightarrow{l}_4$ dirigido a lo largo del vector de la corriente y, por último, el error m_{Rv_β} en la dirección de la corriente da un error vectorial $\overleftrightarrow{l}_5$ perpendicular al vector de la corriente (Fig. 180).

Dos o más errores vectoriales independientes al sumarse forman la elipse de errores. Por consiguiente, si todos los errores vectoriales en su valor absoluto son iguales a los errores cuadráticos medios , la elipse formada por ello será la elipse cuadrático medio de la estima.

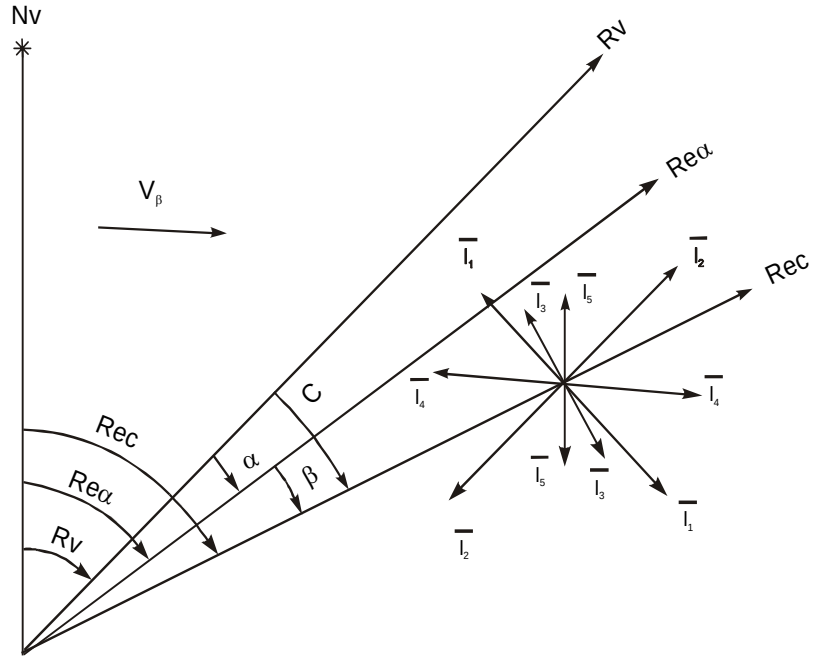


Fig. 180 Errores vectoriales de estima

La probabilidad de que la posición verdadera del buque se encuentre dentro de esta elipse, es igual a 39,3%. Si duplicamos los semiejes de la elipse la probabolidad será 86,5%, y si los triplicamos la probabilidad es igual a 98,9%. El centro de tal elipse es la posición de estima del buque.

Hablando estrictamente, la exactitud de la estima es necesario valorarla por el método de la elipse de errores.

Sin embargo los errores en el rumbo verdadero y en el espacio recorrido por el buque, así como los errores en los elementos de la corriente son perpendiculares entre si por pares y en magnitud son aproximadamente iguales.

Por consiguiente los semiejes de la elipse de errores son aproximadamente iguales entre sí, lo que significa que para la valoración de la exactitud de la estima es completamente posible utilizar el error error cuadrático medio "circular". Esto, en gran medida simplifica los cálculos y la construcción de la figura de errores (circunferencia) en la carta.

La probabilidad de que la posición del buque se encuentre dentro de la circunferencia circunscrita alrededor de la posición de estima con un radio igual al error cuadrático medio de estima M, es igual a 68,3%, dentro de la circunferencia de radio 2M es igual a 95% y dentro de la circunferencia de radio 3M es igual a 99,9%.

5.23 Cálculo del error cuadratico medio de la estima del buque

a) Cálculo del error cuadrático medio cuando no existen abatimiento y corriente

Cuando están ausentes el abatimiento y la corriente, el error cuadratico medio en la estima depende de los errores en el rumbo verdadero y en el espacio recorrido por el buque.

Si la estima se lleva por la corredera el error en el espacio recorrido se determina por el error en la corrección de la corredera $m_{\Delta c\%}$.

Supongamos que el buque con cierto rumbo verdadero recorrió el espacio S, donde el error en el Rv es igual a $m°_{Rv}$ y el error en la corrección de la corredera $m_{\Delta c\%}$.

Entonces el error de estima a causa de los errores en el rumbo verdadero será igual a:

$$m_1 = S\frac{m^0_{Rv}}{57{,}3°}$$

El error vectorial $\overline{l}_1$ en el caso dado en su valor absoluto es igual al error cuadrático medio m_1 y está dirigido hacia ambos lados perpendicularmente al rumbo verdadero (Fig.181).

El error de estima a causa del error en el espacio recorrido (corrección de la corredera) será: $m_2 = S\frac{m^0_{\Delta c\%}}{100\%}$

y el error vectorial $\overline{l}_2$ numericamente es igual al error cuadrático medio m_2 y está dirigidpo por el rumbo verdadero del buque desde el punto de estima **e** hacia ambos lados.

Debido a que los errores cuadráticos medio m_1 y m_2 ($\overline{l}_1$ e $\overline{l}_2$) se cortan con un ángulo de 90°, el error cuadrático medio de estima se determina por la fórmula.

$$M = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2} \qquad (158)$$

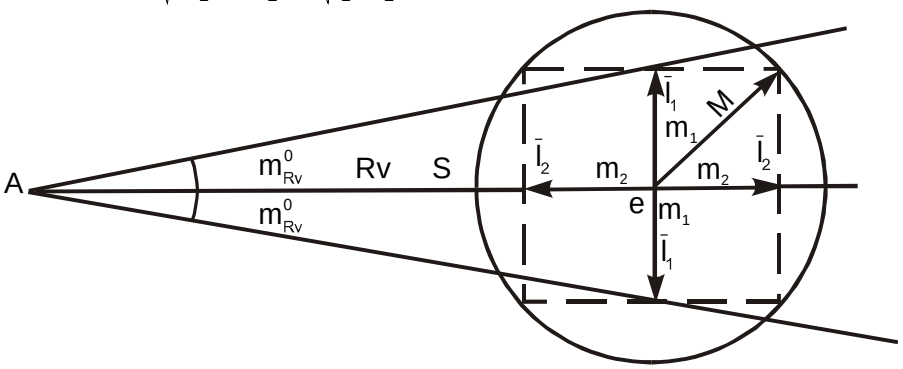


Fig.181 Error cuadrático medio de estima en ausencia de abatimiento y deriva

Esta será igual a la diagonal del rectángulo, cuyos lados son iguales a los errores cuadrático medio

Esta será igual a la diagonal del rectángulo, cuyos lados son iguales a los errores cuadrático medio m_1 y m_2. Sustituyendo estos valores en la fórmula (158) obtenemos:

$$M = \sqrt{\left(S\frac{m^0_{Rv}}{57{,}3°}\right)^2 + \left(S\frac{m^0_{\Delta c\%}}{100\%}\right)^2} \qquad (159)$$

ó después de las simplificaciones:

$$M = \frac{S}{100}\sqrt{3\left(m^0_{Rv}\right)^2 + m^2_{\Delta c\%}}. \qquad (160)$$

Si la estima se lleva por la velocidad V_{rpm} y el tiempo de navegación t, la fórmula para el cálculo de la exactitud de la estima toma la forma:

$$M = \sqrt{\left(\frac{m^0_{Rv}V_{rpm}}{57{,}3°}\right)^2 + (m_v t)^2}, \qquad (161)$$

donde m_v - error cuadrático medio de la velocidad del buque.

De las fórmulas se observa que la magnitud del error de estima es proporcional al espacio recorrido por el buque, al error en el rumbo del buque y al error en la corrección de la corredera.

b) Cálculo del error cuadrático medio de estima cuando existe abatimiento

Durante la navegación considerando el abatimiento, el rumbo efectivo del buque es igual a la suma algebráica del rumbo verdadero y el ángulo de abatimiento:

$$Re = Rv + \alpha$$

Debido a que los los errores en el rumbo verdadero $m°_{Rv}$ y el ángulo de abatimiento asumido $m°_{\alpha}$ son idenpendientes, el error cuadrático medio del rumbo efectivo (derrota) a causa de estos errores se determina por la fórmula:

$$m_{Re\alpha} = \sqrt{\left(m^0_{Rv}\right)^2 + \left(m^0_{\alpha}\right)^2}. \qquad (162)$$

Entonces el error cuadrático medipo de estima a causa de los errores en la derrota será:

$$m_1 = S\frac{m^0_{Re\alpha}}{57{,}3°}. \qquad (163)$$

Si la estima se llevó por las indicaciones de la corredera el error cuadrático medio será igual a:

$$M = \sqrt{\left(S\frac{m^0_{Re\alpha}}{57{,}3°}\right)^2 + \left(S\frac{m^0_{\Delta c\%}}{57{,}3°}\right)^2} \qquad (164)$$

ó

$$M = \frac{S}{100}\sqrt{3(m^0_{Re\alpha})^2 + m^2_{\Delta c\%}}. \qquad (165)$$

Cuando se lleva la estima considerando la velocidad Vrpm y el tiempo de navegación t, además de los errores en el valor asumido de la velocidad, es necesario considerar también el error en la pérdida de velocidad por el abatimiento. Sumando estos errores cuadráticamente obtenemos:

$$m_v^2 = m_{Vrpm}^2 + m_{pv}^2.$$

Entonces el error cuadrático medio de estima se halla por la fórmula:

$$M = \sqrt{\left(\frac{m_{Re\alpha}^0 V_{rpm}}{57{,}3°}\right)^2 + \left(m_V t\right)^2}. \qquad (166)$$

c. Calculo del error cuadrático medio de la estima considerando la corriente

Cuando se navega considerando la corriente, además de los errores en el rumbo verdadero y el espacio recorrido, el error de estima tendrán una influencia de gran valor los errores en la velocidad y la dirección de la corriente considerada.

Ya que los errores en los elementos de la corriente $m°_{R\beta}$ y $m_{V\beta}$ son mutuamente perpendiculares e independientes, los errores originados por ellos en la estima serán también independientes y mutuamente perpendiculares (Fig 182).

Estos errores se calculan por las fórmulas:

$$m_1 = \frac{m_{R_\beta}^0 V_\beta t}{57{,}3°}; \qquad (167)$$

$$m_2 = m_{V\beta} t.$$

donde V_β - Velocidad de la corriente considerada;

t - tiempo de navegación en la corriente dada,

$m_{R_\beta}^0$, $m_{V\beta}$ - errores en los elementos de la corriente considerada.

Sumando los errores cuadráticos m_1 y m_2 obtenemos el error cuadráticop medio de estima que es originado por los errores en los elementos de la corriente solamente:

$$M_c = \sqrt{m_1^2 + m_2^2} = \sqrt{\left(\frac{m_{R_\beta}^0 V_\beta t}{57{,}3°}\right)^2 + \left(m_{V\beta} t\right)^2}. \qquad (168)$$

El error cuadrático medio de estima originado por los errores en el rumbo verdadero, el espacio recorrido y en los elementos de la corriente, se determina por la fórmula.

$$M_e = \sqrt{M^2 + M_c^2}, \qquad (169)$$

donde M_c - error cuadrático medio de la estima calculado por la fórmula (168)

M - error cuadrático medio de la estima calculado por la fórmula (159)

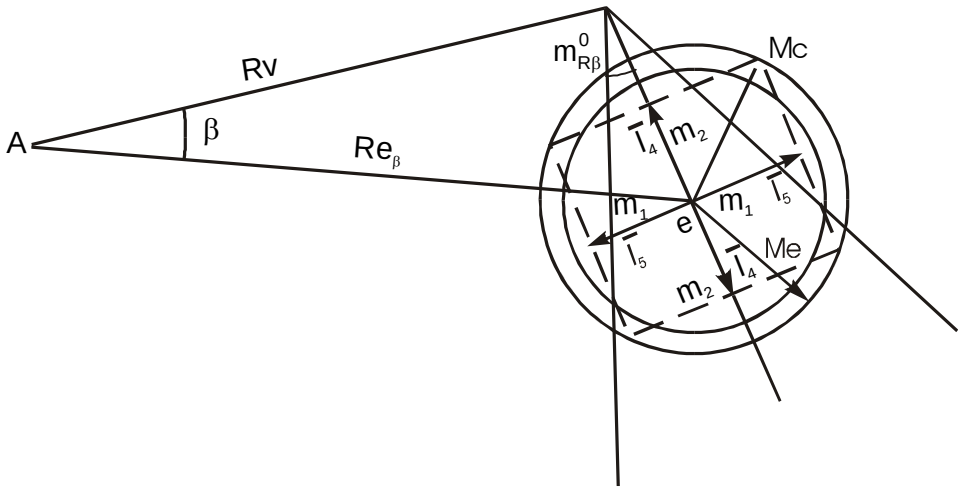


Fig. 182 Error cuadrático medio de estima debido a los errores en los elementos de la corriente

d. Cálculo del error cuadrático medio de estima en la navegación con abatimiento y corriente

Cuando se navega por estima considerando el abatimiento y la corriente para la obtención del error cuadrático medio de estima es necesario sumar cuadráticamente los errores calculados por las fórmulas (164) y (168):

$$M_e = \sqrt{M^2 + M_\beta^2},$$

ó

$$M_e = \sqrt{S\left(\frac{m^0_{Re\alpha}}{57{,}3°}\right)^2 + S\left(\frac{m^0_{\Delta c\%}}{100\%}\right)^2 + \left(\frac{m^0_{R\beta} V_\beta t}{57{,}3°}\right)^2 + \left(m_{V\beta} t\right)^2}. \qquad (170)$$

e. Cálculo del error cuadrático medio de estima cuando se navega con varios rumbos sin considerar el abatimiento y la deriva

Las fórmulas escritas anteriormente para el cálculo del error cuadrático medio de estima son correctas cuando se navega a un solo rumbo y en pequeños espacios.

Si el buque navegó con varios rumbos, seria logico calcular el error radial de estima o la elipse de errores en cada rumbo y luego consecutivamente sumar éstos elevados al cuadrado.

Como resultado se obtendría todo el tiempo, el error cuadrático medio creciente o la elipse de errores crecientes. Sin embargo la práctica muestra que tal método de cálculo de los errores de estima cuando el buque navega con varios rumbos es incorrecto.

Así pues cuando los buques salen a navegar por cortos períodos de tiempo frecuentemente con gran exactitud regresan a aquel punto, donde comenzó la estima, a pesar de la ausencia de observaciones.

Esto se explica por que los errores en el rumbo del buque y en el espacio recorrido, a pesar de que son magnitudes casuales, en cada rumbo parcial tienen caracter sistemático, es decir no varían.

Por eso cuando se navega con varios rumbos en sentidos inversos, la acción de estos errores se compensan mutuamente (en los rumbos inversos) y el buque con suficiente exactitud regresa al punto donde comenzó la estima.

Por consiguiente los errores de estima de los rumbos parciales deben sumarse geométricamente. Y esto significa que para el cálculo del error cuadrático medio de estima con varios rumbos, es necesario en lugar de los espacios recorridos en los rumbos parciales, tomar la magnitud del espacio recorrido por el rumbo general S_{gen} (Fig. 183). Entonces la fórmula para el cálculo del error cuadrático medio de la estima cuando se navega con varios rumbos sin considerar el abatimiento y la corriente y tiene la forma:

$$M = \sqrt{\left(\frac{S_{gen} m^0_{Rv}}{57{,}3°}\right)^2 + \left(\frac{S_{gen} m_{\Delta c\%}}{100\%}\right)^2} \qquad (171)$$

$$M = \frac{S_{gen}}{100}\sqrt{3\left(m^0_{Rv}\right) + m^2_{\Delta c\%}}. \qquad (172)$$

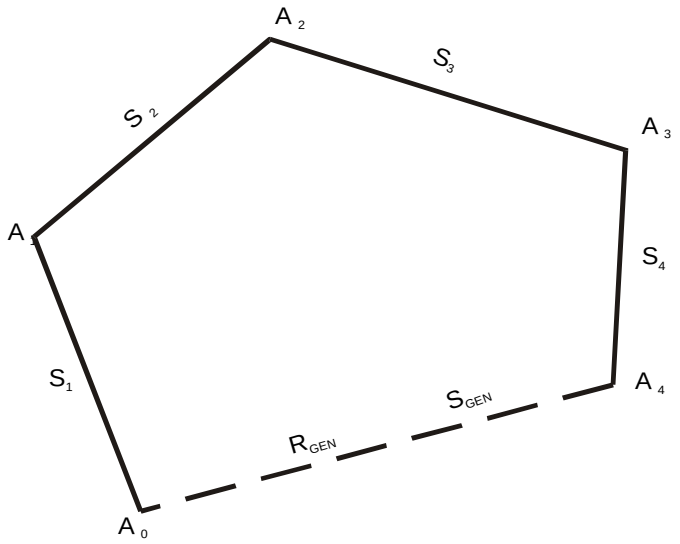


Fig. 183 Error cuadrático medio de la estimadurante la navegación con varios rumbos sin considerar ni abatimiento ni deriva

f. Cálculo del error cuadrático medio de la estima cuando se navega con varios rumbos considerando el abatimiento y la corriente

En el viento los ángulos de abatimiento en cada rumbo serán diferentes, por consiguiente, también los errores permisibles en los mismos ($m°_{\alpha}$) serán desiguales en magnitud e independientes. Por eso para la determinación del error total en la estima a causa de los errores en la consideración del abatimiento, es necesario calcular el error de estima en cada rumbo y luego sumar las magnitudes obtenidas elevadas al cuadrado.

$$M_{\alpha i} = S\frac{m^o_{\alpha i}}{57{,}3°} \qquad (173)$$

$$M_{\alpha} = \sqrt{M^2_{\alpha 1} + M^2_{\alpha 2} + M^2_{\alpha 3} + \ldots + M^2_{\alpha n}}, \qquad (174)$$

donde S_i - espacio recorrido por el buque en el rumbo parcial dado;

$m^0_{\alpha i}$ - error en el ángulo de abatimiento en el rumbo parcial dado;

$M_{\alpha i}$ - error cuadrático medio en la estima originado por los errores en el ángulo de abatimiento en cada rumbo parcial dado.

Entonces el error cuadrático medio cuando el buque navega con varios rumbos, en condiciones de influencia del viento se determina por la fórmula:

$$M_e = \sqrt{M^2 + M_\alpha^2}, \tag{175}$$

donde M y M_α se calculan por las fórmulas (171) y (174).

Si en la región de navegación actúa y se considera en la estima una corriente constante, el error de la estima causado por los errores en los elementos de la corriente se calcula para todo el tiempo de navegación por la fórmula conocida.

$$M_\beta = \sqrt{\left(\frac{m^0_{R\beta} V_\beta t}{57{,}3°}\right)^2 + \left(m_{V\beta} t\right)^2}, \tag{176}$$

donde t - tiempo de navegación considerando la corriente dada.

Si se consideran diferentes corrientes o la navegación se realiza con corriente o la navegación se efectua en las corrientes de flujo y reflujo, es necesario calcular los errores de estima $M_{\beta i}$ para cada corriente considerada por la fórmula (176) y luego sumarlos al cuadrado y obtener el error resultante en la estima originado por los errores en los elementos de las corrientes:

$$M_\beta = \sqrt{M^2_{\beta_1} + M^2_{\beta 2} + M^2_{\alpha 3} + \ldots + M^2_{\beta n}}. \tag{177}$$

El error cuadrático medio total de estima en la navegación con varios rumbos considerando el abatimiento y la corriente se determina por la fórmula:

$$M_e = \sqrt{M^2 + M_\alpha^2 + M_\beta^2}, \tag{178}$$

donde M - error en la estima originando solamente por los errores en el rumbo y el espacio recorrido y calculado por la fórmula (171);

M_α - error en la estima debido a los errores en ángulo de abatimiento y calculado por la fórmula (174);

M_β- error en la estima originado por dos errores en los elementos asumidos de la corriente y calculado por la fórmula (177).

Si como punto inicial de comienzo de la estima se considera la posición observada del biuque, en el cálculo del error cuadrático medio de la posición de estima es necesario además de los errores estudiados anteriormente, considerar el error cuadrático medio M_o de la posición observada inicialmente.

Y entonces el error de la posición de estima se determian por la fórmula:

$$M_e = \sqrt{M_0^2 + M^2 + M_\alpha^2 + M_\beta^2}. \qquad (179)$$

Nunca identifique los términos"error de estima" y "error en la posición de estima". En el error de estima, ademas de los propios errores, intervienen también los errores en la determinación de la posición de estima incial.

Ejemplo: El buque realizó una travesía con varios rumbos.

$Rv_1 = 50°$ $S_1 = 30$millas

$Rv_2 = 140°$ $S_2 = 70$millas

$Rv_3 = 340°$ $S_3 = 20$millas

(S_{gen} = 63 millas , t_{gen} = 7^h00^m)

apreciar el error de estima si m_{Rv} = 0,5° , $m_{\Delta c}$ = 0,8%

$m_{Re\alpha 1} = m_{Re\alpha 2} = m_{Re\alpha 3} = 0{,}5°$; $M_{c1} = M_{c2} = M_{c3} = 0{,}2n$

$m_{Re\beta} = 10°$

Hallemos las magnitudes vectoriales de los errores

$$S_{Gen}\frac{m_{Rv}^0}{57{,}3°} = \frac{63x0{,}5°}{57{,}3°} = 0{,}6\text{millas}$$

$$S_{Gen}\frac{m_{\Delta c\%}}{57{,}3°} = \frac{63x0{,}8\%}{100\%} = 0{,}5\text{millas}$$

$$S_1\frac{m_{Re\,\alpha}^0}{57{,}3°} = \frac{30x0{,}5°}{57{,}3°} = 0{,}3\text{millas}$$

$$S_2\frac{m_{Re\,\alpha}^0}{57{,}3°} = \frac{70x0{,}5°}{57{,}3°} = 0{,}6\text{millas}$$

$$S_3\frac{m_{Re\,\alpha}^0}{57{,}3°} = \frac{20x0{,}5°}{57{,}3°} = 0{,}2\text{millas}$$

$$\frac{m_{Re\beta}^0 V_\beta t}{57{,}3°} = \frac{10x2x7}{57{,}3°} = 2{,}4\text{millas}$$

$$m_{V\beta}^0 t = 0{,}2x7 = 1{,}4$$

Hallemos el error cuadrático medio de estima

$$M_e = \sqrt{0{,}6^2 + 0{,}5^2 + 0{,}3^2 + 0{,}6^2 + 0{,}2^2 + 2{,}4^2 + 1{,}4^2}$$

$$M_e = 2{,}97\text{millas}$$

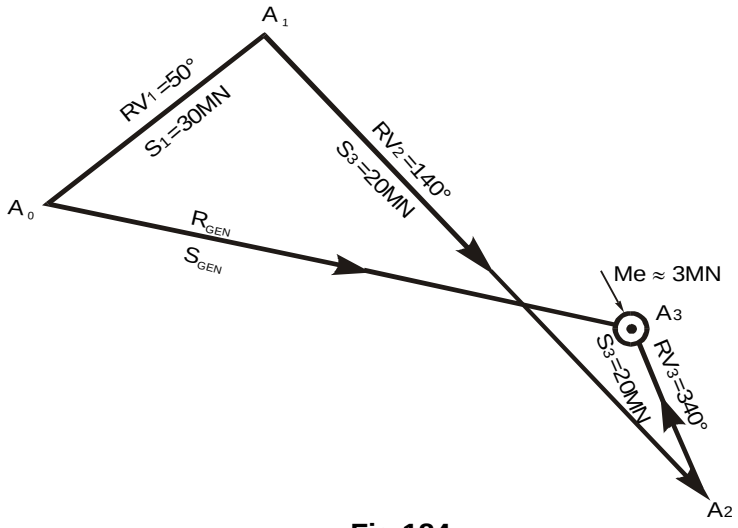


Fig.184

5.24 Coeficiente de exactitud de estima

Durante la estima gráfica uno de los factores que más influye en la apreciación de la exactitud de estima es el tiempo que es la única variable independiente, siendo el resto de los parámetros antes mensionados funciones casuales.

Las investigaciones teóricas y las innumerables observaciones prácticas demuestran, que los errores de estima aumentan proporcionalmente con el tiempo, solamente en las primeras horas de navegación, alterándose posteriormente la ley lineal, ocupando el lugar otra función más compleja. La dependencia de los errores de estima respecto al tiempo se puede expresar por la fórmula:

$$M_e = k\sqrt{t} \qquad (180)$$

donde k - coeficiente de exactitud de estima en millas náuticas/horas

t - horas de navegación por la estima

Ejemplo: Determinar la exactitud de estima si el buque navegó por estima durante 25 horas. Coeficiente de exactitud de estima k = 0,7 millas náuticas/horas.

$$M_e = k\sqrt{t} = 0{,}7\sqrt{25} = 3{,}5 \text{ millas}$$

El coeficiente de exactitud de estima para cada tipo de buque y en diferentes regiones del océano mundial tiene diferentes valores.Se determina empíricamente, por ejemplo por medio de la elaboración de la descripción en varias travesías prolongadas.

Cálculo del coeficiente de exactitud de estima.

El método más racional de cálculo del coeficiente k de exactitud de estima es el método de los mínimos cuadrados, que da el valor más probable de la incógnita.

Para esto se debe anotar del cuaderno de guardia de navegación la discrepancia C_i, obtenida en el momento Ti para un período de tiempo de navegación , de 24 - 26 horas. Hallando posteriormente la diferencia $t_i = T_o - T_i$ en horas respecto al momento T_o de determinación de la posición inicial, se construye

el gráfico de la función casual $C_i = f(t_i)$, como está mostrado en la figura 185.

Después de unir los puntos obtenidos en el gráfico con una curva suave, se hace pasaruna curva niveladora a todos los puntos; esta curva está mostrada con una línea discontinua. Después de esto es necesario tomar el valor de la ordenada de la curva niveladora a traves de iguales intervalos de tiempo, 2-3 horas y plantear n igualdades.

$$X_1 = k\sqrt{t_1}$$
$$X_2 = k\sqrt{t_2}$$
$$X_3 = k\sqrt{t_3}$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$X_n = k\sqrt{t_n}$$

Para la solución de las ecuaciones obtenidas por el método de los mínimos cuadrados se multiplican todas las ecuaciones por $\sqrt{t_i}$

$$X_1\sqrt{t_1} = kt_1$$
$$X_2\sqrt{t_2} = kt_2$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$X_n\sqrt{t_n} = kt$$

Sumando estas ecuaciones, obtenemos una ecuación normal.

$$\sum X\sqrt{t} = k\sum t$$

donde

$$\sum X\sqrt{t} = X_1\sqrt{t_1} + X_2\sqrt{t_2} + \ldots + X_n\sqrt{t_n}$$

$$k\sum t = kt_1 + kt_2 + \ldots + kt_n$$

Finalmente

$$k = \frac{\sum x\sqrt{t}}{\sum t}$$

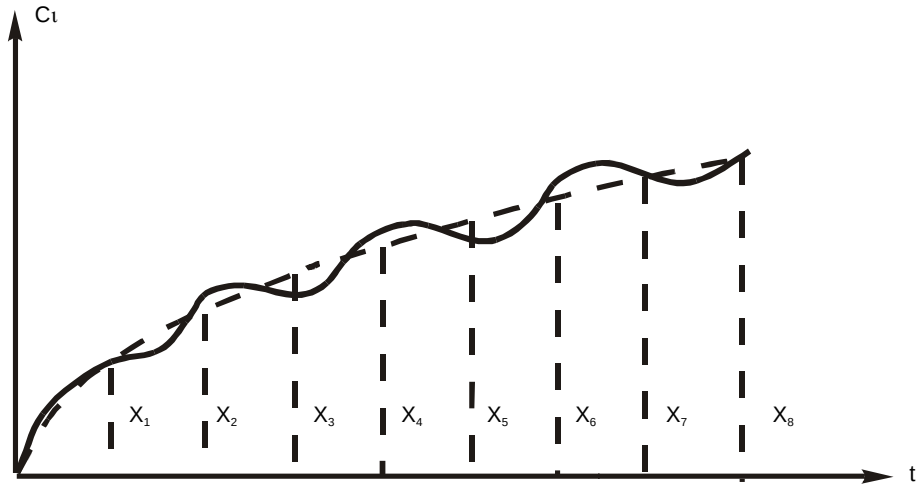


Fig. 185

Realizando el buque de 9-11 patas se puede obtener el valor medio de k, reflejando satisfactoriamente la dependencia del error de estima de una travsía prolongada.

Se comprende que durante el cálculo de k por el método analizado se debe evitar calcular la discrepancia obtenida, sin la suficiente autenticidad de las posiciones determinadas.

Tabla 5.5

H_o *	H_i *	t_i(horas y décimas) *	Ci(millas)
08^h00^m	09^h00^m	1.0	0.80
	12 30	4.5	1.25
	15 00	7.0	2.00
	17 45	9.6	1.95
	20 45	12.8	2.65
	23 54	15.9	2.50
	03 30	19.5	3.25
	06 21	22.4	3.1
	08 00	24.0	3.4

$* \; T_0 = H_0; \quad T_i = H_i$

$$t_1 = 0900 - 0800 = 1^h$$
$$t_2 = 1230 - 0800 = 4{,}5^h$$
$$t_3 = 1500 - 0800 = 7^h$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$t_9 = (0800 + 2400) - 0800 = 24^h$$

Tabla 5.6

t_i (h)	X_i (millas)
3	1.2
6	1.7
9	2.1
12	2.4
15	2.7
18	3.0
21	3.2
24	3.4

Calcular el coeficiete de exatitud de estima k

Solución:

1) Trazar en un papel milimetrado el sistema de ejes coordenados

2) Con los datos de la tabla 5.5 trazar la curva de C = f(t) (Fig.185).

3) Tomar del grafico la coordenada X cada tres horas

4) Calculo de k

$$k = \frac{\sum x_i \sqrt{t_i}}{\sqrt{t_i}}$$

$$k = \frac{1{,}2\sqrt{3} + 1{,}7\sqrt{6} + 2{,}1\sqrt{9} + 2{,}4\sqrt{12} + 2{,}7\sqrt{15} + 3\sqrt{18} + 3{,}2\sqrt{21} + 3{,}4\sqrt{24}}{3 + 6 + 9 + 12 + 15 + 18 + 21 + 24}$$

$$k = \frac{75{,}36}{108} = 0{,}697$$

$$k = 0{,}7$$

Las fórmulas analizadas para la apreciación de la exactitud de estima no puede garantizar la seguridad de los resultados, ellos dan la posibilidad al navegante aproximadamente apreciar las magnitudes de los posibles errores de estima. Por eso se debe realizar un control periódico de la estima, utilizando para todos esto los medios que tiene el navegante a su disposición.

5.25 Dispersión de la discrepancia de estima

En ocaciones ante el navegante se le presenta una interrogante: ¿como hallar lo más exactamente posible, donde se encontraba el buque en un momento intermedio dado entre los intervalos de tiempo de dos observaciones? Para responder a esta interrogante, se utiliza el método de **ploteo inverso (dispersión de la discrepancia).**

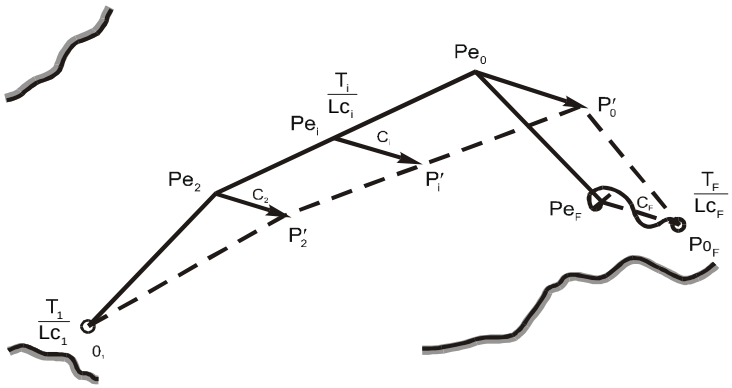


Fig. 186

Supongamos que se necesita hallar la posición del buque en el momento T_i, al mismo tiempo la determinación de la posición, que fue precedido a este instante, se efectuó en el momento T_1 (posición observada (Fija O_1), y la primera observación de la posición O_B después de este momento se obtuvo en el momento T_B con discrepacia C_B (Fig. 186).

El ploteo inverso está fundamentado en la suposición que todos los factores, que provocaron la aparición de la discrepancia de la posición de estima se incrementa proporcionalmente con el tiempo, pasado después del momento precedente a la observación. Teniendo en cuenta que la fuente principal de los errores de estima son los errores en la consideración de la corriente, esta suposición generalmente se puede adoptar como real. Esto a su vez nos lleva a la deducción de que el aumento de la velocidad media de la discrepancia de estima con el tiempo es igual:

$$a_e = \frac{C_B}{T_B - T_1} \qquad (181)$$

Por lo tanto, se puede asumir que en el momento T_i la discrepancia tuvo una magnitud.

$$C_i = a_e(T_i - T_1)$$

ó

$$C_i = \frac{T_i - T_1}{T_B - T_1} C_B \qquad (182)$$

Trazando esta magnitud desde la posición de estima P_{ei} , que corresponde al momento Ti en la misma dirección que C_B, se puede asumir, que este momento el buque se encontraba realmente no en el punto

P_i, sino en el punto hallado por nosostros P'_i. Por supuesto, que este punto no se puede considerar absolutamente exacto, aunque cualquier error podría estar contenido en los puntos O_1 y O_B y en realidad la discrepancia podría aumentar no proporcionalmente con el tiempo, sino por cualquier otra ley, no obstante la exactitud obtenida del punto P_i' es superior a la exactitud de posición de estima Pe_i.

Ejemplo: Un buque realiza una travesia desde las 0800 del día 19/10/02 (punto A), recalando en el punto B, un día después. En los puntos antes mensionados se determina la posición del buque con exactitud (métodos costeros de observación). Al comienzo de la travesía no se consideró la corriente, observándose al finalizar la misma que había una discrepancia C_F = 110° - 3 millas (entre la posición de estima Pe_4 y la posición fija P_o).

Ejemplo

Hallar la trayectoria más probable que realizó el buque desde el punto A hasta el punto B.

Solución:

1. Calcular la discrepancia para las 1600, 2000, 0000 y 0800 en las posiciones de estima respectivamente (Pe_1, Pe_2, Pe_3 y Pe_4).

Aplicando la fórmula $C_i = C_F \dfrac{T_i - T_1}{T_B - T_1}$ obtenemos que:

a) Para Pe_1

$C_1 = 3\dfrac{1600-0800}{24} = 3\dfrac{3}{24} = \dfrac{24}{24} = 1MN;$ para Pe_2 $C_2 = 3\dfrac{2400-0800}{24} = 3\dfrac{12}{24} = \dfrac{36}{24} = 1{,}5MN;$

para Pe_3 $C_3 = 3\dfrac{2400-0800}{24} = 3\dfrac{16}{24} = \dfrac{48}{24} = 2MN.$

2. Trazar las discrepancias a partir de las posiciones de estima Pe_1, Pe_2 y Pe_3 obteniéndose las posiciones más probables (P'_1, P'_2 y P'_3), después se une todos los puntos mediante segmentos de rectas (línea discontinua) obteniéndiose la trayectoria más probable efectuada por el buque (Fig 187).

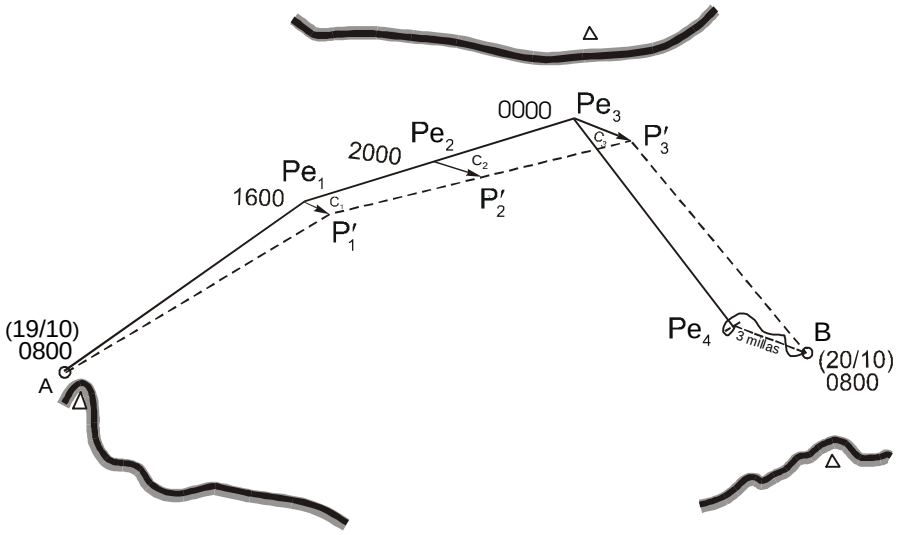


Fig. 187

Como conclusión señalaremos que la apreciación de la exactitud en la estima del buque que se debe abordar de forma reflexionada; los valores aproximados que se mensionaron anteriormente del error en el rumbo, en la corrección de la corredera, en el ángulo de abatimiento y los elementos de la corriente permiten solo aproximadamente valorar el error en la estima. Cada uno de estos errores dependen de una serie de causas y pueden alcanzar diferentes valores en las condiciones concretas de navegación.

CAPÍTULO VI

NAVEGACIÓN COSTERA

Capítulo VI

NAVEGACIÓN COSTERA

6. Necesidad del control de la estima

La estima se lleva por las indicaciones de los equipos principales del buque, como son: el compás y la corredera. Además en la estima se considera el abatimiento y la deriva . El ángulo de abatimiento se toma de tablas especiales y los datos sobre las corrientes se obtienen de las publicaciones náuticas.

En su trabajo los equipos de navegación presentan errores que se asumen como sus correcciones y que son conocidas por el navegante con determinado error.

De igual forma contienen errores el ángulo de abatimiento y los elementosde la corriente (dirección y velocidad) tomados de las publicaciones náuticas.

Como resultado de los errores en las correcciones de los equipos y en el ángulo de abatimiento y deriva, la derrota del buque se plotea con determinados errores, que son pequeños, pero que actúan durante largo tiempo y por eso la acción de ellos hace que el error en la posición constantemente se incremente y llegue a alcanzar grandes valores.

Cuando los errores en la posición son grandes no se garantiza la navegación segura ni se logran los objetivos planteados al buque.

Esto exige un control constante sobre la estima y la eliminación de errores en la posición del buque. El método más efectivo para el control de la estima es la determinación de la posición.

Cuando se navega cerca de las costas la posición se determina por los puntos de referencia costeros (puntos notables). Si por el contrario, se navega lejos de la costa, la posición se puede determinar con las ayudas electrónicas a la navegación o por observaciones a los astros.

6.1 Parámetros de navegación y sus líneas isométricas

En navegación se utilizan distintos puntos de referencia costeros para determinar la posición (faros, cayos, islas, montañas, etc), que aparecen en las cartas náuticas. Para determinar la posición por estos puntos de referencia, el navegante mide las siguientes magnitudes:

- La distancia hasta los puntos notables.

- Las marcaciones verdaderas (marcaciones inversas) hasta los puntos notables.

- Los ángulos horizontales entre los puntos notables.

- Los ángulos verticales de los puntos notables.

- La diferencia de distancia entre los puntos notables.

Las magnitudes que se miden para la determinación de la posición del buque se **llaman parámetros de navegación**. A cada parámetro de navegación medido le corresponde determinada línea isométrica.

1. Se denomina línea isométrica (isolínea) el lugar geométrico de puntos de iguales valores del parámetro de navegación, es decir que el buque en el momento de la medición de dicho paramétro, puede encontrarse en cualquiera de los puntos de la línea isométrica.

Las líneas isométricas pueden ser diversas de acuerdo al carácter del parámetro de navegación.

a) Línea isométrica al medir la distancia.

2. Cuando se miden distancias, la línea isométrica en la superficie de la Tierra es una **isoestadia esférica**, cuya distancia hasta el objeto desde cada punto, es igual a la distancia medida. En distancias pequeñas la isoestadia se convierte en un círculo menor, cuyo radio es igual a la distancia medida.

En una carta de navegación este círculo presenta deformaciones, sin embargo, éstas se pueden despreciar para pequeñas distancias hasta los objetos costeros y se puede considerar que el círculo menor es una circunferencia, cuyo centro es el objeto.

El radio de la circunferencia es la distancia medida. (Fig 188)

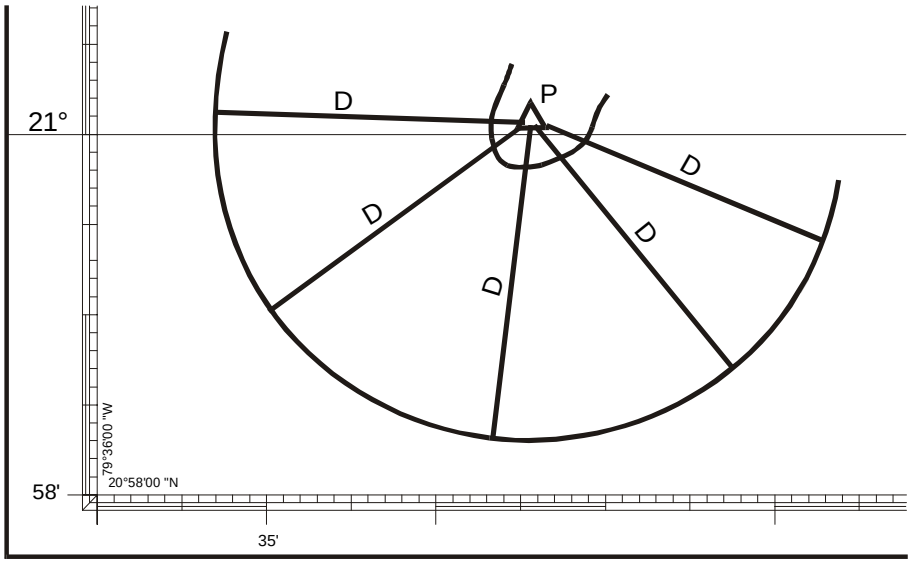


Fig. 188. Forma de la línea isométrica en la medición de distancias.

b) Línea isométrica de la marcación desde el buque al objeto.

La línea visual desde el ojo del observador hacia el objeto coincide con la línea de la menor distancia.Esta línea en la superficie de la Tierra es el arco de círculo máximo y se llama **ortodromía**. Por consiguiente la marcación verdadera (azimut) es el ángulo que se forma, en el lugar de la posición del buque, entre el meridiano verdadero y el arco de círculo máximo que pasa a través del buque y el objeto (Fig. 189).

Supongamos que en el punto B_1 se mide la marcación verdadera al objeto costero P_1 igual a M_v.

En la superficie de la Tierra pueden encontrarse los puntos B_1, B_2, B_3, B_4, etc, en los cuales la marcación verdadera es igual a la marcación M_v medida en el punto B_1. Si unimos estos puntos con una línea continua obtenemos una línea, en cuyos puntos la marcación verdadera es igual a la marcación medida al objeto. Esta línea se llama **isoazimut**.

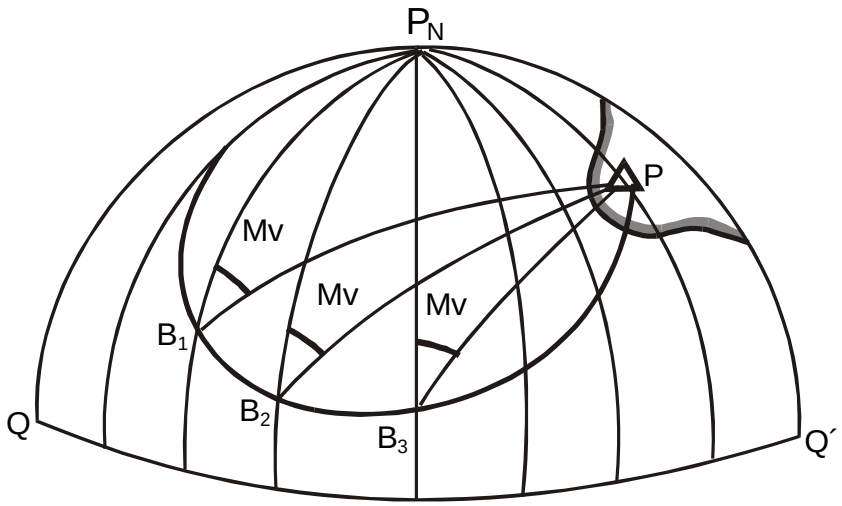


Fig. 189 Forma de la línea isométrica en la medición de marcaciones del buque al objeto costero

Esto significa que la línea isométrica en la medición de marcaciones verdaderas del buque al objeto costero es el isoazimut. En cada punto del isoazimut la marcación verdadera al objeto P será igual a la marcación medida, por consiguiente el buque puede encontrarse en cualquiera de estos puntos.

En la figura se observa que el isoazimut pasa por el objeto P y el Polo Norte P_N.

El isoazimut es una línea compleja con su convexidad dirigida hacia el ecuador, es decir, hacia el lado opuesto de la curvatura del arco de círculo máximo que es la ortodromia.

En la figura 189 se nota que el arco de círculo máximo y el isoazimut que por los puntos B_1, B_2 y B_3 se encuentran alejados uno del otro y no son simétricos.

Cuando se aproximan los puntos B al objeto, el isoazimut y la ortodromia se acercan y se hacen simétricos. El eje de semetría es la loxodromia (Fig. 190)

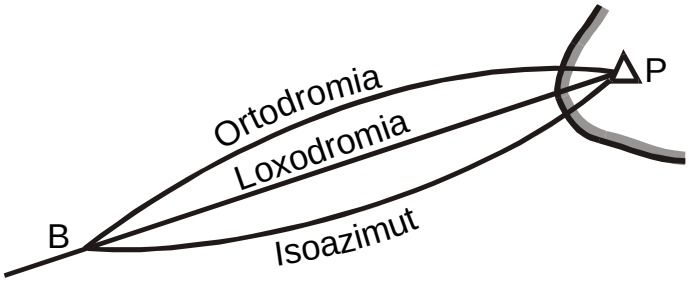


Fig. 190 Forma de la ortodromia, loxodromia e isoazimut en la carta náutica para pequeñas distancias entre el buque y el punto notable

Cuando la distancia entre el objeto y el buque es pequeña se puede considerar que la ortodromia y el isoazimut se acercan tanto que se confunden con la loxodromia, representándose por una línea recta. Resumiendo, en la carta la línea isométrica de la marcación, medida desde el buque hacia el objeto, es la loxodromia que es la línea recta que corta los meridianos con un ángulo igual a la marcación medida y pasa por el objeto (Fig. 191).

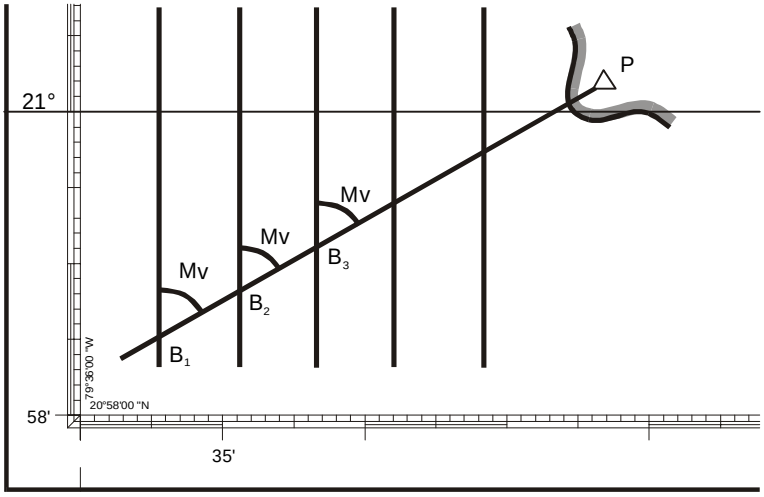


Fig.191 Forma de la línea isométrica para marcaciones medidas desde el buque hacia el objeto para distancias pequeñas entre ellos

Para distancias mayores entre el buque y el objeto, el isoazimut, la ortodromia y la loxodromia no coinciden.

c) Línea isométrica de la marcación (azimut), desde el punto de referencia hacia el buque.

Cuando se miden marcaciones desde el objeto hacia el buque la visual desde el ejo del observador también coincide con la línea de la menor distancia, que es la ortodromia.

El ángulo entre la mitad norte del meridiano verdadero y la ortodromia que pasa por la posición del buque (B) y el objeto P se denomina **marcación verdadera** (Fig.192).

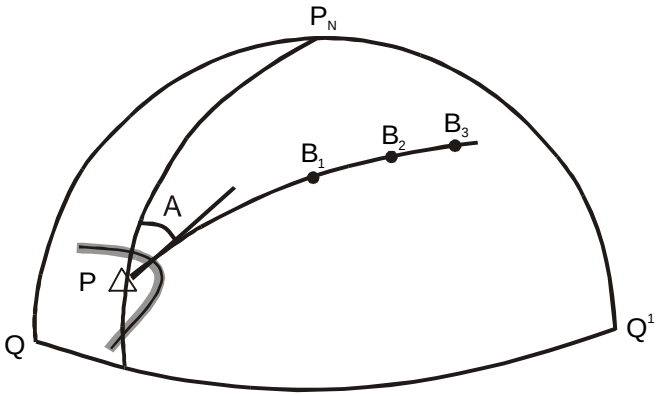


Fig. 192 Forma de la línea isométrica cuando se mide la marcación desde el buque

En la figura 192 se observa que en cualquier punto (B_2, B_3, B_4) de la ortodromia, que se encuentre el buque, éste se observará desde el punto P con el mismo ángulo, igual a la marcación madida A.

Por lo tanto al medir la marcación del objeto al buque, la línea isométrica es el arco del círculo máximo u ortodromia, que pasa por la posición del buque y el objeto.

En la carta náutica el arco de círculo máximo (ortodromia) se representa por una curva con su concavidad dirigida hacia el polo (Fig. 193).

Para cualquier punto de esta ortodromia (B_2, B_3, B_4) la marcación del objeto al buque será igual a A. Si trazamos en la carta la loxodromia, que une los puntos P y B observaremos que ésta y la ortodromia en sus partes centrales divergen en una distancia considerable.

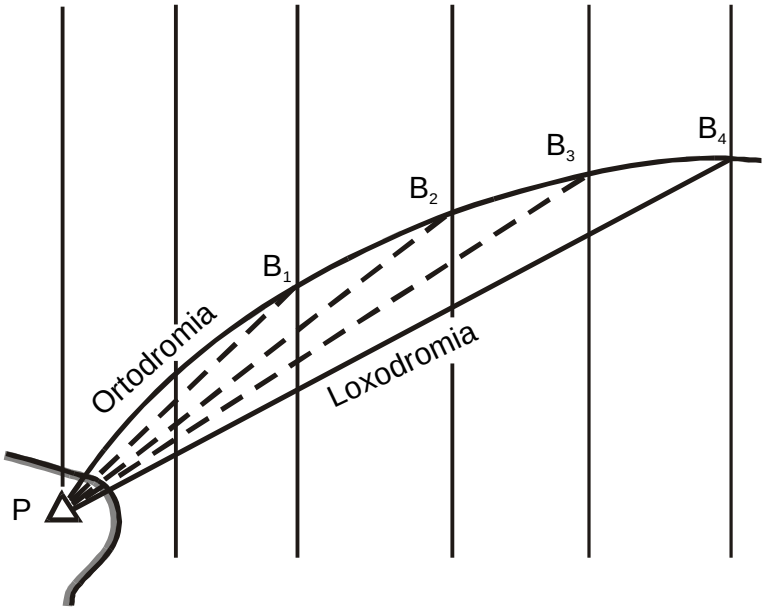


Fig. 193. Sobre el acercamiento de la loxodromia y la ortodromia cuando la distancia disminuye.

Cuando disminuye la distancia entre el punto P y la posición del buque B la loxodromia y la ortodromia se acercan. Para pequeñas distancias se puede considerar que la ortodromia y la loxodromia se unen. Ya que en la carta la loxodromia se representa por una línea recta, entonces la línea isométrica de la marcación medida desde el obejto al buque será igualmente una línea recta. Esta línea en cualquier punto (B_2, B_3, B_4) forma con los meridianos ángulos iguales a la marcaciuón medida.

De esta forma, en cualquier punto de la loxodromia que se encuentre el buque se observan desde el objeto P siempre con el mismo ángulo A (Fig. 194).

e) Línea isométrica correspondiente a la diferencia de distancias

Cuando se miden diferencias de distanmcias entre los objetos costeros la línea isométrica es una hipérbola (Fig. 196)

La hipérbola es una línea curva, donde en cada uno de los puntos la diferencia de distancia hasta dos puntos notables A y B es una magnitud constante.

$$D_A - D_B = \Delta D = \text{Const.}$$

Los objetos A y B, hasta los cuales se mide la diferencia de distancia son los focos de la hipérbola.

En las cartas náuticas estas líneas isométricas se representan también en forma de hipérbolas.

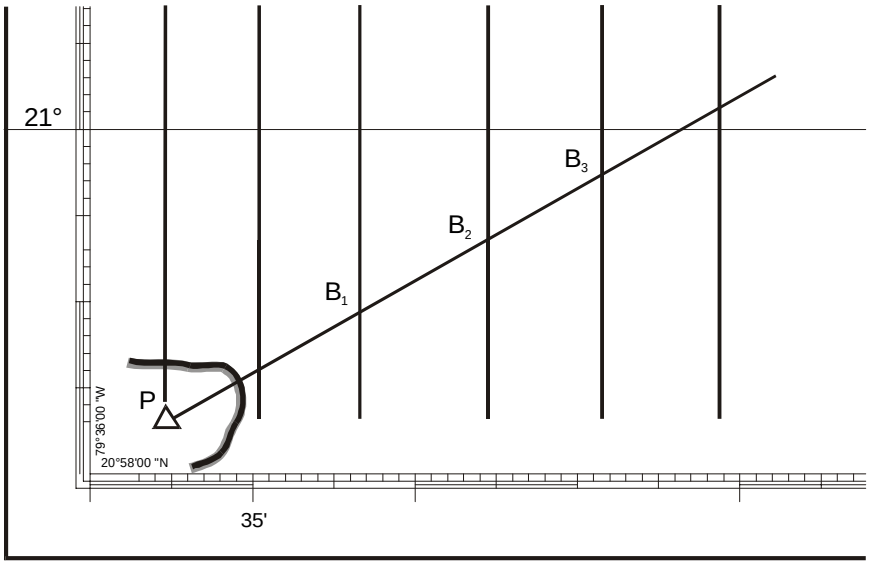


Fig. 194 Representación de la línea isométrica durante la medición de la marcación desde la costa al buque en distancias pequeñas

d) Línea isométrica correspondiente al ángulo horizontal entre los objetos

Cuando se mide el ángulo horizontal entre dos objetos costeros la línea isométrica correspondiente a la superficie de la Tierra es una **isógona esférica,** que es la línea que une los vértices de los ángulos esféricos iguales. En cualquier punto de la isógona esférica que se encuentre el buque, el ángulo entre los objetos costeros será el mismo.

La isógona esférica es una línea compleja que pasa por la posición del buque y el objeto.

A pequeñas distancias de los objetos, entre los cuales se mide el ángulo horizontal, la isógona esférica se convierte en un círculo menor.

El círculo menor se representa en la carta náutica por una circunferencia que pasa por los objetos y comprende el ángulo medido α (Fig. 195).

Por consiguiente la línea isométrica del ángulo horizontal medido se representa por una circunferencia.

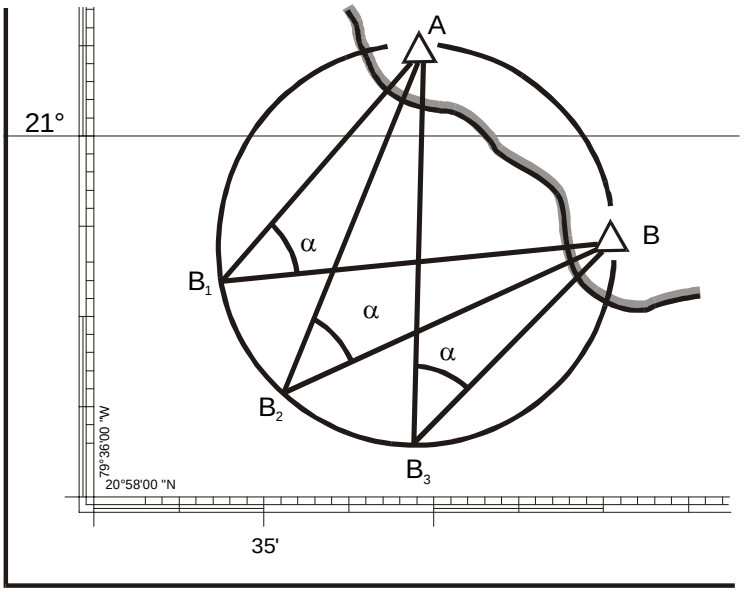


Fig. 195 Forma de la línea isométrica correspondiente el ángulo horizontal

En las cartas náuticas estas líneas isométricas se representan también en forma de hipérbolas.

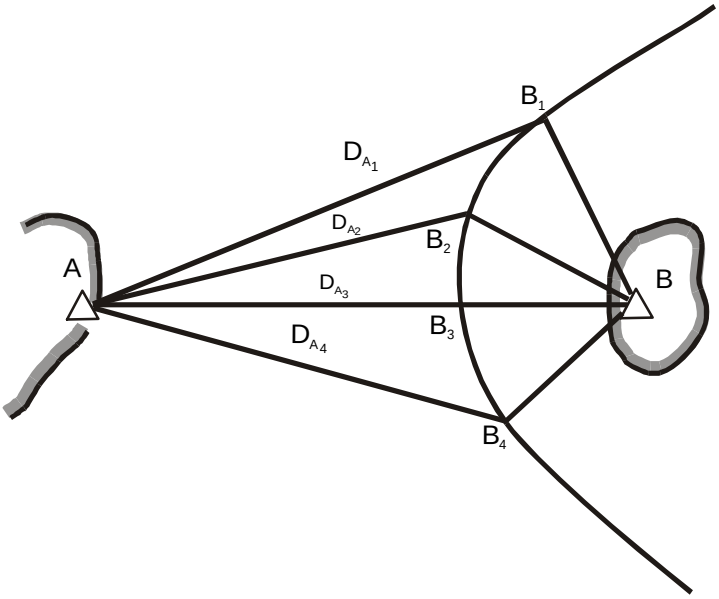


Fig. 196 Forma de la isolínea para la diferencia de distancias

6.2 Fundamentos de la determinación de la posición del buque

A cada medición del parámetro de navegación le corresponde su línea isométrica, que es la línea en la cual se encuentra el buque en el momento de la medición.

Para la determinación de la posición del buque es necesario tener dos líneas isométricas. Estas líneas isométricas se obtienen midiendo dos o más parámetros de navegación al mismo tiempo.

Las líneas isométricas obtenidas como resultado de la medición de los parámetros de navegación se plotean en la carta. La posición del buque estará en el punto de intersección de estas líneas.

La posición del buque obtenida por la observación de los objetos costeros se llama **posición fija**. En la carta esta posición se representa por un círculo pequeño de 1 - 2 mm de diámetro.

La divergencia entre la posición fija y la posición de estima se llama **discrepancia**. En la carta la discrepancia se representa por una línea ondulada (Fig. 197).

En el cuaderno de guardia de navegación se anota la dirección y magnitud de la discrepancia.

Se entiende por dirección de la discrepancia a la dirección medida desde la posición de estima hasta la posición fija. La magnitud de la discrepancia es la distancia entre ambas posiciones.

La discrepancia mostrada en la figura 197 se anotará en el cuaderno de guardias de navegación de la siguiente forma:

C = 060° - 0,4 millas.

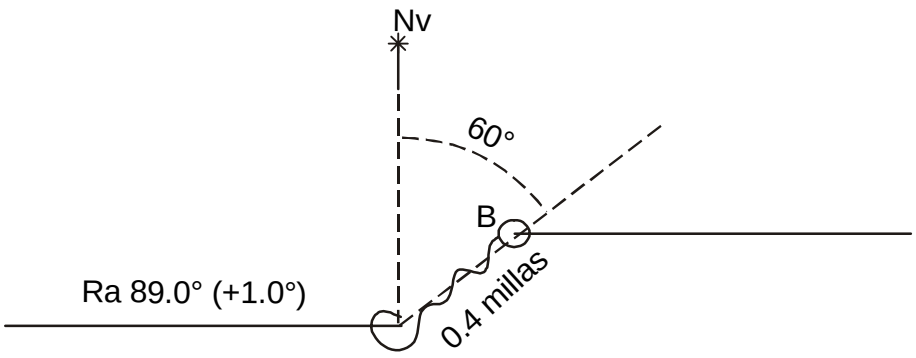


Fig. 197 Representación de la discrepancia en la carta

6.3 Determinación de la posición del buque por dos ángulos horizontales

1. Esencia del método

Para la determinación de la posición del buque por dos ángulos horizontales es necesario tener tres objetos costeros a la vista, y que aparezcan en la carta (Fig. 198).

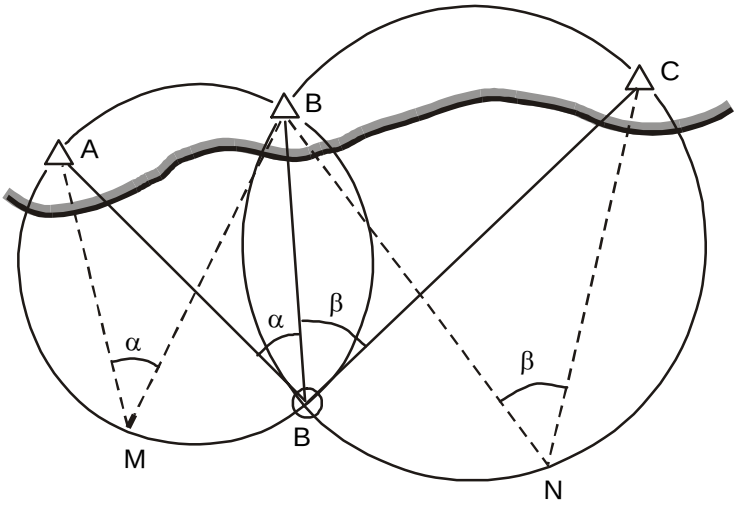


Fig. 198 Esencia del método de determinación de la posición por dos ángulos horizontales

En el buque se miden dos ángulos horizontales al mismo tiempo entre los objetos.

α - entre los objetos A y B

β - entre los objetos B y C

Los ángulos horizontales medidos son parámetros de navegación a los que corresponden líneas isométricas en forma de circunferencia.

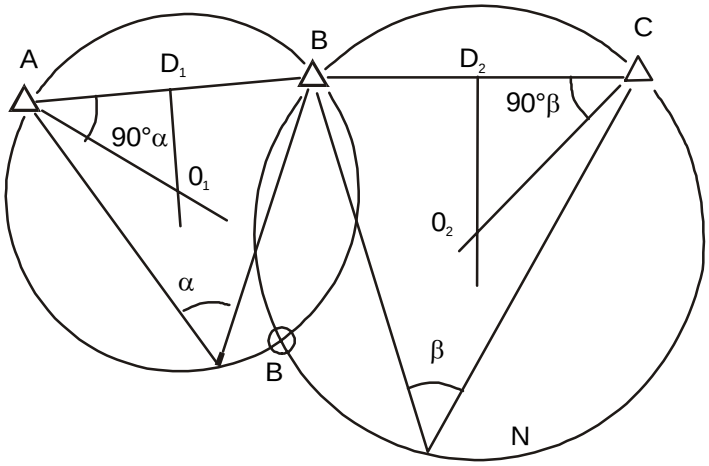


Fig. 199 Determinación de la posición del buque por dos ángulos horizontales

Al ángulo medido α corresponde una circunferencia que pasa por los puntos notables A y B y que comprende el ángulo α. En el momento de la medición del ángul, el buque se encuentra en esta circunsferencia.

Al ángulo medido β corresponde una circunferencia que pasa por los objetos B y C que comprende el ángulo β. En el momento de la medición de este ángulo el buque se encuentra en esta circunferencia. La posición del buque en dos circunferencias a un mismo tiempo sólo es posible en un punto común para ambas, es decir, en el punto de intersección B.

De esta forma el punto B será la posición del buque en el momento de medición de los ángulos α y β.

El otro punto de intersección de las circunferencias que comprenden los ángulos α y β no pueden estar la posición del buque, puesto que coincide con la posición del punto notable B que se encuentra en la costa.

Los ángulos α y β medidos para la determinación de la posición del buque se miden con gran exactitud con ayuda de instrumentos especiales para la medición de ángulo: el sextantes.

En casos especiales estos ángulos pueden ser calculados como la diferencia de las marcaciones medidas:

$$\alpha = Mv_B - Mv_A = Mam_B - Mam_A$$
$$\beta = Mv_C - Mv_B = Mam_C - Mam_B \qquad (183)$$

2. Métodos de obtención de la posición en la carta

Cuando se determina la posición por dos ángulos horizontales la posición del buque es el punto de intersección de dos circunferencias, que comprenden los ángulos medidos. Para encontrar estos puntos se utilizan varios métodos.

a) Determinación de la posición mediante la construcción gráfica de las circunferencias

Supongamos que para la determinación de la posición del buque fueron medidos dos ángulos horizontales:

α - ángulo entre los objetos A y B;
β - ángulo entre los objetos B y C.

Para la construcción de la circunferencia que comprende el ángulo α, la posición de los objetos A y B se unen con una línea recta. El segmento AB obtenido se divide en dos partes iguales y a través del punto D se traza una perpendicular hacia el lado de la posición del buque.

Desde el punto A y en un ángulo de 90°- α con relación al segmento AB, se traza una línea hasta su intersección con la perpendicular en el punto 0_1, que es el centro de la circunferencia que comprende el ángulo α. El radio de esta circunferencia es igual a 0_1A (0_1B). Con el radio señalado, desde el centro 0_1, se traza una circunferencia, que pase por los objetos A y B y que sera la línea isométrica que corresponde al ángulo medido α.

De la misma forma se procede para la determinación del centro 0_2 de la circunferencia que comprende el ángulo β. El radio de esta circunferencia será el segmento 0_2 C (0_2B). La posición del buque estará en el punto de intersección B de las circunferencias, (Fig.199)

b) Obtención de la posición con ayuda del transportador de tres brazos o papel de calcar.

Cuando se termina la posición del buque por dos ángulos horizontales esta posición es el punto de intersección de las circunferencias que comprenden los ángulos α y β medidos. Al mismo tiempo este punto es el vértice común de los ángulos que poseen además un lado común, que pasa a través del objeto intermedio (Fig. 200).

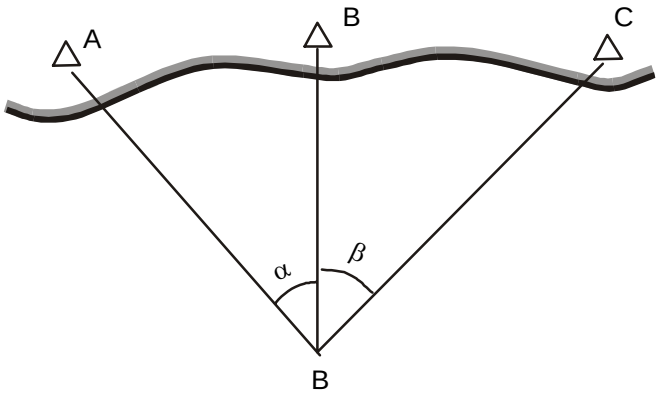


Fig. 200 Determinación de la posición del buque por dos ángulos horizontales

Por consiguiente, para la determinación de la posición por dos ángulos horizontales es suficiente encontrar en la carta, el punto que corresponde al vértice común de los ángulos medidos.

Esta tarea se resuelve con ayuda del transportador de tres brazos o transportador de uso múltiple (Cap.V / 5.6).

El transportador de tres brazos es un instrumento especial, con cuya ayuda se pueden construir dos ángulos con un vértice común en el centro del transportador. transportador está compuesto por un círculo azimutal dividido en grados de 0° a 180° hacia la derecha e izquierda y por tres reglas (Fig. 201). La regla central está fijada al círculo azimutal y es inmóvil. El borde de esta regla coincide exactamente con la división 0° del círculo azimutal. Las reglas laterales son móviles. Estas se pueden colocar bajo cualquier ángulo con relación al borde de la regla central con ayuda de los indicadores en las reglas móviles y los tambores de lectura, los ángulos se pueden colocar con una exactitud de 0,5'.

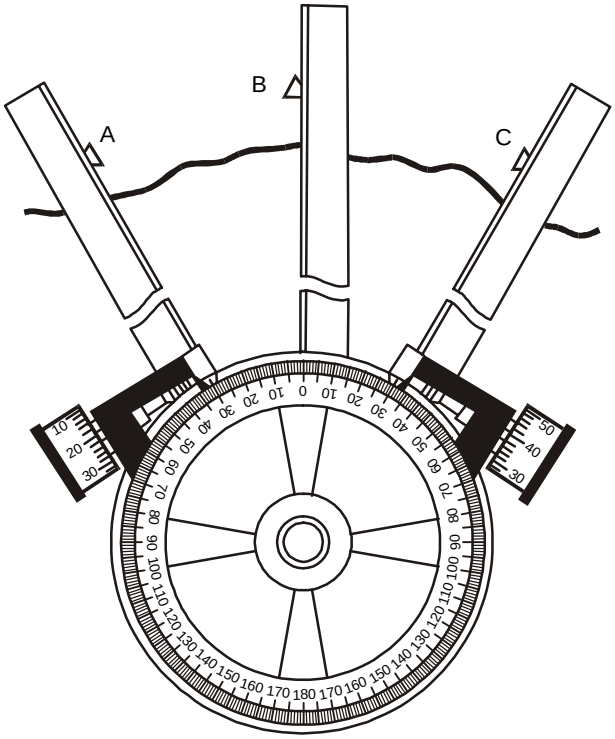


Fig. 201 Transportador de tres brazos

Para obtener la posición fija, en el transportador de tres brazos se colocan los ángulos α y β entre los objetos.

El transportador se coloca en la carta de tal forma que los bordes de las tres reglas pasen a través de los centros de los objetos A, B y B (Fig. 201). En el centro del transportador se encontrará la posición fija del buque B, que se señala en la carta por una marca hecha con la aguja del transportador.

En aquellos casos cuando en la determinación de la posición del buque por dos ángulos horizontales no se exige gran exactitud, para obtener la posición del buque en la carta, en lugar de utilizar el transportador de tres brazos se utiliza papel de calcar.

En el papel, en el centro de la hoja se traza una línea recta arbitraria, que se toma como lado común de los ángulos medidos (Fig. 202). En la recta se señala un punto arbitrario B que se toma como vértice común de los ángulos.

A partir de este punto se procede a construir los ángulos α y β medidos.

Para determinar la posición, el papel se coloca de tal forma en la carta, que las líneas trazadas que representan los lados de los ángulos coincidan con los objetos A, B y C. En el punto b se encontrará la posición del buque y se señala en la carta por una marca con el compás.

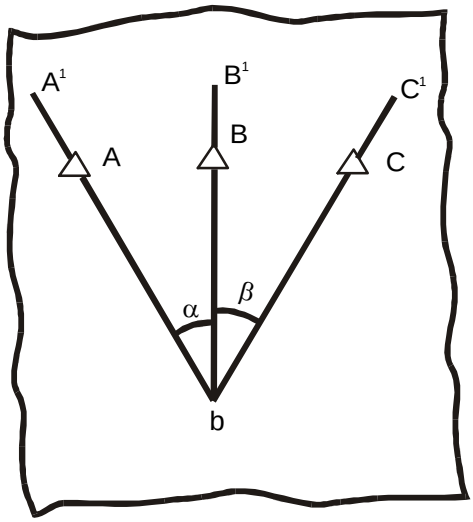


Fig. 202 Determinación de la posición con ayuda del papel de calcar

3. Caso indefinido

Cuando se determina la posición del buque por dos ángulos horizontales puede aparecer un caso indefinido, ante el cual es imposible determinar la posición. El caso indefinido aparece cuando el buque se encuentra en la circunferencia que pasa por los tres objetos, entre los que se midieron los ángulos horizontales.

Supongamos que para determinar la posición del buque por dos ángulos horizontales fueron elegidos tres objetos A, B y C. Los objetos no se encuentran en línea recta y a través de ellos tres puede trazarse una sola circunferencia (Fig. 203)

Si el buque se encuentra en esta misma circunferencia por ejemplo en el punto B, entonces para la determinación de la posición serán medidos los ángulos horizontales: α - entre los objetos A y B y β entre los objetos B y C.

Pero el punto B_o no es el único punto donde los ángulos entre los objetos serán iguales a los ángulos medidos. Estos mismos ángulos se encontrarán en los puntos B_1, B_2, B_3 y en cualquier otro punto, que se encuentre en esta circunferencia.

De esta forma al medir los ángulos α y β en el punto B_o se puede obtener la posición con ayuda del transportador o el papel de calcar, en cualquier punto de esta circunferencia, es decir, la posición del buque se hace indefinida. La presencia del caso indefinido exige una comprobación preliminar de la posibilidad de determinar la posición del buque por dos ángulos horizontales.

Uno de los indicios del caso indefinido en la determinación de la posición del buque por dos ángulos horizontales es la suma de los ángulos α, β y ω. Si $\alpha+\beta+\omega = 180°$, entonces existe el caso indefinido y no se puede determinar la posición del buque.

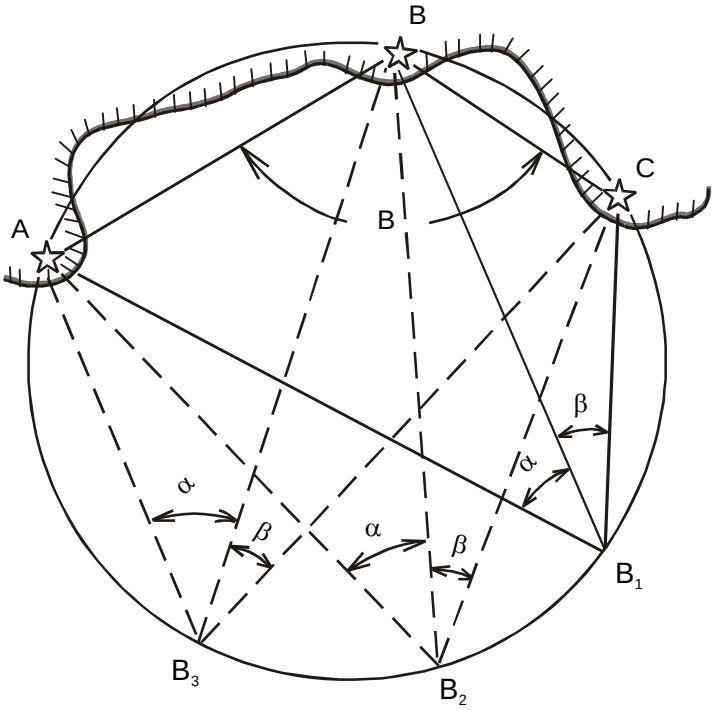


Fig. 203 Caso indefinido en la determinación de la posición por dos ángulos horizontales

De geometría se conoce que la suma de los ángulos opuestos, de un cuadrilátero, es igual a 180°. Por consiguiente si la suma de los ángulos opuestos de un cuadrilátero es igual a 180°, entonces el cuadrilátero está inscrito en una circunferencia, es decir el punto B se encuentra en una circunferencia que pasa por los tres objetos.

Para evitar el caso indefinido es necesario elegir tales objetos para la determinación de la posición del buque, cuya distribución elimine el caso indefinido.

1. Los tres objetos deben estar en una línea recta (Fig. 204). En este caso no puede existir el caso indefinido, ya que por los tres objetos no puede pasar una circunferencia.

2. Los tres objetos, entre los cuales se midieron los ángulos, forman un triángulo, y en cuyo interior se encuentra el buque.

3. Los tres objetos se encuentran a una misma distancia del buque. En este caso el buque no puede estar en la circunferencia que pasa por los tres objetos, sino que está en el centro de ella.

4. De los tres objetos elegidos, el del medio está más cerca del buque que los objetos laterales. Ante tal distribución de ésta, el buque no puede encontrarse en la circunferencia que pasa por ellos.

5. Dos de los objetos que se encuentra en la costa formando una línea recta con el buque y el tercero se encuentra a un lado. En este caso uno de los ángulos medidos es igual a 0°.

4. Procedimiento práctico del método

Para determinar la posición del buque por dos ángulos horizontales se realiza una serie de operaciones en determinada secuencia.

1. Se prepara el sextante para las observaciones, se realizan las comprobaciones necesarias y se determina el error de índice. si este error es grande es necesario disminuirlo. El error de índice menor de 1' puede ser despreciado.

Se selecciona los puntos notables que tengan buena visibilidad desde el buque y que aparezcan en la carta con tal distribución que elimine la posibilidad del caso indefinido.

Si es posible el caso indefinido, entonces es necesario realizar la comprobación preliminar y cerciorarse que $\alpha+\beta + \omega = 180°$.

3. Se miden los ángulos entre los objetos.

Si los ángulos son medidos por dos observadores, las mediciones deben realizarse a un mismo tiempo. Los observadores se colocan uno al lado del otro y dirigen el telescopio del sextante al objeto izquierdo y desplazando la alidada llevan al campo visual del telescopio el objeto derecho y con el tambor micrométrico hacen coincidir las imágenes de los objetos. Por la orden listo, de uno de los observadores, ambos hacen coincidir los objetos en el centro del campo visual de los telescopios y los mantienen en coincidencia con ayuda del tornillo micrométrico. Cuando se da la orden se realiza la lectura de los ángulos medidos. En este mismo momento se anota la hora T y la lectura Lc de la corredera.

Los ángulos medidos deben ser corregidos con la corrección de índice.

Si el observador es uno sólo y la velocidad del buque es grande (más de 12 nudos), entonce se debe llevar los ángulos medidos a un mismo momento de observación. Para ello inicialmente se mide el ángulo α, luego el ángulo β y por último el ángulo α_2.

En el momento de medición del ángulo β se anota la hora T y la lectura de la corredera Lc. Para la determinación de la posición se utiliza el ángulo B medido y el ángulo:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}$$

Calculado los ángulos α y β se corrigen por la corrección de índice.

4. Los ángulos medidos se colocan en el transportador y este último se sitúa en la carta de tal forma, que los bordes de las tres reglas coincidan con el centro de los tres objetos, entre los cuales fueron medidos los ángulos. En el centro del transportador se encontrará la posición del buque,. Si no se exige gran exactitud en la determinación de la posición puede ser utilizado el papel de calcar.

5. Se realiza la construcción gráfica en la carta (Fig. 205).

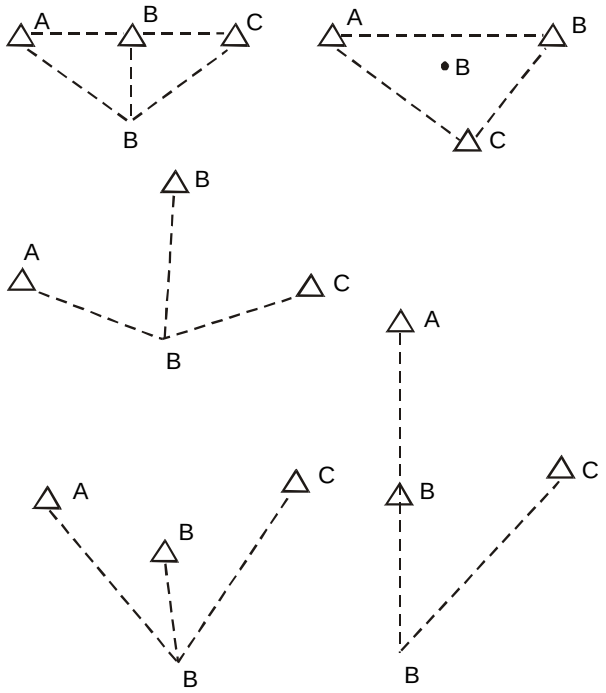


Fig. 204 Distribución de los objetos para evitar el caso indefinido

6. Se hacen las anotaciones en la hoja derecha del cuaderno de guardias de navegación.

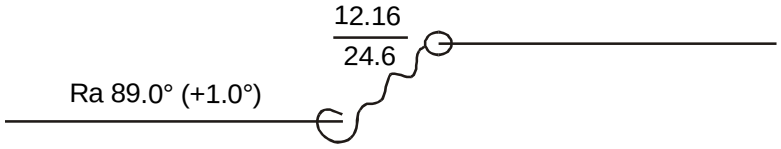


Fig.205. Forma de la derrota en la carta

6.4 Determinación de la posición por dos marcaciones

1. Esencia del método

Para la determinación de la posición del buque por este método es necesario tener dos objetos visibles desde el buque y que aparezcan en la carta.

En el buque se toman las dos marcaciones a los objetos, a cada una de las cuales corresponde una línea isométrica. Ya que la medición de las marcaciones se realiza a pequeñas distancias entre el buque y los objetos , las líneas isométricas será líneas rectas y pasarán por el objeto que se le toma la marcación. Para la obtención de la posición en la carta se plotean las líneas de las marcaciones y el punto donde se interceptan sera la posición B buscada (Fig. 206).

Las marcaciones a los objetos se miden con ayuda de la alidada en el repetidor del girocompás, o sea, que se miden las marcaciones agujas. Para plotear las marcaciones es necesario llevarlas a verdaderas:

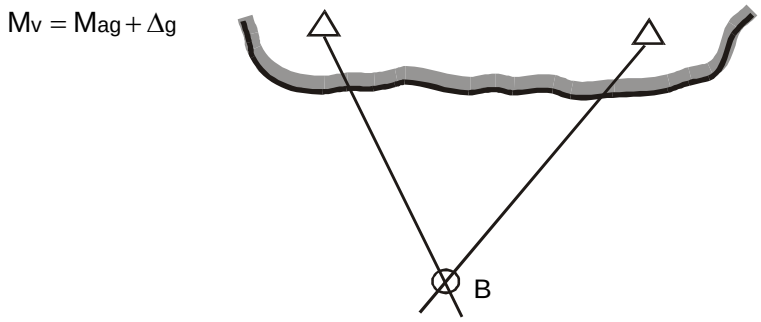


Fig. 206 Determinación de la posición por dos marcaciones

Para la medición de las marcaciones con ayuda del compás magnético se obtienen las marcaciones agujas inversas de los objetos. Después de ser corregidas se obtienen las marcaciones verdaderas inversas que se plotean desde el objeto:

MvI = MamI + CT

Para obtener una buena exactitud, se elige los objetos de tal forma que el ángulo entre las marcaciones sea mayor de 30° y menor de 150°.

2. Orden para medir las marcaciones

Para determinar la posición del buque son necesarias marcaciones a dos objetos costeros medidas a un mismo tiempo. En realidad las marcaciones se miden sucesivamente, una después de la otra o sea no son simultáneas.

Esto significa que las marcaciones se miden desde diferentes posiciones del buque.

El punto de intersección de las líneas isométricas en este caso no corresponde a la posición del buque.

Supongamos que el buque navega cerca de la costa. La posición del buque se conoce exactamente (Fig. 207).

Para obterner la posición se toman marcaciones a los objetos A y B. En el momento cuando el buque se encuentra en el punto M se toma la marcación al objeto A. La marcación al objeto B se tomó sólo dentro de determinado intervalo de tiempo, cuando el buque se encuentra en el punto N.

Ya que las posiciones del buque en el momento de medición de las marcaciones se conocían exactamente, la marcación del objeto A debe pasar por el punto M y la marcación del objeto B por el punto N.

La intersección de las marcaciones da el punto B, que sería la posición del buque. En realidad el buque se encuentra en el punto N.

De esta forma en la posición del buque habrá un error Δ = BN.

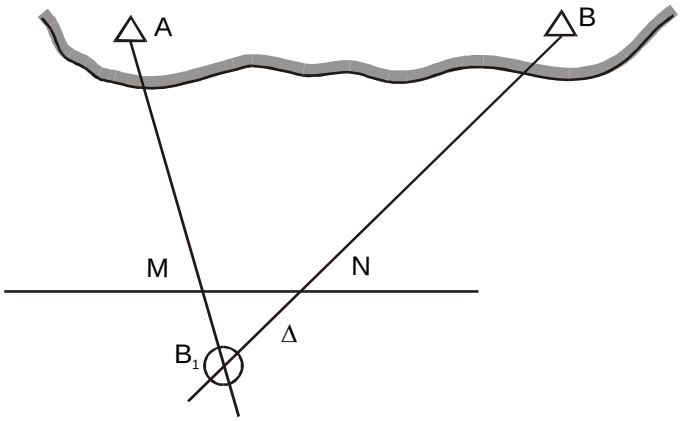


Fig. 207 Error en la posición por la medición no simultánea de las marcaciones

La magnitud del error de la posición dependerá del espacio MN que el buque recorre en el tiempo que transcurre desde el momento que se midió la primera marcación hasta el momento que se midió la segunda. Cuanto mayor sea el espacio, mayor será el error de la posición obtenida. Cuando la velocidad del buque es pequeña y las marcaciones se miden rápidamente, el espacio MN es pequeño y el error en la posición del buque es insignificante. La magnitud de este error depende también del orden en que se midieron las marcaciones, de qué marcación fue la primera y cuál la segunda. De esto es fácil cerciorarse. Supongamos que en el punto M se midió la marcación al objeto A y en el punto N la marcación del objeto B. Figura 208

En este caso al plotear las marcaciones obtenemos la posición del buque en el punto B_1 con un error

$\Delta_1 = B_1N$.

Si variamos el orden de las marcaciones la posición se obtiene en el punto B_2 con un error $\Delta_2 = B_2N$.

Es fácil comprobar que el error en la primera posición es mayor que el error en la segunda, es decir $\Delta_1 > \Delta_2$

Del triángulo K_1MN; se puede plantear que:

$$\frac{\Delta S}{\Delta_1} = \frac{sen\,\omega_1}{\text{sen}(180° - q_1)}$$

puesto que $\text{sen}(180° - q_1) = \text{sen}q_1$

entonces,

$$\frac{\Delta S}{\Delta_1} = \frac{\text{sen}\,\omega_1}{\text{sen}q_1} \qquad \text{(a)} \qquad (184)$$

Del triángulo B_2MN obtenemos:

$$\frac{\Delta S}{\Delta_2} = \frac{\text{sen}\omega_2}{\text{sen}q_2} \qquad \text{(b)} \qquad (185)$$

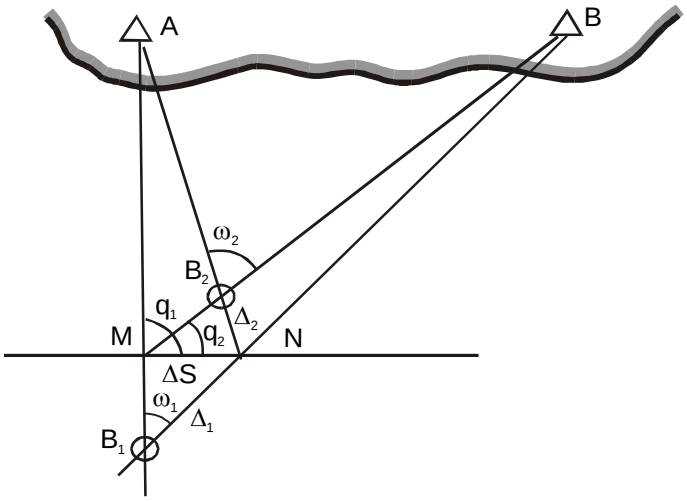


Fig. 208 Dependencia de la magnitud del error en la posición debido al orden de la toma de marcaciones

En las expresiones obtenidas los ángulos ω_1 y ω_2 entre las marcaciones no diferencian uno de la otro considerablemente, por eso se puede asumir que:

$$\text{sen}\omega_1 = \text{sen}\omega_2$$

Dividiendo la igualdad (a) entre la igualdad (b) obtenemos:

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \frac{\text{sen}q_2}{\text{sen}q_1} \qquad (186)$$

El análisis de la expresión (186) permite llegar a la conclusión que el error en la posición del buque determinada por marcaciones a dos objetos costeros es menor si primero se toma la marcación al objeto, para el cual sen q es menor. Esto significa que es necesario tomar primero la marcación a aquel objeto cuya marcación relativa esté más próxima a 0° ó 180° y después al objeto donde su marcación relativa se aproxime a 90°

En todos los casos se debe observar la siguiente regla: tomar la marcación a aquel objeto cuya variación sea la más lenta.

De noche, cuando se toman marcaciones a las luces, este orden puede ser violado. Aquí se toma primero la marcación a aquel objeto cuya luz se observa con más dificultad.

3. Reducción de las marcaciones a un mismo punto de observación

Los errores Δ_1 y Δ_2 observados anteriormente en la posición surgen debido a que las marcaciones a los objetos costeros se tomaron desde diferentes puntos.

Manteniendo determinado orden para la toma de marcaciones se puede disminuir la magnitud del error, pero totalmente no se puede eliminar.

Para eliminar el error que surge por la medición no simultánea de las marcaciones en el buque en movimiento, es necesario llevar las marcaciones a un mismo instante. Esta tarea se resuelve por dos métodos:

a) Método analítico de reducción de las marcaciones a un punto de observación.

Para reducir las marcaciones a un punto de observación se utiliza una metodología especial para la toma de las marcaciones. Cuando se determina la posición por dos objetos se miden tres marcaciones. Primero se toma una marcación al primer punto de referencia B - Mv_{B1}- luego se toma una marcación al segundo objeto de referencia A - Mv_A y por último se toma nuevamente una marcación al objeto de referencia B - Mv_{B2}. En el momento cuando se mide la marcación al objeto A se anota la hora T y lectura de la corredera Lc.

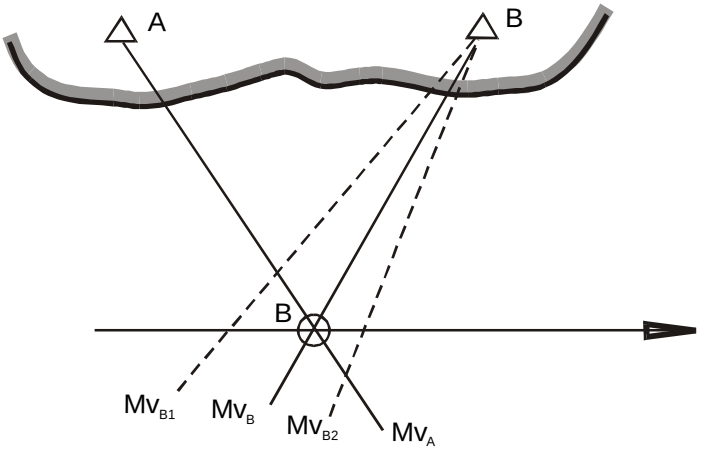


Fig. 209 Método analítico de reducción de las marcaciones a un punto de observación

Para el ploteo de las marcaciones en la carta se calcula.

- La marcación verdadera al segundo objeto Mv_A:

$$Mv_A = Mag_A + \Delta g$$

- El valor medio de la marcación al primer objeto Mv_B:

$$Mv = \frac{Mag_1 + Mag_2}{2} + \Delta g \qquad (187)$$

En el punto de intersección de las marcaciones verdaderas Mv_A y Mv_B se encontrará el buque (Fig. 209).

b) Método gráfico de reducción de las marcaciones a un punto de observación.

Cuando se toman las marcaciones con ayuda de un cronógrafo se mide el tiempo Δt que transcurre desde el momento que se tomó la primera marcación hasta que se tomó la segunda. Se calcula el espacio:

$\Delta S = V\Delta t$ que recorrió el buque en este tiempo.

Desde la posición del primer punto de referencia se plotea una linea paralela al rumbo verdadero del buque, sobre esta línea se toma el espacio ΔS.

Desde el extremo del segmento ΔS (punto A') se plotea la primera marcación verdadera medida. La segunda marcación verdadera se plotea desde la posición del segundo punto de referencia.

En el punto de intersección de las marcaciones verdaderas trazada se obtiene la posición del buque B (Fig. 210).

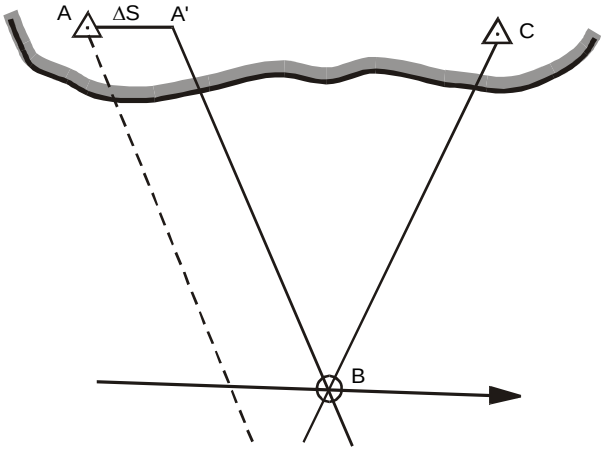


Fig. 210 Método gráfico de reducción de las marcaciones a un punto de observación

4. Procedimiento práctico del método

1. Se eligen dos objetos con buena visibilidad que aparezcan en la carta y se anota el orden para la toma de las marcaciones.

2. En el menor tiempo posible y en el orden señalado se toman las marcaciones agujas a los objetos Mag_A y Mag_A . Se anota la hora y la lectura de la corredera Lc. Si es necesario reducir las marcaciones a un punto de observación entonces se mide otra marcaión M_{VA} al primer objeto.

3. Se calculan las marcaciones verdaderas a los objetos.

$$M_{VA} = Mag_A + \Delta g;$$

$$M_{VA} = Mag_A + \Delta g;$$

Si se reducen las marcaciones a un mismo instante, entonces la marcación Mag_A se calcula por la fórmula:

$$Mag_A = \frac{Mag_{A_1} + Mag_{A_2}}{2}$$

4. Las marcaciones verdaderas de los objetos se plotean de tal forma que la marcación Mv_A pase por el objeto A y la marcación Mv_B por el objeto B.

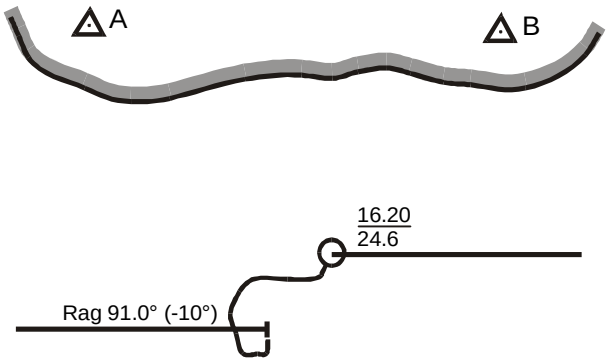


Fig. 211 Confección de la derrota en la carta

5. Se realizan las construcciones gráficas y anotaciones en la carta y en el cuaderno de guardias de navegación (Fig. 211).

16	20	Lc=24,6 Faro Colorado - 320,0°, Faro Verde
-	-	28,0°, Δg =1,0° C=35°- 0,6 millas

La determinación de la posición del buque por dos marcaciones, es uno de los métodos más simples y garantiza buena exactitud.

Su desventaja consiste en que no existe control para la posición obtenida. Si al tomar o plotear las marcaciones surge determinado error, es imposible detectarlo, ya que dos línea de posición siempre se cortan en un punto

.6.5 Determinación de la posición del buque por tres marcaciones.

Para determinar la posición por este método es necesario tener en la carta tres puntos notables visibles desde el buque.

El observador toma las marcaciones agujas a tres puntos notables los cuales se les aplican la corrección del compás.

$$Mag_A + \Delta g = Mv_A;$$
$$Mag_B + \Delta g = Mv_B;$$
$$Mag_C + \Delta g = Mv_C.$$

Estas marcaciones verdaderas se plotean en la carta de tal forma, que la línea de las marcaciones pasa por los tres puntos notables en la carta (Fig. 212).

En el punto de intersección de las marcaciones se obtiene la posición del buque (B).

Si en el ploteo las marcaciones se cortan en un punto o forman un triángulo pequeño, se puede considerar que la posición obtenida es correcta.

Para elevar la exactitud en la determinación de la posición es necesario seleccionar objetos de tal forma, que los ángulos entre las marcaciones no sean menores de 30° ni mayores de 150°.

Es importante también observar el orden de las marcaciones:

Primero se toma la marcación a aquel objeto, cuya marcación varía lentamente. La última marcación se toma al objeto, cuya marcación varía con más rapidez.

En sintesis en primer lugar se toman las marcaciones a los objetos o puntos notables que están más a proa y por último al objeto que se encuentra en el través o próximo a éste. Para garantizar la simultaniedad, las tres marcaciones se deben tomar en un intervalo de tiempo de 20 segundos.

Cuando se determina la posición a grandes velocidades es necesario reducir las marcaciones a un mismo instante de observación (Fig. 213).

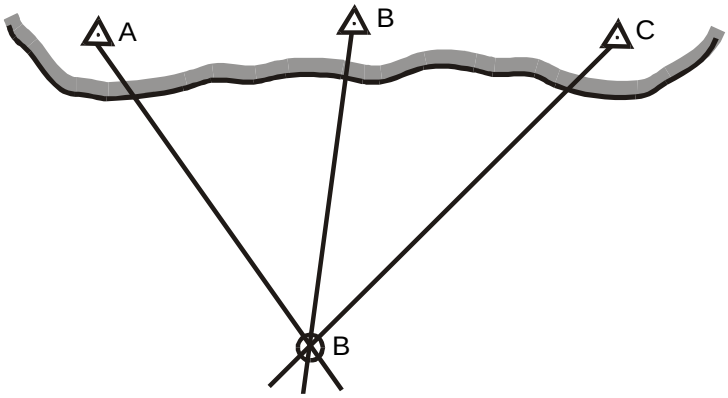


Fig. 212 Determinación de la posición del buque por tres marcaciones

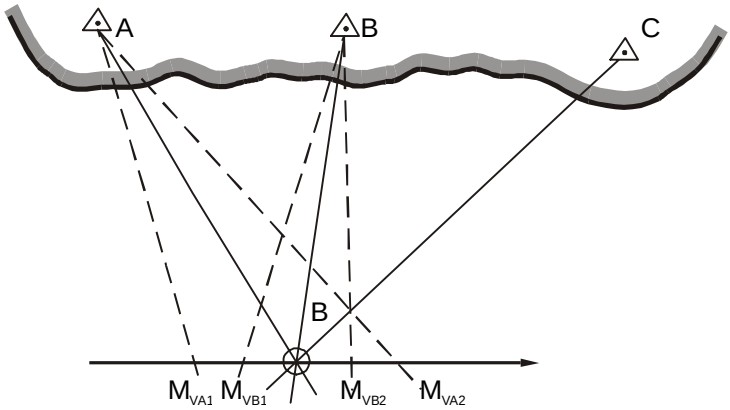


Fig. 213 Método analítico de reducción de las marcaciones a un punto de observación

Para ello se toman cinco marcaciones en la secuencia siguiente:

$$Mag_{A1};\ Mag_{B1};\ Mag_{C};\ Mag_{B2};\ Mag_{A2.}$$

En la carta se plotean las siguientes marcaciones verdaderas:

$$Mv_C = Mag_C + \Delta g$$

$$Mv_B = \frac{Mag_{B_1} + Mag_{B_2}}{2} + \Delta g$$

$$Mv_A = \frac{Mag_{A_1} + Mag_{A_2}}{2} + \Delta g$$

2. Triángulo de error

En la práctica, generalmente las tres marcaciones no se cortan en un punto sino que forman un triángulo denominado **triángulo de error** (Fig. 214).

De esta forma la medición de la tercera marcación permite obtener un simple criterio para el análisis sobre la confiabilidad de las observaciones y detectar la omisión de posibles errores.

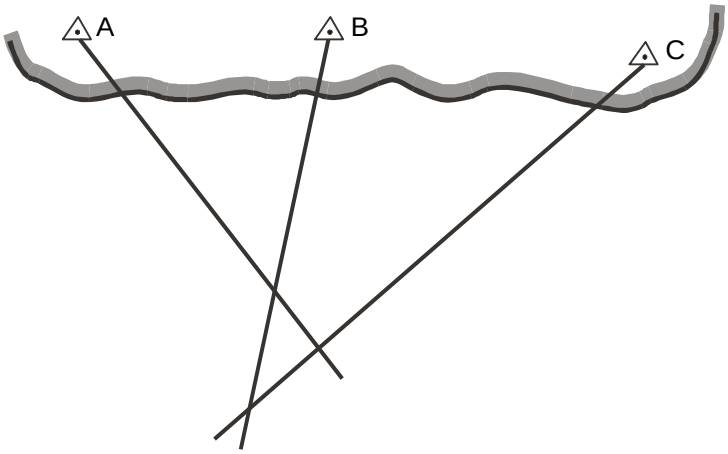


Fig. 214 Triángulo de error

Si el triángulo de error es pequeño (sus lados son menores de 5 mm en una carta de escala media) la posición del buque se asume que se encuentra en el centro del triángulo.

Si el triángulo obtenido es isósceles la posición del buque se toma próximo a la base.

Cuando el triángulo obtenido es muy grande se debe precisar las causas de su aparición. Tales causas pueden ser:

- La toma no simultánea de las marcacones. Para disminuir la influencia debido a ésto es necesario cumplir el orden al tomar las marcaciones. Cuando las velocidades son grandes las marcaciones se deben reducir a un punto de observación. Cumpliendo con estas exigencias, el triángulo debe reducirse.

- Errores casuales en la medición y ploteo de las marcaciones. Los errores casuales pueden originar un triángulo pequeño. Mayores errores originan triángulos mayores.

Para eliminar la influencia de estos errores se deben repetir cuidadosamente las mediciones y ploteo de estas marcaciones.

- Error en el reconocimiento de los objetos. Se midió la marcación a un objeto y en la carta se ploteó otro objeto. Este error puede originar el surgimiento de un triángulo grande. La comprobación de la correcta elección y reconocimiento de los objetos elimina este error.

- Error en la corrección del compás, Si después de reducir las marcaciones a una posición y se observa el orden estricto en las mediciones asi como el ploteo en la carta y el triángulo se mantiene, quiere decir que la causa de su surgimiento es el error en la corrección del compás.

La presencia de errores en la corrección del compás conlleva a que las marcaciones verdaderas contengan errores iguales.

Como resultado todas las marcaciones se desplazarán a un mismo lado y en su intersección forman un triángulo de error (Fig. 215).

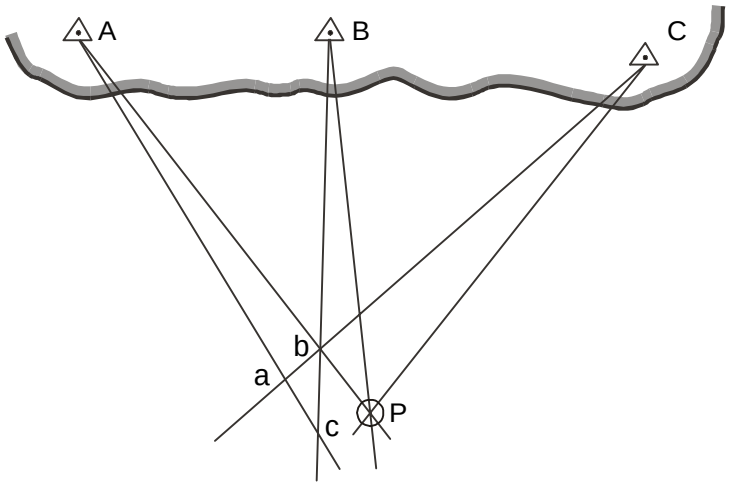


Fig. 215 Triángulo de error por la presencia de erroresen la corrección del compás

En la figura se observa que las marcaciones verdaderas correctas se cortan en el punto P, que es la posición del buque, sin embargo, las marcaciones verdaderas que contienen error al cortarse forman el triángulo **abc**, situado a un lado de la posición del buque.

3. Propiedades de los vértices del triángulo de error

Supongamos que en la determinación de la posición por tres marcaciones se tomaron las agujas a los objetos A, B y C.

A las marcaciones agujas les fueron aplicadas la corrección del compás y se obtuvieron las marcacaciones verdaderas a estos objetos:

$$M'v_A = Mag + \Delta g;$$
$$M'v_B = Mag + \Delta g;$$
$$M'v_C = Mag + \Delta g;$$
$$M'v_A = Mag + \Delta g.$$

donde $\Delta g' = \Delta g + 3°$

Las nuevas marcaciones verdaderas obtenidas se plotean en la carta formándose el triángulo a'b'c', que resulta ser mayor que el primer triángulo de error.

Examinemos los vértices de los triángulos obtenidos.

En el el triángulo abc el vértice c se formó por la intercepción de las marcaciones a los objetos A y B. El ángulo α entre estas marcaciones es igual a la diferencia de las mismas:

$$\alpha = Mv_B - Mv_A = (Mag_B + \Delta g) - (Mag_A + \Delta g) = Mag_B + \Delta g - Mag_A - \Delta g = Mag_B - Mag_A$$

En el triángulo a' b' c' vértice c' se forma por las marcaciones de estos mismos objetos A y B. El ángulo α' formado entre estas marcaciones será igual a su diferencia.

$$\alpha = M'v_B - M'v_A = (Mag_B + \Delta'g) - (Mag_A + \Delta'g) = (Mag_B + \Delta g + 3{,}0°) - (Mag_A + \Delta g + 3{,}0°) =$$
$$= Mag_B + \Delta g + 3{,}0° - Mag_A - \Delta g - 3{,}0° . = Mag_B - Mag_{A.}$$

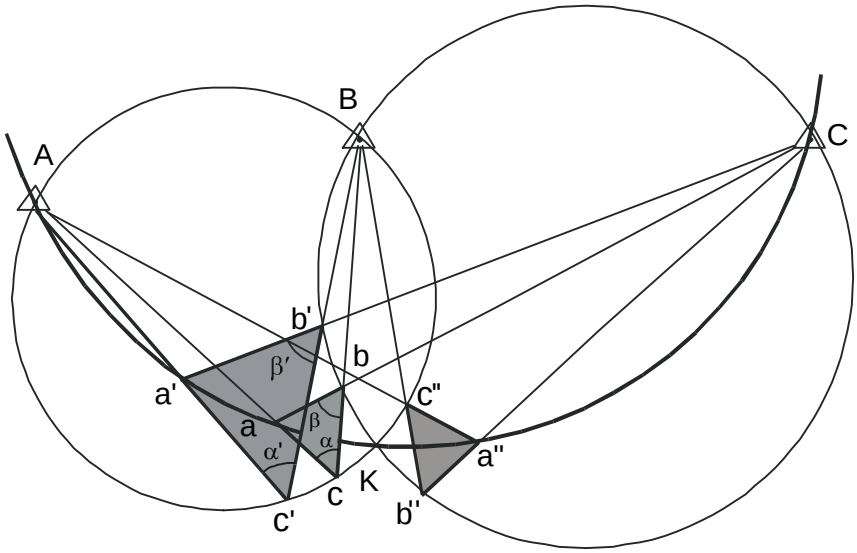


Fig. 216. Propiedades de los vértices del triángulo de error

Por consiguiente $\alpha = \alpha'$, es decir el ángulo entre las marcaciones de los objetos A y B en el vértice c del triángulo **abc** es igual al ángulo entre las marcaciones en vértice c' del triángulo a' b' c'.

Esto significa que los vértices c y c' de los triángulos son vértice de un mismo ángulo α, por lo que ellos deben encontrarse en una circunferencia que pasa por los objetos A y B y comprende el ángulo α entre estas marcaciones. En esta misma circunferencia se encontrará también el vértice c'' del triángulo a'' b'' c'' que se forma al plotear las marcaciones si la corrección del compás es disminuida en 3,0° (Fig 216). En el triángulo abc el vértice (b) se forma por la intersección de las marcaciones a los objetos B y C. El ángulo β entre ellas es igual a su diferencia:

$$\beta = Mv_C - Mv_B = (Mag_C + \Delta g) - (Mag_B + \Delta g) = Mag_C + \Delta g - Mag_B - \Delta g = Mag_C - Mag_B.$$

En el triángulo a' b' c' el vértice b' se forma por las nuevas marcaciones a estos mismos objetos A y B.

El ángulo β' entre ellas es igual a su diferencia:

$$\beta' = M'v_C - M'v_B = (Mag_C + \Delta' g) - (Mag_B + \Delta' g) = Mag_C - Mag_B.$$

Comparando los ángulos β y β' observamos que son iguales.

Por consiguiente los vértices b y b' son vértices de ángulos iguales. Esto significa que estos también se encuentran en una circunferencia que pasa por los objetos B y C que comprende el ángulo β.

En esta misma circunferencia se encontrará el vértice b'' del triángulo de error a'' b'' c'' que se forma por el ploteo de las marcaciones al disminuir el error del compás en 3,0°.

De la misma forma se encontrarán en una circunferencia los vértices a, a' y a'' de los triángulos.

Esta circunferencia pasa por los objetos A y C y comprenden el ángulo (α+β) entre las marcaciones a estos objetos.

De esta forma los vértices de los triángulos de error formados por la intersección de la marcaciones a los mismos objetos se encuentran en circunferencias que comprenden, los ángulos entre las marcaciones y que pasan por los objetos, cuyas marcaciones forman estos vértices.

En el punto de intersección de estas circunferencias se encuentra la posición del buque.

Por lo tanto, cuando se obtiene un triángulo de error grande, la causa de un surgimiento es la presencia de errores en la corrección del compás, para obtener la posición del buque es necesario trazar circunferencias por los vértices, de tal forma, que comprendan los ángulos que se forman en los vértices y que pasan por los objetos, cuyas marcaciones forman los triángulos.

En el punto de intersección de las circunferencias se encontrará la posición del buque (B).

La construcción de las circunsferencias que comprenden los ángulos en los vértices de los triángulos de error exige cálculos y construcciones auxiliares.

Para simplificar la solución de la tarea de determinación de la posición del buqe se puede sustitur los arcos de circunferencias por líneas rectas. Esto se puede hacer debido a que a grandes distancias hasta los objetos las circunferencias tienen poca curvatura. De esta forma para obtener la posición del buque ante la presencia de un triángulo de error grande, se debe proceder como sigue:

- Variar la corrección del compás en 2° - 3° y con ella calcular las nuevas marcaciones verdaderas.

- Trazar las nuevas marcaciones verdaderas en la carta. Al plotearlas se forma un nuevo triángulo de error mayor o menor que el primero.

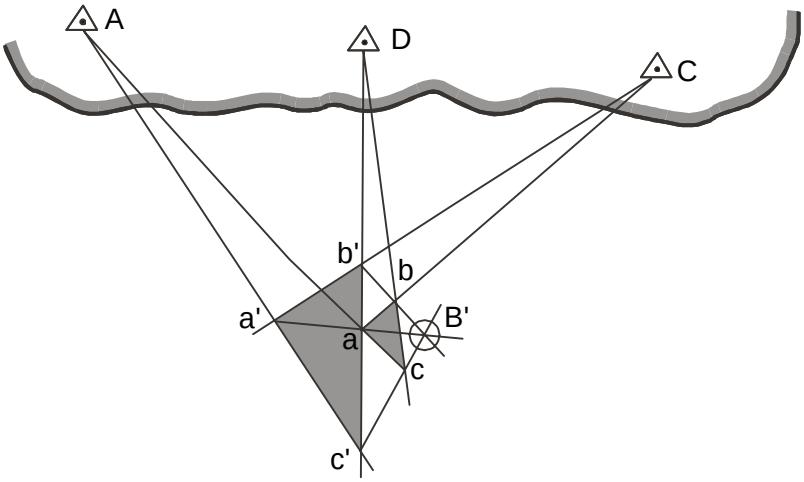


Fig. 217 Eliminación del triángulo de error

- Unir los vértices iguales de los triángulos con líneas rectas.

En el punto de intersección B de las líneas rectas se encontrará la posición del buque (Fig. 217).

Es mucho más fácil solucionar esta tarea pasando a la determinación de la posición por dos ángulos horizontales. Si la posición del buque se obtiene por tres marcaciones, entonces se forma un ángulo entre las marcaciones:

$$\alpha = Mag_B - Mag_A; \qquad \beta = Mag_C - Mag_B.$$

Los ángulos calculados se colocan en el transportador de tres brazos o se dibujan en papel de calcar y con su ayuda se determina la posición del buque.

4. Determinación del error del compás

Después de haber reducido el trángulo de error y haber obtenido la posición correcta del buque, se puede determinar el error real del compás.

Para determinar el error del girocompás las marcaciones agujas tomadas con la alidada del repetidor de giro a los puntos notables o de referncia (objetos) $M_{agA}, M_{agB} y M_{agC}$ se comparan con las marcaciones verdaderas tomadas de la carta (Fig. 217).

La diferencia entre estas marcaciones al mismo objeto será la corrección Δg del girocompás:

$$\Delta g_1 = M_{vA} - M_{agA};$$
$$\Delta g_2 = M_{vB} - M_{agB};$$
$$\Delta g_3 = M_{vC} - M_{agC}.$$

Las correcciones obtenidas deben ser iguales entre si. Sin embargo, en la práctica se diferencian, por eso se calcula su valor medio.

$$\Delta g = \frac{\Delta g_1 + \Delta g_2 + \Delta g_3}{3}. \qquad (188)$$

5. Procedimiento práctico del método.

1. Se seleccionan tres objetos costeros que aparezcan en la carta y que sean visibles desde el buque. Los ángulos entre las marcaciones a los objetos adyacentes no deben ser menores de 30° ni mayores de 150°.

2. En el menor tiempo posible se toman las marcaciones agujas a los objetos, después de lo cual se anota la hora T y lectura de la corrección Lc.

3. Las marcaciones agujas se corrigen aplicándole la corrección del compás y se plotean en la carta. En el punto de intersección de las marcaciones se obtiene la posición del buque.

Si en la intersección de las marcaciones se forma un triángulo pequeño, entonces la posición del buque se encuentra en el centro del mismo.

4. Cuando se obtiene un triángulo de error muy grande es necesario comprobar la selección de los objetos y repetir cuidadosamente las marcaciones, su corrección y ploteo en la carta.Si después de repetir las observaciones se obtiene el mismo triángulo de error, entonces quiere decir que existe un error en la corrección del compás.

Para ello es necesario pasar a la determinación de la posición por dos ángulos horizontales, calculados por la diferencia de las marcaciones:

$$\alpha = Mag_B - Mag_A;$$
$$\beta = Mag_C - Mag_B.$$

5. Después de determinar la posición, se realizan las construcciones gráficas en la carta y anotaciones en el cuaderno de guardias de navegación.

17	15	Lc=20,6 Señal Oeste 321,0° Faro Norte – 355,0°
-	-	Señal Este – 42,0°, Δg=+1,0°,C=90°- 0,4 millas

6.6 Determinación de la posición del buque por marcación corrida tomadas a uno o dos objetos

1. Esencia del método

Si en el campo visual del buque se encuentra sólo un objeto que aparece en la carta, entonces la posición del buque se determina por dos marcaciones a este objeto, tomadas a diferentes horas.

Supongamos que en el momento T_1 se tomó la marcación aguja el objeto A. Al mismo tiempo se anotó la lectura de la corredera L_{C1} Esta marcación se corrige aplicándole la corrección del compás:

$$Mv = Mag + \Delta g$$

A la marcación verdadera obtenida le corresponde la línea isométrica AP en la carta (Fig 218).

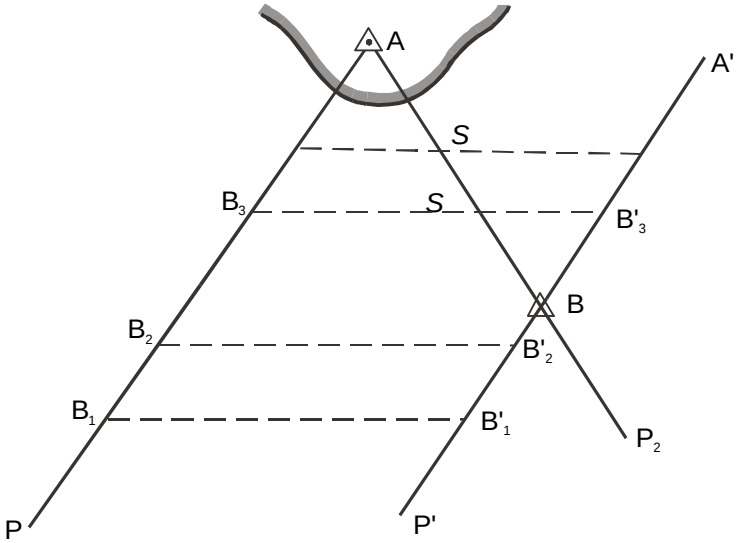


Fig. 218 Determinación de la posición por marcacion corrida

En uno de los puntos de esta línea isométrica se encuentra el buque en el momento de la medición (B_1, B_2, ... B_n). En un intervalo de tiempo T el buque navegó el espacio S = V T y en el momento T_2 se encuentra en una nueva posición.

Supongamos que en la línea isométrica AP el buque se encuentra en el punto B_1. Si se encuentra en el punto B_2 entonces al recorrer el espacio S se encontrará en el punto B_2. Al hallarse el buque en cualquier otro punto de la línea isométrica AP; al navegar éste el espacio S' se encontrará en la línea A' P', que pasa por los puntos B_1 y B_2.

La línea A' P' es paralela a la línea isométrica AP y está separada de ella por el espacio S en la línea del rumbo verdadero.

Esto significa que la línea A' P' es la línea isométrica corrida.

De esta forma se puede considerar que al recorrer el buque el espacio S por la línea del rumbo verdadero, conjuntamente con él se trasladó la línea de marcación, en la dirección de la línea del rumbo verdadero en este mismo espacio. En el intervalo de tiempoT el buque se encontrará en uno de los puntos de la línea isométrica corrida A' P'. Si en este momento tomamos la segunda marcación al objeto A y ploteamos en la carta la línea isométrica AP_2, correspondiente a esta marcación, en el punto de intersección de esta con la línea isométrica corrida A' P' se encontrará la posición del buque B.

Para obtener la posición del buque por este método se utiliza la línea del rumbo verdadero y el espacio que el buque recorre entre la toma de ambas marcaciones, o sea, se utilizan los elementos de la estima, por eso la posición obtenida por este método se llama **posición fija de estima** y se representa en la carta por un pequeño triángulo. Este método de determinación de la posición se **llama método de la marcación corrida.**

2 . Obtensión de la posición en la carta sin consideración del abatimiento y la deriva

Las marcaciones verdaderas obtenidas se plotean en el carta.

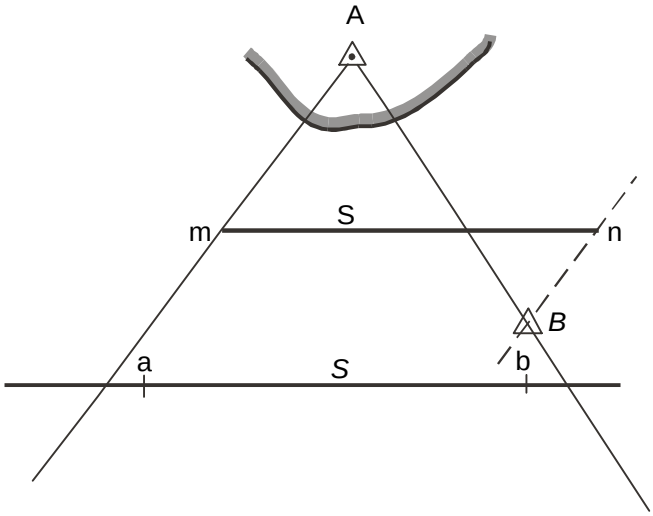


Fig. 219. Determinación de la posición por el método de la marcación corrida

En la línea del rumbo verdadero se calculan las posiciones de estima para los momentos de medición de la primera y segunda marcaciones (punto a y b en la figura 219).

El espacio entre este puntos es el espacio que recorrió el buque entre los momentos de toma de ambas marcaciones:

$$Sc = (Lc_2 - Lc_1)Kc.$$

Desde un punto arbitrario (m) en la línea de la primera marcación se plotea la línea del rumbo verdadero, sobre la cual se traza el espacio Sc. Por el punto (n) obtenido se traza una línea paralela a la primera marcación y se prolonga hasta su intersección con la línea de la segunda marcación. El punto B de intersección será la posición del buque.

Se acostumbra a tomar como punto arbitrario (m) el punto A de la posición del objeto (Fig. 220) o el punto de intersección de la primera marcación con la línea del rumbo verdadero .

3. Obtención de la posición considerando el abatimiento

En la estima gráfica considerando el abatimiento, en la carta se plotean las líneas del rumbo verdadero y el rumbo efectivo.

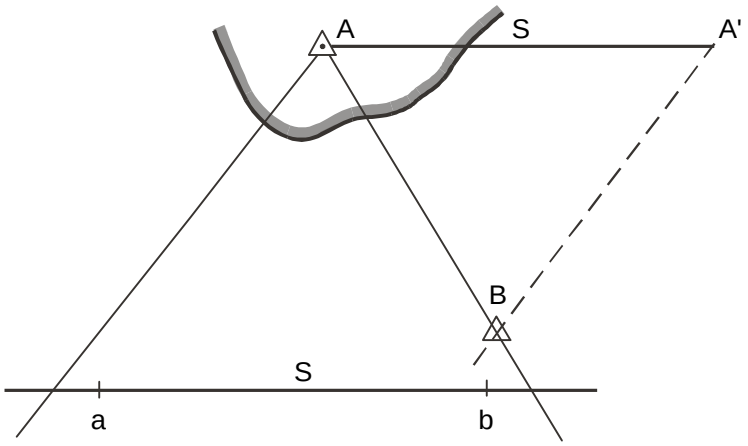


Fig. 220 Determinación de la posición en la carta por el método de la marcación corrida

Ya que la corredera considera el abatimiento, el espacio recorrido por el buque, calculado por la corredera, se plotea sobre la línea del rumbo efectivo. Para obtener la posición en la carta por el método de la marcación corrida las marcaciones verdaderas se plotean en ésta. En la línea del rumbo efectivo por abatimiento $Re\alpha$ se determinan los puntos de estima en los momentos T_1 y T_2 de medición de las marcaciones (puntos a y b en la figura 221).

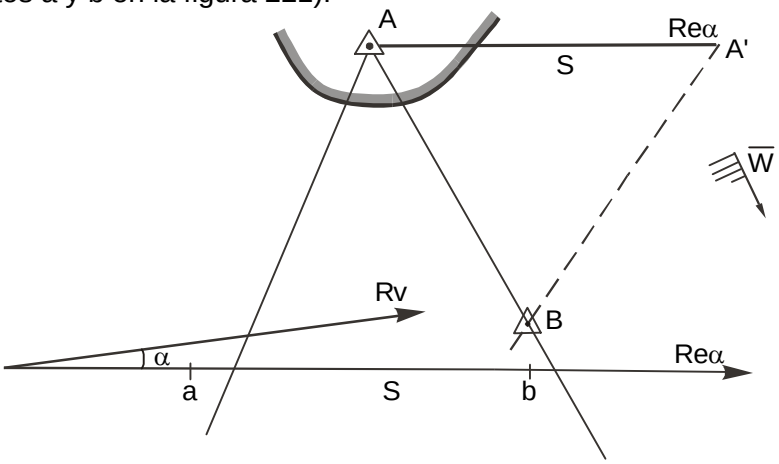


Fig. 221 Determinación de la posición en la estima considerando el abatimiento

El espacio entre estos puntos es el espacio recorrido por el buque por la línea del rumbo efectivo en el intervalo de tiempo entre los momentos de medición de las marcaciones:

$$ab = Sc = (Lc_2 - Lc_1)Kc.$$

Desde el objeto A se plotea la línea del rumbo efectivo y sobre ella el espacio S_c. A través, del punto A' se traza una línea de la segunda marcación. El punto de intersección (B) será la posición del buque.

4. Determinación de la posición en la estima considerando la deriva

En la estima gráfica considerando la deriva, en la carta se plotean las líneas de rumbo verdadero Rv y del rumbo efectivo Re_β. La corredera no considera la corriente, el espacio que recorre el buque, se plotea por la línea del rumbo verdadero. Los puntos obtenidos en la línea del rumbo verdadero se trasladan paralelamente a la dirección de la corriente hasta la línea del rumbo efectivo. Para determinar la posición por el método de marcación corrida considerando la deriva, las marcaciones verdaderas se plotean en la carta.

En la línea del rumbo verdadero se deteriman los puntos para los momentos T_1 y T_2 de medición de las marcaciones. Por los puntos obtenidos a y b se trazan las líneas paralelas a la corriente hasta su intersección con la línea del rumbo efectivo. Los puntos obtenidos a' y b' en la línea del rumbo efectivo son las posiciones de estima del buque para los momentos T_1 y T_2 en que se tomaron las marcaciones. El espacio entre estos puntos es el espacio recorrido por el buque por la línea del rumbo efectivo en el intervalo entre las marcaciones (Fig. 222).

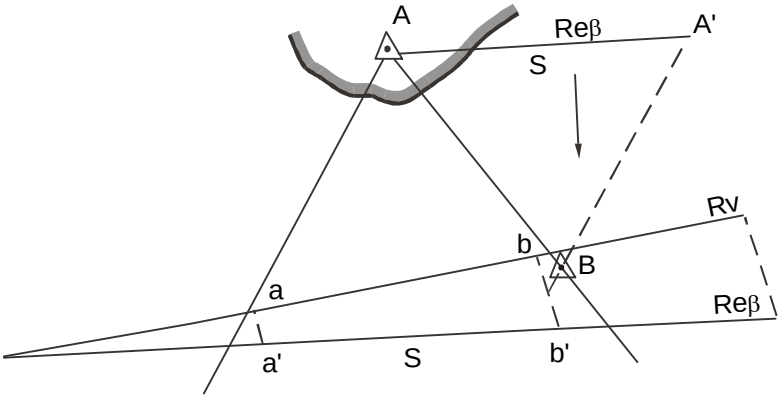


Fig. 222 Determinación de la posición en la estima considerando la corriente

Desde el objeto A se plotea la línea del rumbo efectivo y por ella el espacio S. A través, del punto A' obtenido se traza una línea paralela a la primera marcación hasta su intersección con la línea de la segunda marcación. El punto B correspondiente a la intersección de estas líneas será la posición del buque.

5. Casos especiales de la determinación de la posición del buque por el método de la marcación corrida

En la determinación de la posición por el método de la marcación corrida se pueden simplificar las construcciones gráficas. Para ello es necesario medir las marcaciones a los objetos costeros sólo en aquellos casos cuando forman con la línea de rumbo determinados ángulos (ángulos notables).

a) Método de la distancia por través

En este método de determinación de la posición la segunda marcación se mide en el momento del través, o sea, la segunda marcación forma con la línea de rumbo verdadero 90° (Fig. 223).

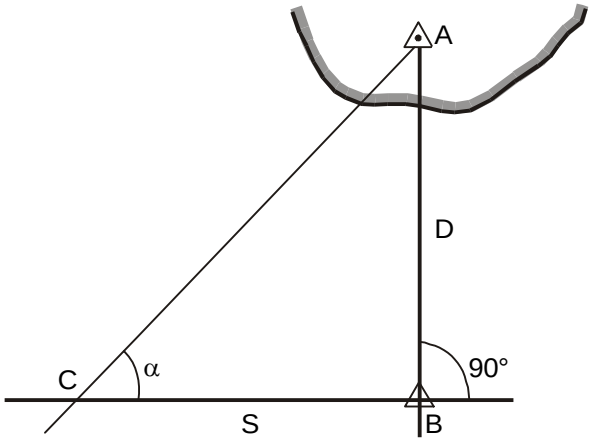


Fig. 223 Método de la distancia por través

En este caso es muy fácil medir la distancia entre el buque y el objeto en el momento cuando se mide la segunda marcación.

$$D = S \tan \alpha, \qquad (189)$$

donde:

D – Distancia hasta el objeto en el momento de medición de la segunda marcación.

S – Espacio que recorrió el buque en el tiempo que transcurrió entre la toma de ambas marcaciones:

$$Sc = (Lc_2 - Lc_1)Kc$$

α – Ängulo formado entre la línea del rumbo verdadero y la línea de la primera marcación.

Si la primera marcación se mide en el momento cuando el ángulo:

$\alpha = 45°$, entonces $\tan\alpha = 1$ y $D = S$, si $\alpha = 63{,}5°$ entonces $\tan\alpha = 2$ y $D = 2S$.

Para utilizar este método es necesario calcular anticipadamente adelantado aquellas marcaciones agujas que corresponden al valor deseado del ángulo α.

Si el objeto está a babor las marcaciones agujas se calculan por las fórmulas:

$$Mam_{\alpha} = Ram - \alpha° \qquad Mam_{\perp} = Ram - 90°$$

Si el objeto está a estribor estas fórmulas toman la forma:

$$Mam_{\alpha} = Ram + \alpha° \qquad Mam_{\perp} = Ram + 90°$$

b) Método del ángulo doble por la proa

En este método las marcaciones se miden de tal forma, que la línea de la segunda marcación verdadera forma con la línea del rumbo verdadero un ángulo igual a 2α; donde α es el ángulo entre la línea de la primera marcación verdadera y la línea del rumbo verdadero (Fig. 224).

En este caso el ángulo entre las dos marcaciones verdaderas al objeto A será también igual al ángulo α.

En realidad el ángulo en el punto B igual a 2α, es la suma de los ángulos interiores del triángulo ABb; no adyacentes a él.

Como el ángulo en el punto C es igual a α, el ángulo en el punto A es también igual a α.

De esta forma el triángulo ABC, es un triángulo isósceles, por lo que $AB = BC$, o sea $S = D$. Esto significa que en el caso dado la distancia entre el buque y el objeto, por la línea de la segunda marcación, es igual al espacio S que recorre el buque en el intervalo de tiempo entre la medición de ambas marcaciones.

En el primer y segundo caso especial, para obtener la posición del buque en la carta, es suficiente plotear la línea de la segunda marcación verdadera y trazar en ella el espacio calculado.

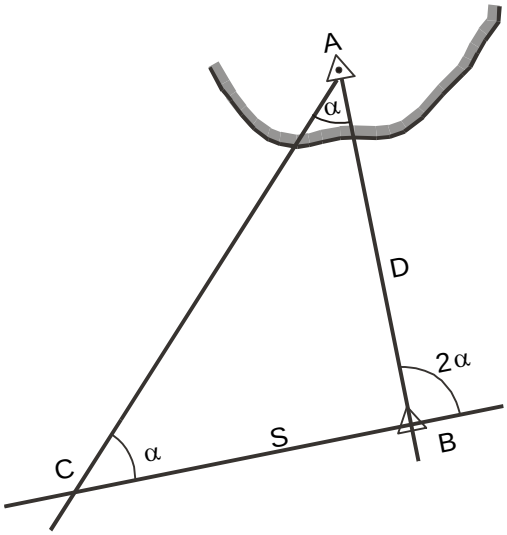


Fig. 224 Método del ángulo doble

6. Determinación de la posición del buque por el método de la marcación corrida en el intervalo entre las marcaciones cuando se varió el rumbo

Si se determina la posición por el método de la marcación corrida y después de tomar la primera marcación se varía el rumbo, aún es posible determinar la posición del buque por este método. Para ello es necesario, como en los casos anteriores, trasladar la línea de la marcación en la magnitud y dirección del espacio recorrido por el buque en el intervalo de tiempo entre la toma de las marcaciones.

Supongamos que en el momento cuando el buque se encontraba en el punto A, $\left(\frac{T_1}{Lc_1}\right)$ fue tomada la primera marcación al objeto C (Fig. 225).

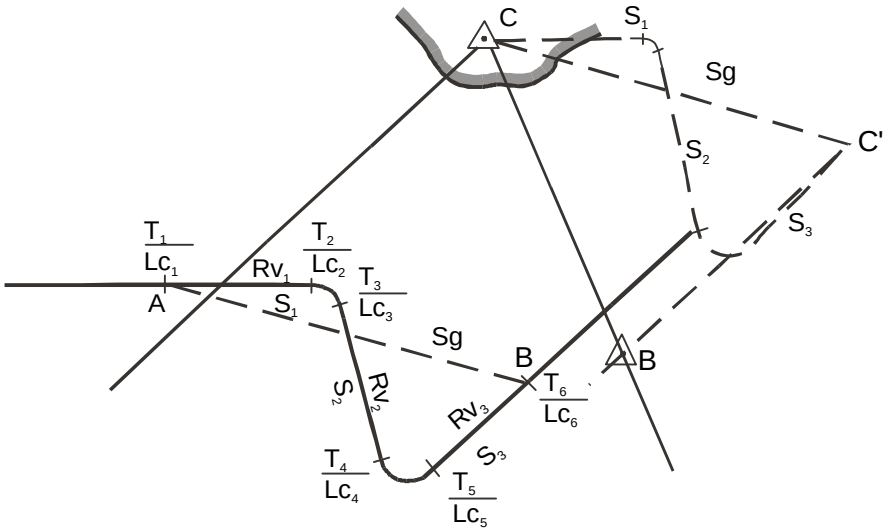


Fig. 225 Marcación corrida cuando se varía el rumbo

$Mv_1 = Mag_1 + \Delta g.$

Después de esto el buque varió el rumbo en dos ocaciones y en el momento en que se encontraba en

la posición de estima B, $\left(\frac{T_2}{Lc_2}\right)$ se tomó la segunda marcación al objeto C:

$$Mv_2 = Mag_2 + \Delta g.$$

En el intervalo de tiempo entre los momentos en que se tomaron las marcaciones, el buque se desplazó desde el punto A al B. En este espacio es necesario correr la línea de la primera marcación, para lo que es necesario trazar todos los rumbos que tomó el buque en este intervalo de tiempo desde el punto C. Por el punto C' obtenido se traza una línea paralela a la línea de la primera marcación.

En el punto B se encontrará la posición del buque.

Para que la solución de esta tarea sea más simple se puede considerar que el buque navegó el espacio S (Sg) desde el punto A al B con un sólo rumbo.

Para obtener la posición del buque desde el punto C se traza una línea paralela a la línea S Sg). Como resultado de tal construcción se obtiene el mismo punto C', a través del cual se traza la línea paralela a la primera marcación. La posición del buque se encontrará de igual forma en el punto B.

7. Determinación de la posición por marcaciones no simultáneas a dos objetos

En la práctica de navegación se encuentran casos, cuando es visible sólo un objeto, el cual dentro de poco tiempo debe desaparecer y en su lugar aparece otro que será de igual forma visible desde el buque. En tales casos la posición del buque se determina por marcaciones no simultáneas a estos objetos, o sea, por el método de la marcación corrida por marcaciones a dos objetos.

Supongamos que en el momento cuando el buque se encontraba en el punto C, $\left(\frac{T_1}{Lc_1}\right)$ se tomó una marcación al objeto A. El objeto B aún no se ve y sólo aparece dentro determinado intervalo de tiempo.

En el momento cuando el buque llegó al punto D, $\left(\frac{T_2}{Lc_2}\right)$, se tomó una marcación al objeto B.

Para determinar la posición del buque desde el punto A (posición del primer objeto) se plotea la línea del rumbo verdadero y por ella se traza el espacio Sc = (Lc_2 - Lc_1) Kc, que recorrió el buque en el intervalo de tiempo entre ambas marcaciones. A través del punto A' obtenido se plotea una línea paralela a la primera marcación. En el punto de intersección B se encontrará el buque (Fig. 226).

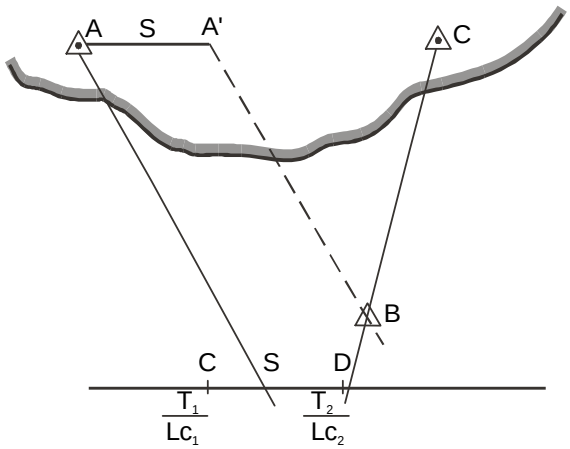


Fig. 226 Determinación de la posición por marcaciones no simultáneas a dos objetos

a posición de estima B, $\left(\frac{T_2}{Lc_2}\right)$ se tomó la segunda marcación al objeto C:

$$Mv_2 = Mag_2 + \Delta g.$$

En el intervalo de tiempo entre los momentos en que se tomaron las marcaciones, el buque se desplazó desde el punto A al B. En este espacio es necesario correr la línea de la primera marcación, para lo que es necesario trazar todos los rumbos que tomó el buque en este intervalo de tiempo desde el punto C. Por el punto C' obtenido se traza una línea paralela a la línea de la primera marcación.

En el punto B se encontrará la posición del buque.

Para que la solución de esta tarea sea más simple se puede considerar que el buque navegó el espacio S (Sg) desde el punto A al B con un sólo rumbo.

Para obtener la posición del buque desde el punto C se traza una línea paralela a la línea S Sg). Como resultado de tal construcción se obtiene el mismo punto C', a través del cual se traza la línea paralela a la primera marcación. La posición del buque se encontrará de igual forma en el punto B.

7. Determinación de la posición por marcaciones no simultáneas a dos objetos

En la práctica de navegación se encuentran casos, cuando es visible sólo un objeto, el cual dentro de poco tiempo debe desaparecer y en su lugar aparece otro que será de igual forma visible desde el buque. En tales casos la posición del buque se determina por marcaciones no simultáneas a estos objetos, o sea, por el método de la marcación corrida por marcaciones a dos objetos.

Supongamos que en el momento cuando el buque se encontraba en el punto C, $\left(\frac{T_1}{Lc_1}\right)$ se tomó una marcación al objeto A. El objeto B aún no se ve y sólo aparece dentro determinado intervalo de tiempo. En el momento cuando el buque llegó al punto D, $\left(\frac{T_2}{Lc_2}\right)$, se tomó una marcación al objeto B.

Para determinar la posición del buque desde el punto A (posición del primer objeto) se plotea la línea del rumbo verdadero y por ella se traza el espacio Sc = (Lc_2 - Lc_1) Kc, que recorrió el buque en el intervalo de tiempo entre ambas marcaciones. A través del punto A' obtenido se plotea una línea paralela a la primera marcación. En el punto de intersección B se encontrará el buque (Fig.226).

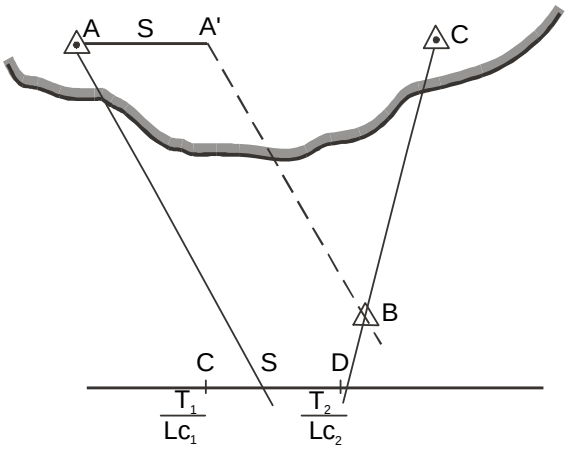


Fig. 226 Determinación de la posición por rcaciones no simultáneas a dos objetos

8. Procedimiento práctico del método

1. Se selecciona el punto notable que aparece en la carta.

2. Se toma la marcación aguja , se anota la hora T_1 y la lectura de la corredera Lc_1.

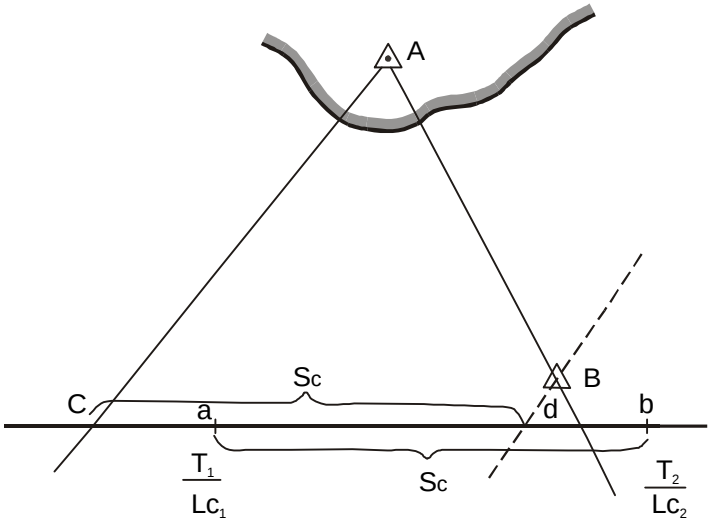


Fig.227 Procedimiento práctico del método de determinación de la posición por marcación corrida

3. La marcación aguja medida se corrige aplicando la corrección del compás:

$$Mv_1 = Mag_1 + \Delta g$$

La marcación verdadera se plotea en la carta. En el momento T_1 cuando se toma la primera marcación se determina la posición de estima del buque (punto a).

4. Cuando la marcación varía en un valor no menor de 30° se toma la segunda marcación aguja, se anota la hora T_2 y la lectura de la corredera Lc_2.

5. La segunda marcación aguja medida se corrige con la corrección del compás.

$$Mag_2 + \Delta g = Mv_2$$

La marcación verdadera obtenida se plotea en la carta. Para el momento T_2 de medición de esta marcación se determina la posición de estima (punto b en la figura 227).

6. A partir del punto C de intersección (C) de la línea de la primera marcación con la línea del rumbo se traza el espacio S recorrido por el buque entre ambas marcaciones.

$$Sc = (Lc_2 - Lc_1)\ Kc$$

7. A través del punto obtenido se traza una línea paralela a la línea de la primera marcación.

El punto B obtenido corresponde a la posición del buque para el momento de la segunda marcación.

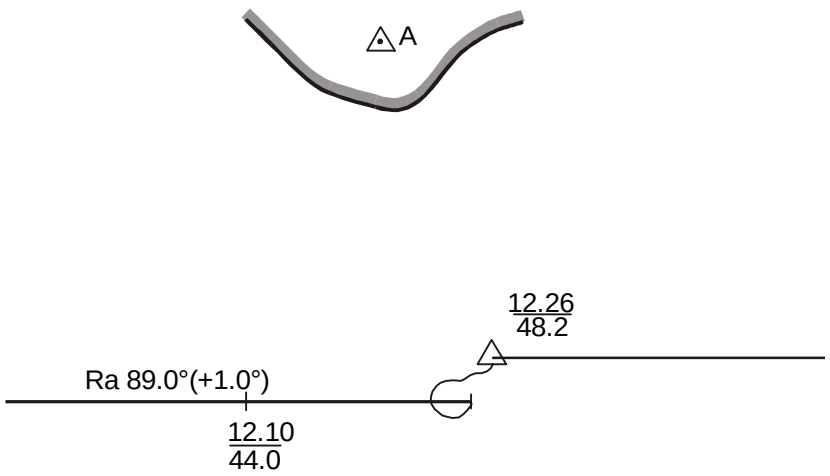


Fig. 228 Confección de la derrota en la carta

8. Se realizan las construcciones gráficas y las anotaciones en la carta (Fig. 228)

9. Se hacen las anotaciones en el cuaderno de guardia de navegación:

12	10	Lc=44,0 Faro Punta Lucrecia 30,0°, Δg=+1,0°
12	26	Lc=48,2 Faro Punta Lucrecia 30,0°, Δg=+1,0°
-	-	C =10° - 0,5 millas

6.7 Determinación de la posición por distancias

1. Métodos de medición de distancias hasta los objetos costeros

Para medir las distancias en los buque modernos se utilizan los radares y los telémetros ópticos.

Además, las distancias pueden ser obtenidas por cálculos de los ángulos verticales α a los objetos cuyas alturas se conocen (Fig. 229).

Considerando la gran distancia que hay hasta los objetos costeros y la pequeña altura del ojo del observador, se puede suponer que el ángulo horizontal se mide desde la superficie del agua en el punto B.

Entonces en el triángulo ABM tenemos que:

$$D = H\,\mathrm{ctg}\,\alpha \quad \text{ó} \quad D = \frac{H}{\tan\alpha}.$$

Como la altura de los objetos no sobrepasa las decenas de metros, se puede considerar que el ángulo α no es grande y alcanza sólo minutos y en casos extremos algunos grados. Esto significa que tgα = α en radianes.Teniendo en cuenta que en un radian hay 3438 minutos, tenemos que:

$$\tan\alpha = \frac{\alpha'}{3438}.$$

Sustituyendo el valor de tanα en la fórmula obtenemos:

$$D = \frac{H}{\frac{\alpha'}{3438}} \quad ó \quad D = \frac{3438H}{\alpha}.$$

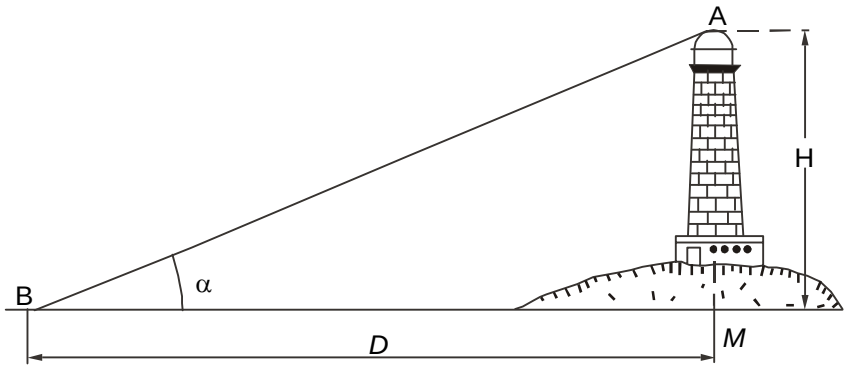


Fig. 229 Determinación de la distancia por la medición de ángulos horizontales

Para obtener la distancia hasta el objeto en millas es necesario expresar la altura del objeto también en millas, o sea: $\frac{Hm}{1852}$

Entonces la expresión anterior toma la forma:

$$D = \frac{\frac{Hm3458}{1852}}{\alpha'} = \frac{Hm3458}{1852\alpha'} = \frac{13}{7}\frac{Hm}{\alpha'};$$

$$D = \frac{13}{7}\frac{Hm}{\alpha'} \qquad (190)$$

$$ó \quad D = 1{,}86\frac{Hm}{\alpha'}. \qquad (191)$$

La altura del ojo del observador durante la medición del ángulo vertical se puede despreciar, es decir que el ángulo α fue medido de la superficie del agua.

2. Determinación de la posición del buque por distancias hasta dos objetos

a) Esencia del método

Si en los límites de visibilidad del buque se encuentran dos objetos que aparecen en la carta, entonces la posición se puede determinar por dos distancias. Para ello se miden las distancias D_A y D_B hasta los objetos a un mismo tiempo (Fig. 230).

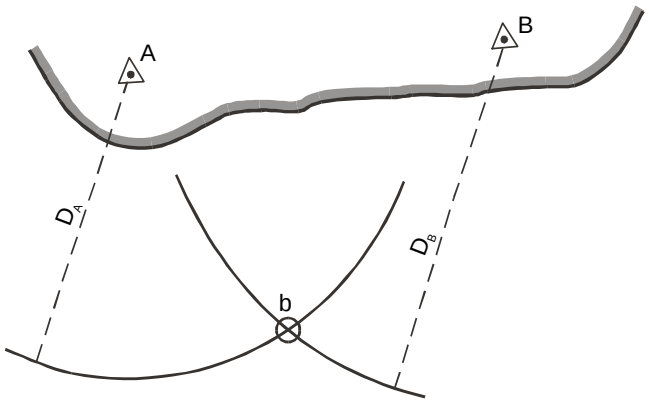


Fig. 230 Determinación de la posición por distancia hasta dos objetos

Es conocido que las líneas isométricas de las distancias son circunferencias, cuyos radios son iguales a las distancias medidas y sus centros se encuentra en los puntos notables. Es por ello que la distancia Da en la carta corresponde a una circunferencia, cuyo radio es igual a D_A teniendo como centro de medición de esta distancia el buque que se encuentra en uno de los puntos de esta circunferencia.

A la distancia D_A corresponde una circunferencia, cuyo radio es igual a D_B y tiene como centro la posición del objeto B.

En el momento cuando se mide la distancia D_B el buque se encuentra en uno de los puntos de esta circunferencia.

Ya que las distancias D_A y D_B se midieron a un mismo tiempo, el buque se encuentra en el punto b, donde se interceptan.

El punto b corresponde a la posición del buque.

b) Orden de medición de las distancias

Reducción de las distancias a una posición de observación

Para obtener la posición con el buque en movimiento es necesario medir la distancia hasta los objetos simultáneamente.
La medición de las distancias hasta los objetos costeros con ayuda de los medios radiotécnicos de a bordo se realiza en pequeños intervalos de tiempo y se puede considerar que estas mediciones se realizan a un mismo tiempo. Por eso la posición del buque, determinada con ayuda del radar se puede considerar como una posición exacta.

La medición de distancias con ayuda de los telémetros ópticos exige una pérdida de tiempo considerablemente mayor. El intervalo de tiempo entre la medición de ambas distancias puede ser lo suficientemente grande, como para que se pueda considerar que las mediciones no fueron simultáneas.

Lo mismo se puede decir sobre la medición de ángulos verticales, por los que se calculan las distancias y que también no son simultáneas, es decir que se midieron desde diferentes puntos. Esto origina el surgimiento de errores en la posición del buque, cuya magnitud dependerá de la secuencia de medición de las distancias. Cuando esta secuencia de medición es correcta el error en la posición del buque será mucho menor.

Para que el error en la determinación de la posición del buque por dos distancias sea lo menor posible, se debe medir primero aquella distancia que varía más lentamente. Esto significa que es preciso medir primero la distancia hasta el objeto que se encuentra más cerca del TRAVÉS, es decir que su marcación relativa sea próxima a 90°.

Este orden de medición de las distancias disminuye el error de determinación de la posición pero no lo excluye totalmente.

Para eliminar complemente este error es conveniente reducir las distancias a un punto de observación.

Esta tarea puede ser resuelta tanto gráfica como analíticamente. En el caso de la solución analítica para reducir las distancias a una posición se miden:

- La distancia D_{A1} hasta el objeto A.

- La distancia D_B hasta el objeto B.

- La distancia D_{A2} hasta el objeto A.

Para determinar la posición, la distancia D_B hasta el objeto B se toma sin variaciones.

La distancia hasta el objeto A se calcula de la siguiente forma:

$$D_A = \frac{D_{A1} + D_{A2}}{2}.$$

La hora T y la letura Lc de la corredera se anotan cuando se mide la distancia hasta el objeto B.

Cuando esta tarea se resuelve gráficamente se miden sólo dos distancias: D_A y D_B (Fig. 231)

En el momento de medición de cada distancia se anota la hora y la lectura de la corredera. Para obtener la posición, la línea isométrica (circunferencia), correspondiente a la primera distancia medida, se corre por la línea del rumbo verdadero en una distancia igual al espacio recorrido S por el buque en el intervalo de tiempo entre la medición de ambas distancias.

$$S = V(T_2 - T_1) = (Lc_2 - Lc_1)Kc.$$

Para correr la línea isométrica en la distancia S el centro de la circunferencia se traslada del punto A al punto A'.

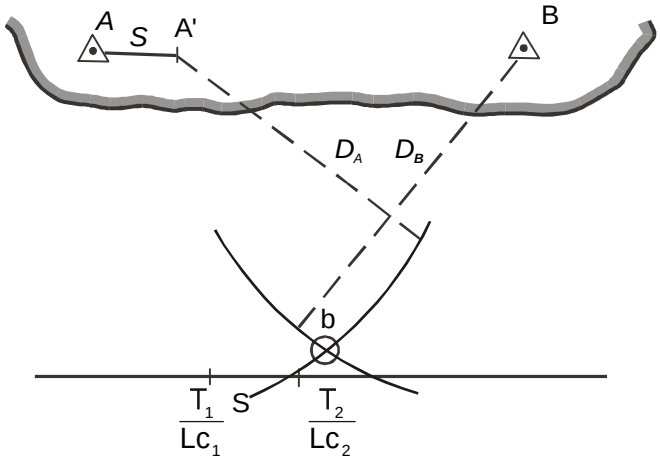


Fig. 231 Reducción de las distancias medidas a una posición de observación

3. Determinación de la posición del buque por distancias hasta tres objetos

La desventaja del método de determinación de la posición del buque por dos distancias es la ausencia de control sobre la veracidad de la posición determinada, por eso siempre que se pueda determinar la posición del buque por tres distancias debe utilizarse este método. Para determinar la posición del buque por este método se miden tres distancias: D_A, D_B y D_C.

Se trazan las líneas isométricas que son circunferencias con radios iguales a las distancias medidas y cuyos centros corresponden a los objetos. La posición del buque se encuentra en el punto de intersección (B) de las tres circunferencias (Fig.232).

La intersección de las tres circunferencias en un punto es índice de que la posición fue correctamente determinada.

En la intersección de las circunferencias se puede formar un triángulo de error. Si éste es pequeño, la posición del buque se toma en su centro. Si el triángulo es grande es necesario nuevamente determinar la posición del buque, comprobando de forma preliminar la correcta selección de los objetos.

Además, para obtener una posición correcta es necesario reducir las distancias medidas a un punto de observación. Para ello se exige trasladar las dos primeras líneas isométricas en la dirección del rumbo verdadero y en un espacio igual al espacio recorrido por el buque en el intervalo de tiempo entre el momento de medición de las dos primeras distancias y el momento de medición de la tercera.

La primera línea isométrica se corre en la dirección del rumbo verdadero en un espacio igual al espacio recorrido por el buque entre la toma de la primera y la tercera distancia

$S_1 = (Lc_3 - Lc_1)\ Kc$

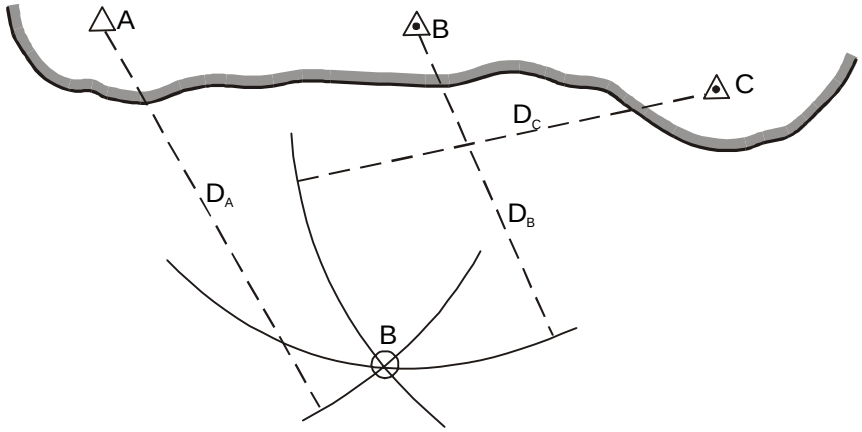


Fig. 232 Determinación de la posición por tres distancias

La segunda línea isométrica se corre en la magnitud del espacio recorrido por el buque entre los momentos de medición de la segunda y tercera distancias:

$S_2 = (Lc_3 - Lc_2)\ Kc$

Para trasladar las líneas isométricas, se corren los centros de las circunferencias en el espacio calculado.

4. Procedimiento práctico del método

1. Se seleccionan los objetos hasta los cuales se miden las distancias y se establece el orden de medición.

2. En secuencia rápida se miden las diferencias hasta los objetos seleccionados y se corrigen con las correcciones correspondientes.

3. Con radios iguales a las distancias medidas se trazan las circunferencias y en su punto de intersección se encontrará la posición del buque. Los centros de las circunferencias serán los objetos.

Cuando el intervalo de tiempo entre los momentos de medición es grande se realiza la reducción a un lugar de observación.

4. Se realizan las construcciones gráficas y las anotaciones en la carta.

5. Se hacen las anotaciones en el cuaderno de guardia de navegación.

12	55	Lc=26,0 Señal Oeste Dc=79 cab. Faro Este Dc=79.
		ΔD=0 , C=132°-0,4millas

5. Determinación de la posición del buque por distancias no simultáneas

En aquel caso cuando en la visibilidad del buque se encuentra sólo un objeto y en el buque existe la posibilidad de medir un sólo parámetro de navegación (una distancia), la posición del buque se puede determinar por dos distancias no simultáneas al objeto.

Para determinar la posición en el momento T1 se mide la distancia D1 y se anota la hora T1 y lectura de la corredera Lc1. Dentro de determinado intervalo de tiempo, en el momento T2 se toma la segunda distancia D2 y se anota la hora T2 y la lectura de la corredera Lc2. Al mismo tiempo se determinan en la línea de rumbo verdadero las posiciones de estima correspondientes a los momentos de medición de las distancias (Fig. 233).

La distancia entre los puntos de estima es el espacio S recorrido por el buque entre estos momentos:

$$S = (Lc_2 - Lc_1)\ Kc$$

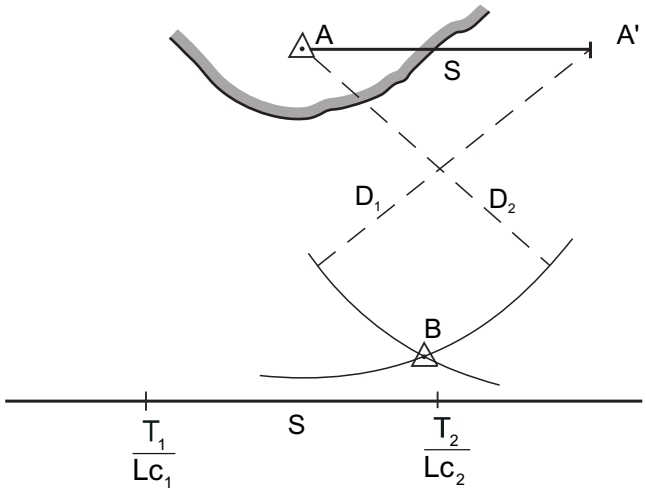


Fig. 233. Determinación de la posición por distancias Corridas

Desde la posición del objeto A se plotea la línea del rumbo verdadero y por ella se traza el espacio S.

Tomando el punto A como centro se traza una circunferencia con un radio igual a la distancia D_2 medida. Desde el punto A' se traza una circunferencia cuyo radio es igual a la distancia D_1 medida.

En el punto de intersección de ambas circunferencias se encontrará la posición del buque, que será una posición fija de estima y se representa en la carta por un triángulo pequeño.

Después de realizar todas las construcciones gráficas y anotaciones necesarias se hacen las anotaciones en el cuaderno de guardias de navegación:

15	15	Lc=27,2 Faro Alto Dc=52cab. ΔD=0
15	28	Lc=31,6 Faro Alto Dc=49cab. ΔD=0 , C=350°-0,4millas

6.8. Determinación de la posición del buque por métodos combinados

Se llaman métodos combinados aquellos, en los cuales, la determinación de la posición del buque se realiza midiendo diferentes parámetros de navegación. Estas combinaciones pueden ser marcación y distancia, marcación y ángulo horizontal, marcación y profundidad, radiomarcación y recta de altura y otras.

1. Determinación de la posición por marcación y distancia

Para determinar la posición del buque por este método se miden dos parámetros de navegación al mismo tiempo: marcación y distancia hasta un objeto.

Al trazar en la carta las líneas isométricas correspondientes a estos parámetros de navegación en el punto de su intersección se obtiene la posición del buque (Fig. 234).

Para obtener la posición exacta del buque es necesario medir la marcación y la distancia a un mismo tiempo. En realidad cuando se determina la posición por un observador, la marcación y la distancia no se miden a un mismo tiempo, sino dentro de determinado intervalo. Esto origina el surgimiento de un error en la posición del buque. Para disminuirlo es conveniente observar determinado orden establecido para la medición de la distancia y la marcación. En primer lugar se debe medir aquel parámetro de navegación que varía con más lentitud:

- Si el objeto por el cual se determina la posición se encuentra en una marcación relativa cerca de 0° ó 180°, entonces primero se toma la marcación y luego se mide la distancia.

- Si el objeto se encuentra cerca del **TRAVÉS** primero se mide la distancia y luego se toma la marcación. En uno u otro caso se cumple la condición: **primero se mide la magnitud que varía más lentamente.**

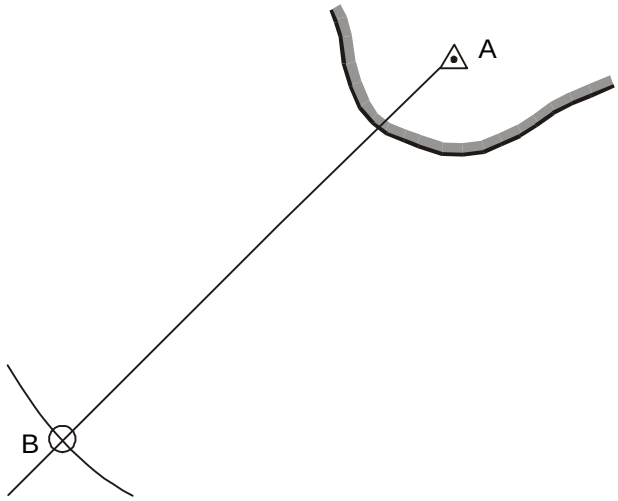


Fig. 234 Determinación de la posición por marcación y distancia

Si el intervalo de tiempo entre los momentos de medición de la marcación y la distancia es lo suficientemente grande, entonces es necesario reducir las líneas isométricas a un punto de observación.

Las construcciones gráficas y las anotaciones en la carta se realizan de la misma forma que en los métodos anteriores de determinación de la posición por marcaciones o distancias. Las anotaciones en el cuaderno de guardias de navegación se realizan por el modelo:

10	12	Lc=24,2 Faro Sur - 215,0°, Δg = +1,0°, Dc=44cables
-	-	ΔD =0 C=60°- 0,3 millas.

2. Determinación de la posición por una enfilación y una marcación

En el caso cuando el buque se encuentra en una enfilación , para determinar la posición del buque es suficiente tomar una marcación a cualquier otro punto notable que se encuentre a un lado de la línea de la enfilación. En este caso la posición del buque será el punto de intersección de la línea de la enfilación con la marcación medida (Fig. 235).

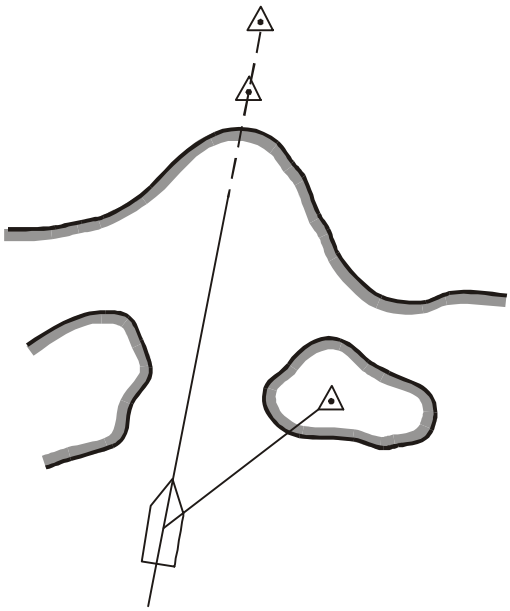


Fig. 235 Determinación de la posición por una enfilación y una marcación

Este método es cómodo porque la determinación de la posición se realiza por la medición de una sola marcación. El momento cuando el buque se encuentra en la línea de la enfilación se registra visualmente.

En el instante de determinar la posición del buque, al tomar la marcación aguja a la enfilación también se determina la corrección del girocompás (Δg).
Este método se utiliza con más frecuencia, cuando el buque navega por la línea de la enfilación en las entradas y salidas de los puertos.

3. Valoración comparativa de los métodos de determinación de la posición

Cuando se selecciona el método de determinación de la posición es necesario guiarse por el principio que la posición debe ser determinada con la mayor rápidez y exactitud posible. La selección del método para obtener la posición depende de las condiciones de navegación y de la misión que cumple el buque.

El método más exacto de determinación de la posición del buque es el método de dos ángulos horizontales. Sin embargo, esto es considerablemente trabajoso y complejo, por eso se utiliza en aquellos casos cuando se exige una exactitud en la determinación de la posición. Por ejemplo se emplea cuando se realizan trabajos de mediciones y rastreos y cuando el buque se acerca a estrechos, etc.

Al navegar en condiciones normales, lejos de peligros para la navegación es más cómodo determinar la posición por tres marcaciones o por tres distancias.

Estos métodos de determinación de la posición tiene la ventaja que son muy simples en su realización, y garantizar gran exactitud, permitiendo detectar los errores al aplicar los mismos.

La desventaja de estos métodos es que para poder determinar la posición del buque es necesario tener tres puntos de referencia que sean visibles desde el buque, lo cual no siempre es posible.

Todos los demás métodos son muy simples en su realización y garantizan la exactitud necesaria cuando se navega en condiciones normales, pero todos ellos poseen una gran desventaja, no permiten detectar las equivocaciones cometidas en la determinación de la posición. Por eso los métodos de obtención de la posición del buque por dos marcaciones, por dos distancias, por marcación y distancia y por marcaciones y distancias corridas se utilizan sólo cuando se navega en condiciones normales y cuando no se dispone de tres puntos notables visibles al buque.

CAPÍTULO VII

NAVEGACIÓN ELECTRÓNICA

Capítulo VII

NAVEGACIÓN ELECTRÓNICA

7. Empleo en la navegación de las ayudas electrónicas para determinar la posición del buque

En la actualidad, en base a los últimos adelantos de la ciencia y la técnica, se han elaborado y se utilizan diferentes sistemas y medios radiotécnicos de navegación, que permiten determinar la posición del buque en condiciones de poca visibilidad y a grandes distancias de la costa.

La historia de la utilización de la radio en la navegación comienza desde el momento de la invención, en 1885 por el científico ruso Papov, del telégrafo inalámbrico. El desarrollo impetuoso de la radiotecnia llevó a la creación de diferentes equipos de ayudas electrónicas (AEN), construidos en base a diferentes principios físicos de utilización de la radioondas, que dan la posibilidad de determinar la posición del buque con diferentes grados de exactitud en distancias de decenas, centenas y millares de millas de la costa. Con las Ayudas Electrónicas Navegación (AEN) se solucionan las siguientes tareas fundamentales:

- Aseguramiento de la navegación en condiciones especiales.

- Aseguramiento de la disposición combativa del buque en diferentes condiciones.

Las AEN se utilizan, de igual forma, en la solución de las siguientes tareas especiales:

- Determinación de los elementos de maniobrabilidad del buque.

- Aseguramiento de los trabajos hidrográficos que requieren alta exactitud.

- Mediciones hidrográficas.

- La navegación conjunta de los buques.

Las AEN modernos se pueden clasificar por dos criterios: el geométrico y el técnico.

Basándose en el criterio técnico se fundamenta el principio de funcionamiento de las AEN y sobre la base del criterio geométrico - el carácter del parámetro de navegación medido y la forma de la línea isométrica. La clasificación de las AEN por el criterio geométrico es la siguiente:

1. Azimutales o goniómetros. Con ayuda de estos sistemas se determinan las marcaciones (radiomarcaciones) a las estaciones de radio que se encuentran trabajando. A ellos se relacionan las estaciones de abordo y costeras asi como los radiofaros de acción direccional (de enfilación).

2. De distancia o radiotelemétricos.

Con ayuda de estos sistemas la posición del buque se determina por la medición de distancias hasta las fuentes de irradiación de ondas electromagnéticas (radiotelémetros y radiocorrederas)

3. Azimutal - telemétrico (combinados).

A ellos pertenecen las estaciones de radiolocalización de los objetos.

4. De diferencias de distancias (Sistemas de Radionavegación Hiperbólicos - SRNH).

Con estos sistemas se mide la diferencia de distancias hasta dos estaciones costeras (por ejemplo el sistema "Loran") o se mide la variación de la diferencia de distancia (sonda fásica)

La selección de uno u otro sistema de radionavegación (SRN) para la solución de la tarea planteada al buque se determina por las condiciones concretas.

7.1 Determinación de la posición del buque con ayuda del radiogoniómetro

Para la determinación de la dirección desde el buque hacia el radiofaro se necesita un radiofaro de acción circular y un radiogoniómetro a bordo. El radiofaro de acción circular representa un radiotransmisor que trabaja en determinado diapasón de ondas con un mecanismo automático para conectarlo de acuerdo a una programación.

El radiofaro tiene la característica de emitir las radioondas en todas las direcciones en el plano horizontal.

Para que sea más fácil el trabajo con los radiofaros la longitud de onda de trabajo, el tiempo y frecuencia de trabajo están estrictamente predeterminados. Los radiofaros trabajan independientes o en grupos. Las coordenadas y características de los radiofaros y sus horarios de trabajo se señalan en los cuadernos de radiofaros.

Se denomina radiogoniómetro al receptor que permite determinar la dirección a la estación transmisora o al radiofaro por las ondas que llegan desde ellos.

La determinación de direcciones hacia los radiofaros de acción circular con ayuda del radiogoniómetro se denomina **radiogoniometría.**

1. Formas de las líneas isométricas para diferentes casos en la medición de radiomarcaciones

Los radiofaros y los radiogoniómetros pueden ser utilizados en dos variantes:

a) Variante de la intersección radial directa. Desde las estaciones radiogoniométricas costeras se mide la direccion de las ondas electromagnéticas emitidas por un transmisor instalado en el buque. En este caso la línea isométrica será un arco de círculo máximo: la ortodromia, que pasa por la posición del buque y la estación radiogoniométrica. En esta variante, la dirección medida se denomina ***radiodemora del buque.**

En realidad la radioonda se propaga por el camino más corto desde el buque a la estación radiogoniométrica, es decir por el arco de círculo máximo.

El ángulo esférico que se forma en la posición de la estación radiogoniométrica entre la mitad norte del meridiano verdadero y el arco círculo máximo (ortodromia) que une la posición del buque y el radiofaro se llama **radiomarcación ortodrómica** RM_o (Fig. 236).

Supongamos que la estación radiogoniométrica se encuentra en el punto RF y el buque, en ese momento mide la radiodemora RM_o, en el punto B_1. En la figura se observa que en cualquier punto de la línea de la ortodromia (B_2, B_3, etc) que se encuentre el buque, el observador que se encuentre en el radiofaro detectará al buque en radiodemora RM_o. El arco del círculo máximo $RFB_4B_3B_2B_1$ será la línea isométrica en la medición de la radiodemora RM_o.

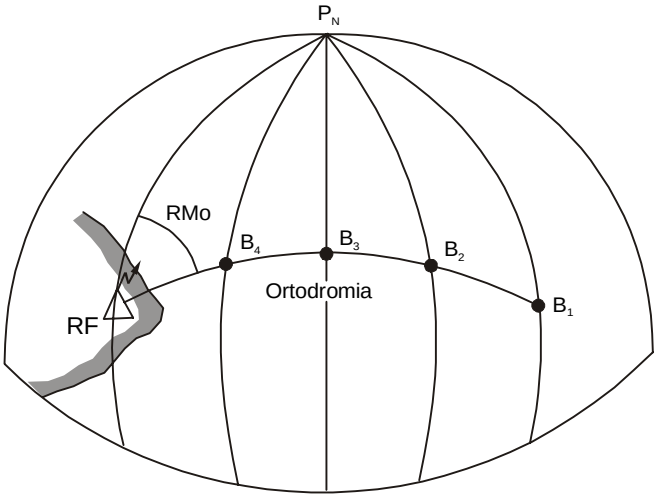


Fig. 236 Radiomarcación ortodrómica

La variante de la intersección radial directa tiene la ventaja que en la costa se pueden utilizar equipo más complejo para la recepción que en el buque, permitiendo su intalación en condiciones más favorables y a su vez alejarla de las fuentes que crean errores y deformaciones. La dirección al buque se puede obtener con mayor exactitud y a mayor distancia.

Entre las desventajas se puede señalar que la posición no la obtiene el navegante, sino los observadores de la costa, por lo que el navegante no tiene la posibilidad de controlar los datos de la estación costera. Para obtener la posición en el buque debe trabajar su radioestación en la transmisión, lo que lo desenmascara. Por eso esta variante se utiliza con poca frecuencia y sólo en los buques de transporte que no tienen a bordo radiogoniómetros.

b) Variante de la intersección inversa. Con ayuda del radiogoniómetro de a bordo se mide la dirección (**radiomarcación**) a la estación costera: el radiofaro. En este caso la onda electromagnética del radiofaro se propaga hacia el buque de igual forma por la menor distancia, es decir por la ortodromia (Fig. 237). Sin embargo, en este caso la ortodromia no será la línea isométrica. Ciertamente en el caso dado el buque se encuentra en el punto B_1 y la radiomarcación será A_1. Tomemos una serie de puntos en la ortodromia: B'_2, B'_3, etc. En el punto B'_2 la radiomarcación será $A'_2 \neq A'_1$; en el punto B'_3 la radiomarcación será $A'_3 \neq A'_2$ es decir que en cada punto de la ortodromia la radiomarcación desde el buque hacia el radiofaro tendrá su valor, ya que la ortodromia generalmente corta los meridianos con diferentes ángulos.

De esta forma, al medir las radiomarcaciones desde el buque hacia el radiofaro, la ortodromia no será la línea de radiomarcaciones iguales. Sin embargo, en cualquier meridiano se pueden encontrar tales puntos (B_1, B_2, B_3, etc) , en los cuales la radiomarcación desde el buque hacia el radiofaro será igual, es decir que los ángulos entre el plano del meridiano verdadero y el plano del arco de círculo máximo que pasa por el radiofaro y el buque serán constantes:

$$A_1 = A_2 = A_3 = \text{constante.}$$

* *Debemos aclarar al lector que en Cuba llamamos **marcación verdadera** al azimut del objeto marcado: a esto se le llama en **España** y otros paises **Demora** y en ellos se entiende por **marcación** a lo que en Cuba llamamos **marcación relativa,** esto es, el ángulo que forma la línea proa - popa del buque con la visual del objeto marcado y sin tener en cuenta el rumbo. Así pues la **Radiomarcación** la consideramos como **verdadera**. Siempre que no se indiqueque es relativa (N.R.).*

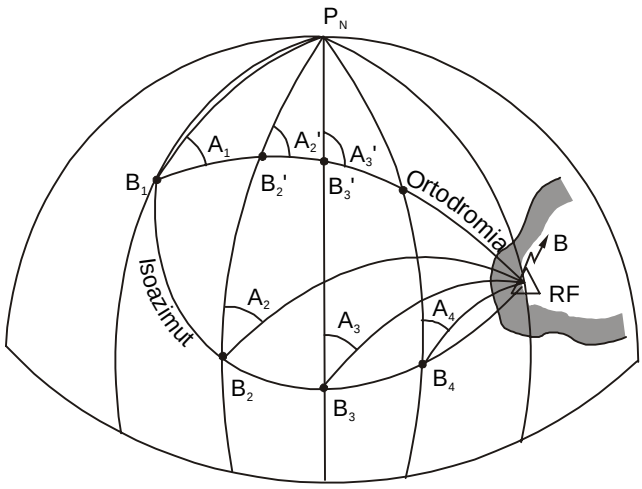


Fig. 237 Isoazimut

La curva que pasa por los puntos B_1, B_2, B_3, etc, representa una línea de iguales valores de la radiomarcación medida. Desde cualquier punto de esta curva se medirá el mismo parámetro de navegación , es decir que la curva señalada será una línea isométrica. La curva compleja formada por los lugares geométricos de los puntos que corresponden a valores iguales de las radiomarcaciones medidas desde el buque hacia el radiofaro se llama **isoazimut.**

La variante de utilización del radiogoniómetro de a bordo para medir las radiomarcaciones a los radiofaros es la más utilizada en la práctica de navegación y tiene las siguientes ventajas:

- La posibilidad de medir radiomarcaciones a los radiofaros que no son visibles desde el buque.

- El navegante tiene la posibilidad de determinar varias veces su posición y de esta forma estar seguro de ella.

- La radiomarcación en el buque se toma por el mismo navegante no se ve obligado a hacer pedidos especiales para en caso de necesidad repetir la determinación de la posición.

- Varios buques a la vez pueden tomar radiomarcaciones al mismo radiofaro, independientemente de su número.

Entre las desventajas se pueden señalar las siguientes:

- Poca estabilidad a las interferencias.

- Una exactitud relativamente baja en las radiomarcaciones.

De esta forma en la intersección directa, cuando el radiogoniómetro es inmóvil, la línea isométrica será la ortodromia.

En la intersección inversa, cuando el radiogoniómetro es móvil, la línea isométrica será el isoazimut.

7.2 Ecuación de los isoazimutes

Supongamos que el buque se encuentra en el punto B_1. A - es la radiomarcación al radiofaro RF. En los puntos B_2, B_3, B_4, etc, la radiomarcación también tiene igual valor de A. Tracemos a través de ellos el isoazimut y consideremos su carácter (Fig. 238),. La ecuación del isoazimut se puede deducir del triángulo esférico BP_NRF, si utilizando la fórmula de la cotangente de trigonometría esférica obtenemos la siguiente expresión:

$$\cot A \operatorname{sen}\Delta\lambda = \tan\varphi_{RF}\cos\varphi_B - \operatorname{sen}\varphi_B\cos\Delta\lambda; \qquad (192)$$

donde: $\cot A = \tan\varphi_{RF}\cos\varphi_B \csc\Delta\lambda - \cot\Delta\lambda \operatorname{sen}\varphi_B,$

φ_{RF} - Latitud de radiofaro

φ_B - Latitud de un punto arbitrario B (el buque en el isoazimut.

$\Delta\lambda = \lambda_{RF} - \lambda_B$ - Diferencia de longitud entre el radiofaro y el punto B.

A - Azimut (radiomarcación).

En la ecuación del isoazimut se observa que la radiomarcación A, la latitud y la longitud del radiofaro son magnitudes constantes, siendo φ_By λ_B las coordenadas actuales que dependen de la posición del buque. La posición del isoazimut sobre la superficie de laTierra se determina por las coordenadas del radiofaro φ_{RF} y λ_{RF} y la magnitud de la radiomarcación medida hasta él. Por lo tanto, teniendo el valor de φ_B se puede calcular por la fórmula el valor de λ_B y viceversa. Luego por las coordenadas obtenidas se construye en la carta de cualquier proyección la curva del isoazimut.

Cuando se mide la radiomarcación desde el buque hacia el radiofaro para obtener la línea isométrica correspondiente a las observaciones, es necesario pasar del valor de la radiomarcación ortodrómica A a la dirección del isoazimut.

En la figura se observa que la dirección del isoazimut en el punto dado se determina por el ángulo R, tomado en sentido horario desde la mitad norte del meridiano verdadero hasta la dirección de la recta, que es tangente al isoazimut en dicho punto.

Simbolicemos el ángulo entre la ortodromia y el isoazimut en el punto B por (i), entonces:

$$R = A + i \qquad (193)$$

Por lo tanto para la determinación de R es suficiente calcular el ángulo (i), que se determina por la fórmula:

$$\tan i = \tan(\lambda_{RF} - \lambda_B)\operatorname{sen}\varphi_B \qquad (194)$$

donde:

λ_{RF} - Longitud del radiofaro

λ_m - Longitud del punto B.

φ_B - Latitud del punto B.

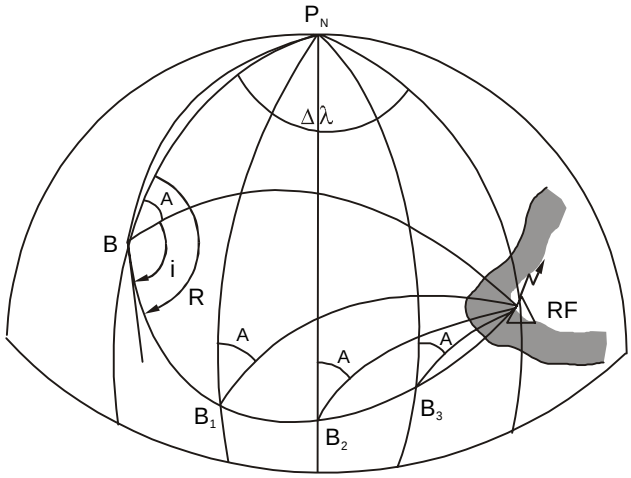


Fig. 238 Propiedades del isoazimut

De la fórmula (194)se observa que el ángulo (i) está en función de la latitud de la posición del buque φ_B y la diferencia de longitud entre el buque y el radiofaro. Esta fórmula permite calcular la magnitud y signo del ángulo (i) entre el isoazimut y la ortodromia en el punto dado (B).

Cuando la diferencia longitud y el ángulo (i) son pequeños se puede asumir que:

$$\tan(\lambda_{RF} - \lambda_B) = (\lambda_{RF} - \lambda_B)°arc1° = (\lambda_{RF} - \lambda_B)'arc1'$$

$$\tan i = 1°arc1° = 'arc1';$$

entonces,

$$i° = (\lambda_{RF} - \lambda_B)\,sen\varphi_B \qquad (195)$$

De esta forma la dirección del isoazimut en el punto dado B puede ser calculado por la radiomarcación medida y el ángulo (i):

$$R = A + i$$

El isoazimut siempre pasa por el polo; por la posición del buque y por el radiofaro.

Cuando la radiomarcación ortodrómica A = 0° ó 180° el isoazimut se convierte en un círculo máximo.

7.3 Corrección de las radiomarcaciones. Corrección ortodrómica

La determinación de la dirección de la onda electromagnética que llega desde el radiofaro se realiza con ayuda del radiogoniómetro de a bordo.

El ángulo entre el plano diametral del buque y la dirección hacia el radiofaro se llama **radiomarcación relativa RMr**. Este ángulo se mide en sentido horario de 0° a 360°.

Sin embargo, además de la antena del radiogoniómetro, la jarcia metálica del buque, su superestructura, el casco etc, son capaces de recibir las ondas electromagnéticas y nuevamente irradiarlas al espacio. Esta irradiación se llama **"secundaria"**: La irradiación secundaria al sumarse con la onda electromagnética que llega al radiofaro deforma su dirección. Este error en la dirección medida a causa de la irradiación secundaria depende de la marcación relativa de la onda del radiofaro y se denomina **radiodesvío** (f). El radiodesvío es el ángulo entre la dirección verdadera hacia el radiofaro y la dirección medida por el radiogoniómetro (Fig. 239).

En los radiogoniómetros el radiodesvío se compensa por aditamentos especiales. El radiodesvío residual se determina prácticamente, es decir por la comparación de las marcaciones relativas visuales Mr y las lecturas de las radiomarcaciones relativas RMr. Luego se construye la curva del radiodesvío y se confecciona la tabla cada 10° ó 15° de RMr.

La determinación de la dirección de la onda electromagnética del radiofaro en los radiogoniómetros modernos se realiza de dos formas:

- En los radiogoniómetros que poseen repetidor de girocompás. Por el disco azimutal exterior se toma la lectura de la radiomarcación relativa LRMr y por el disco azimutal interior la lectura de la radiomarcación LRMo.

- En los radiogoniómetros que no poseen repetidor del girocompás se toma sólamente LRMr.

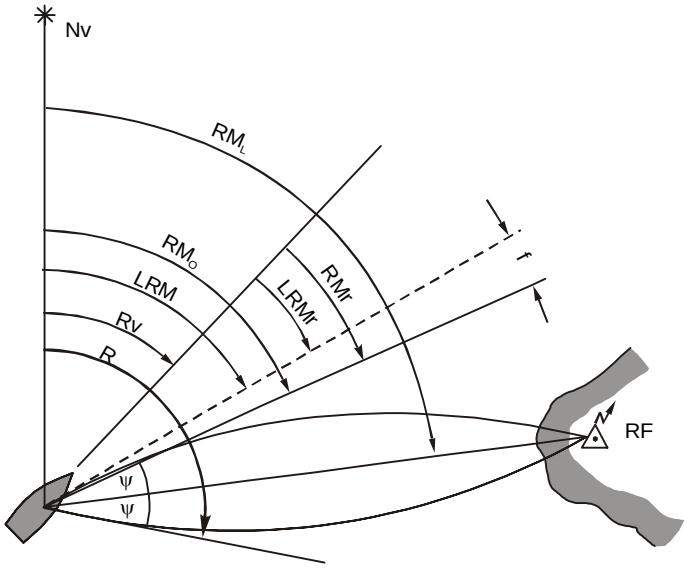


Fig. 239 Radiodesvío

De esta forma el valor de la radiomarcación relativa o la radiomarcación tomados del radiogoniómetro es necesario corregirlos aplicandole radiodesvío.

$$RMr = LRMr + f$$

Para obtener la radiomarcación ortodrómica, es decir, la dirección de la onda electromagnética con relación al meridiano verdadero, es necesario tener en cuenta el rumbo aguja del buque en el momento de medirse la radiomarcación y la corrección del compás:

$$RMo = LRMr + f + Rg + \Delta g \quad \text{ó} \qquad (196)$$

$$RMo = LRMo + f \qquad (197)$$

En la carta náutica de proyección Mercator la ortodromia se representa por una curva con su convexidad dirigida hacia el polo más cercano. La loxodromia se representa por una línea recta que forma ángulos iguales con los meridianos. El ploteo de la ortodromia en la carta es muy trabajoso y no puede ser realizado con ayuda de los instrumentos comunes de ploteo. Es más rápido y menos complejo trazar en la carta la loxodromia en lugar de la ortodromia, que pasa de igual forma por el radiofaro y la

posición del buque. Ya que, como resultado de la toma de radiomarcaciones siempre obtenemos la radiomarcación ortodrómica y ploteamos la radiomarcación loxodrómica, surge la necesidad de convertir las radiomarcaciones ortodrómicas (RM_0) en loxodrómicas RM_L. Esta conversión se realiza aplicando la corrección ortodrómica.

El ángulo entre la ortodromia y la loxodromia en un punto dado de una carta de proyección Mercator se llama **corrección ortodrómica** y se representa por la letra griega (Ψ).

El valor de la corrección ortodrómica se puede determinar por la **semejanza de meridianos** (Fig. 240).

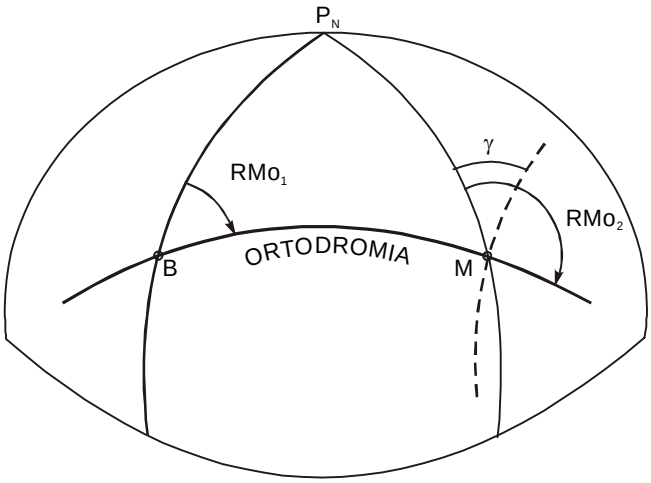


Fig. 240 Semejanza de los meridianos

Los ángulos esféricos RMo_1 y RMo_2, comprendidos entre la ortodromía y los meridianos en los puntos dados, no son iguales. La diferencia de estos ángulos se llama **semejanza de meridianos** y se representa por la letra griega (γ):

$$\gamma = RMo_1 - RMo_2$$

De la teoría de la cartografía se conoce que el ángulo de semejanza de los meridianos aproximadamente es igual a la diferencia de longitud de los puntos dados, multiplicada por el seno de la latitud media:

$$\gamma = (\lambda_2 - \lambda_1) \text{ sen } \varphi_m \qquad (198)$$

Las unidades y el signo de γ coinciden con las unidades y el signo de la diferencia de la longitud. Mostremos en la carta de proyección Mercator la posición del buque B y el radiofaro RF y tracemos por ellos arcos de ortodromia y loxodromia. Entonces la curvatura de la ortodromia es prácticamente tal, que las correcciones ortodrómicas - los ángulos ψ_1 y ψ_2 entre las tangentes a la ortodromia en los puntos B y RF y la loxodromia no son iguales (Fig. 241). Igualando los ángulos ψ_1 y ψ_2, al mismo tiempo estamos considerando el arco de ortodromia como parte de una circunferencia. A causa de esto, el error en la corrección ortodrómica puede alcanzar el valor hasta 0,1° a una distancia entre los puntos de alrededor de 500 millas. En la actualidad la determinación segura de la posición del buque por los radiofaros circulares es posible para distancias no mayores de 150 - 200 millas. Por eso el error en la corrección ortodrómica puede ser despreciado, es decir puede considerarse que ψ_1 y $\psi_2 = \psi$.

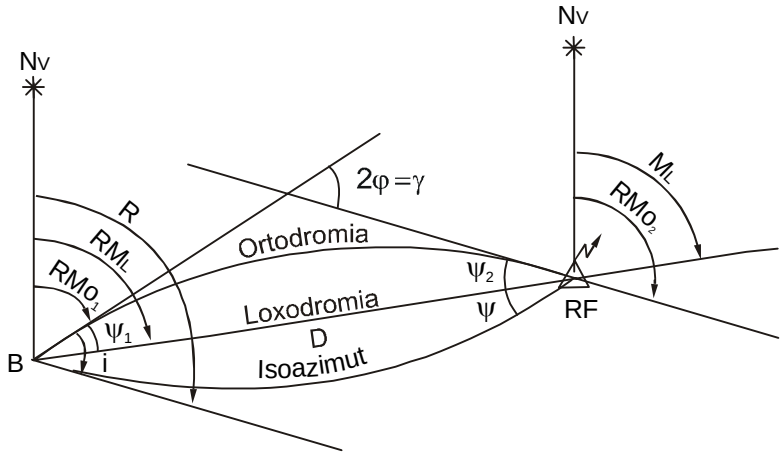


Fig. 241 Corrección ortodrómica

En la figura se ve que:

$$\psi = RM_L - RMo_1$$

$$+$$

$$\psi = RMo_2 - RM_L$$

$$2\psi = RMo_2 - RMo_1$$

pero, $$\psi = \frac{RMo_2 - RMo_1}{2}$$

haciendo $$2\psi = \gamma, \quad \psi = \frac{\gamma}{2}; \quad \psi = \frac{1}{2}\Delta \text{sen}\varphi_m \qquad (199)$$

Simbolizando la longitud del segmento de la loxodromia entre los puntos B y RF por D y utilizando las fórmulas de la estima analítica obtenemos:

$$\psi = \frac{1}{2} D \text{sen} ML \tan\varphi_m \qquad (200)$$

El análisis de esta fórmula muestra que la corrección ortodrómica depende de la combinación de D y el sen ML. Cuanto más próxima esté la radiomarcación al este o al oeste, y mayor sean D y la latitud, mayor será la corrección ortodrómica.

El signo de la corrección ortodrómica depende del signo de la diferencia de longitud entre el radiofaro y buque.

Para el hemisferio norte, cuando $\Delta\lambda = \lambda_R - \lambda_B$ es hacia el este ψ tiene signo (+); cuando $\Delta\lambda = \lambda_{RF} - \lambda_B$ es hacia el oeste ψ tiene signo (-). Por consiguiente, en el hemisferio norte la corrección ortodrómica tiene signo más (+), si el buque se encuentra al oeste del radiofaro y tiene signo menos (-) si el buque se encunetra al este del radiofaro, o sea:

$RMo < 180°$ ψ (+); $RMo > 180°$ ψ (-)

La ortodromia tanto en el hemisferio norte como en el sur tiene su convexidad dirigida hacia los polos, por eso en el hemisferio sur la corrección ortodrómica varía su signo por el contrario. La veracidad de la regla sobre el signo de la corrección ortodrómica se puede comprobar por la figura 242.

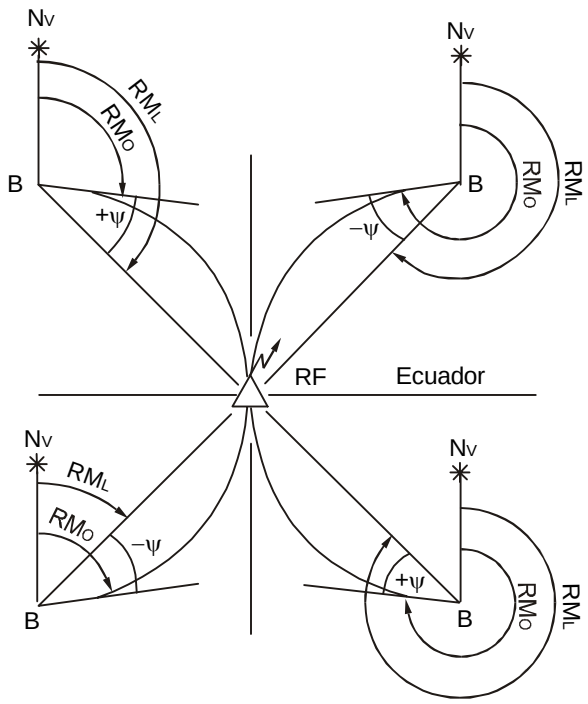


Fig. 242 Determinación del signo de la corrección ortodrómica

De esta forma, para el ploteo de la radiomarcación obtenida es necesario calcular la radiomarcación ortodrómica y corregirla en ψ. Como resultado obtenemos la radiomarcación loxodrómica, que se plotea en la carta náutica:

$$RM_L = RMo + \psi \qquad (201)$$

Si la corrección ortodrómica es mayor de 3,0°, se calcula la dirección del isoazimut R.

Es conocido que:

$$R = A + i; \qquad i = (\lambda_{RF} - \lambda_B) \text{ sen } \varphi_B,$$

donde:

A - Radiomarcación ortodrómica.

i - Ángulo entre la ortodromia y el isoazimut.

La corrección ortodrómica será:

$$\psi = \frac{1}{2}(\lambda_{RF} - \lambda_B)\varphi_m$$

por eso $i = 2\psi = \gamma$

El ángulo entre la ortodromia y el isoazimut es igual a la semejanza de los meridianos o al doble de la corrección ortodrómica.

En una carta de proyección Mercator el isoazimut y la ortodromia son simétricos con relación a la loxodromia que pasa por dos puntos comunes. Ya que $i = 2\psi$, y el ángulo entre la ortodromia y el isoazimut es igual a ψ , entonces entre la loxodromia y el isoazimut se formará, por consiguiente, el ángulo ψ. Esta simetría se mantiene hasta distancias 1000 - 1500 millas al radiofaro. **A mayor distancias entre el radiofaro y el buque la simetría del isoazimut y la ortodromia no se mantiene:**

Finalmente:

$$R = RM_L + \psi = RMo + 2\psi. \qquad (202)$$

En la exactitud de medición de las radiomarcaciones además del radiodesvio influyen los siguientes factores:

- Error en la intalación del radiogoniómetro.

- La refracción costera.

- Los errores de polarización.

- Los errores casuales en la observación.

Error en la instalación del radiogoniómetro. La situación inexacta de la antena de cuadro en el plano diametral del buque origina errores en la radiomarcación. La desviación del cuadro no debe sobrepasar 1,0°. Este error se introduce en el radiodesvío como de una magnitud constante. A los errores del equipo les es inherente el efecto de antena, que surge cuando el cuadro recibe las radiondas como una antena abierta. El efecto de antena se compensa con una antena auxiliar.

Errores de polarización: En el cuadro del radiogoniómetro de noche actúan no sólo las radioondas que se propagan sobre la superficie de la Tierra, sino también las radiondas reflejadas en la ionósfera. El campo electromagnético del radiofaro se deforma, lo que trae consigo errores en la radiomarcación. Los errores de polarización son principalmente grandes en las horas de salida y puesta del Sol. En estas horas las radiomarcaciones a los radiofaros que se encuentra a distancias mayores de 20 millas no son confiable. De noche las radiomarcaciones son seguras a distancias de 25 a 30 millas.

La refracción costera surge por la heterogeneidad de la superficie de propagación de las ondas. La variación de la dirección de propagación de las radioondas al interceptarse éstas con la línea de la costa se llama **refracción costera.** Esta toma valores considerables para ángulos obtusos entre la radiomarcación y la línea de costa y a pequeñas diatancias entre el buque y la costa. A distancias mayores de 10 longitudes de onda (Los radiofaros transmiten en frecuencia media -285 a 325 kHz- que corresponde a longitudes de onda 923 a 1023 metros), el error en la radiomarcación por la refracción costera prácticamente no existe.

Errores casuales en la observación. A ellos se refieren:

- El error en el ángulo de silencio ± 0,5°.

- Error en la corrección del compás ± 0,3°.

- error en el valor del radiodesvío ± 0,5°.

- errores subjetivos que dependen de la preparación del observador.

De acuerdo a esto el error cuadrático medio en la observación para los radiogoniómetros modernos puede ser tomada aproximadamente igual a 1° - 3° cuando se toma la radiomarcación auditiva e igual a 0,5° - 0,4° cuando la radiomarcación es automática.

7.4 Cálculo y ploteo de las radiomarcaciones

Anteriormente quedamos en que, en la medición de radiomarcaciones, el isoazimut es la línea isométrica. Por consiguiente, cuando se determina la posición por radiomarcaciones el buque se encontrará en el punto de intersección de los isoazimutes o de los segmentos tangentes a ellos. la dirección del isoazimut se determina por la expresión:

$$R = A + i = A + 2\psi,$$

donde: $\psi = \frac{1}{2} D \operatorname{sen} ML \tan\varphi_m$.

Como podemos observar, la corrección ortodrómica depende de los valores de D, RML, ψ_m.

En dependencia de la magnitud de la corrección ortodrómica existen tres métodos de cálculo y ploteo de la línea de posición mediante radiomarcaciones:

- La corrección ortodrómica ψ no es mayor de 0,3°.

- La corrección ortodrómica ψ = 0,3° - 3,0°.

- La corrección ortodrómica ψ > 3,0°

La división de los métodos de cálculo y ploteo de la línea de posición debe hacerse exclusivamente por el valor de la corrección ortodrómica y no por la magnitud de la distancia hasta el radiofaro. Por lo tanto, para una misma corrección ortodrómica ψ = 0,3° y marcación lóxodromica 90 - 270 en φ = 60 - 72 la distancia hasta el radiofaro será aproximadamente 20 millas, y en φ = 20 - 25° la distancia hasta el radiofaro será cerca de 100 millas. Detengámonos en los métodos mencionados para la determinación de la línea de posición:

a) $\psi \leq 0{,}3°$

En este caso el valor de la corrección ortodrómica no pasa de 0,3° y por eso el isoazimut puede ser sustituido por la ortodromia sin errores muy acentuados. La marcación ortodrómica se plotea en la carta sin aplicar la corrección ortodrómica.

Formato para los calculos:

$$\begin{array}{rrl} & LRM_r & = \\ + & f & = \\ \hline & RM_r & = \\ + & R_{ag} & = \\ & \Delta g & = \\ \hline & RM_o & = \end{array} \qquad \begin{array}{rrl} & LRM & = \\ + & \Delta g & = \\ & f & = \\ \hline & RM_o & = \end{array}$$

b) $0{,}3° \leq \psi \leq 3{,}0°$.

La corrección ortodrómica se encuentra en los límites entre 0,3 - 3,0°.

Para simplificar el trabajo de ploteo de las radiomarcaciones consideramos que el isoazimut coincide con la línea de la marcación loxodrómica.

La radiomarcación loxodrómica se calcula por el formato:

c) $\Psi > 3{,}0°$

	LRM_r	=		LRM =
+	f	=	+	Δ_g =
	RM_r	=		f =
+	R_{ag}	=		RM_o =
	Δ_g	=		ψ =
	RM_o	=		RM_L =
	ψ	=		
	RM_L	=		

La corrección ortodrómica es mayor de 3,0°. En este caso no se puede despreciar la curvatura del isoazimut y la posición del buque se obtiene en el punto de intersección de los isoazimutes. La dirección del isoazimut en la zona de la posición de estima se obtiene según formato:

	LRM_r	=		LRM	=
+	f	=	+	Δ_g	=
	RM_r	=		f	=
+	R_{ag}	=		RM_o	=
	Δ_g	=	+	ψ	=
	RM_o	=		RM_L	=
+	ψ	=	+	ψ	=
	RM_L	=		R	=
+	ψ	=			
	R	=			

El ploteo de los segmentos de isoazimut puede ser realizado por el método de la normal a la radiomarcación loxodrómica. Para ello, según el formato, se calcula la RM_L. que se plotea en la carta desde el radiofaro. Desde la posición de estima del buque (punto e) se traza una perpendicular a la M_L y se halla el punto determinante B (Fig. 243). Por el punto determinante se traza el segmento de isoazimut aa', cuya dirección será $R = RM_L + \psi$. El signo de la corrección ortodrómica para la conversión de RM_o en RM_L y en R es el mismo. El alcance de la mayoria de los radiofaros de acción circular en la actualidad, , para la radiomarcación segura, se limita a la distancia 100 - 150 millas. Para tales distancias la corrección ortodrómica se encuentra en los límites de 0,5° - 1,0°. Por eso en lugar del isoazimut se plotea la radiomarcación loxodrómica. El error en tal sustitución es tan pequeño que se puede despreciar.

Si la posición del radiofaro se encuentra en los límites de la carta, el ploteo de la línea de posición se realiza de la misma forma que cuando se determina la posición por marcaciones visuales.

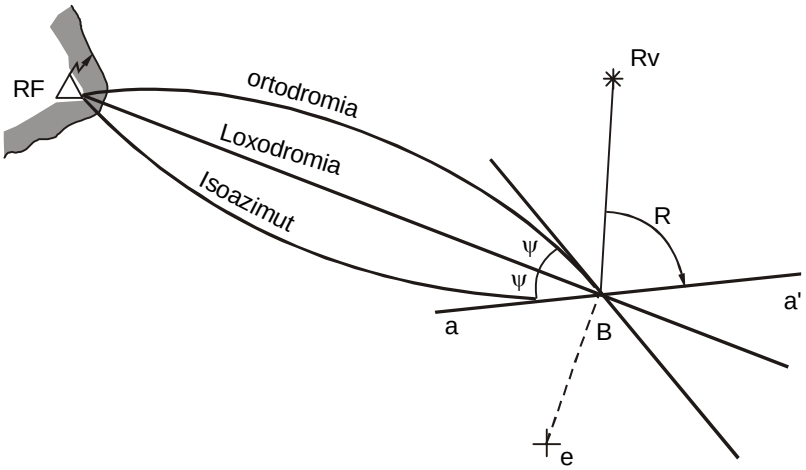


Fig. 243 Ploteo de los segmentos del isoazimut por el método de la normal a la marcación loxodrómica

En dependencia del valor de la corrección ortodrómica se plotea la radiomarcación ortodrómica o loxodrómica.

Con frecuencia nos encontramos casos cuando elradiofaro se encuentra fuera de los límites de la carta. Para estos casos existen los siguientes métodos de ploteo de la radiomarcación.

a) Con ayuda de una carta general. Para el ploteo de la radiomarcación se puede tomar una carta de una escala más pequeña, en la cual se encuentra el radiofaro y la posición del buque. En esta carta se realiza el ploteo de las radiomarcaciones. El error en las construcciones gráficas crecerá pero no superarán los errores de observación. La posición obtenida se traslada a un cuarterón.

b) Método grafo - analítico. La esencia de este método consiste en el cálculo de las coordenadas del punto determinante B, que se encuentra sobre la línea de la radiomarcación loxodrómica en los límites de la carta. A través de este punto se traza la línea isométrica.

1. Método de las longitudes. Como punto determinante B, tenemos el punto de intersección de la radiomarcación loxodrómica con la latitud de la posición de estima **e** (si la RM_L se corta con el meridiano con un ángulo agudo) (Fig. 244). Entonces $\varphi_B = \varphi_c$. Determinemos la longitud del punto determinante λ_B. En el triángulo BNRF el lado RFN= $\Delta\lambda$, por eso:

$$\lambda_B = \lambda_{RF} \pm \Delta\lambda$$

donde:

λ_{RF} - Longitud del radiofaro

Del triángulo BNRF obtenemos:

$$NRF = BN \tan M_L,$$

pero: NRF $\Delta\lambda$, y BN = ΔPM,

entonces:

$$\Delta\lambda = \Delta PM \tan RM_L ;$$

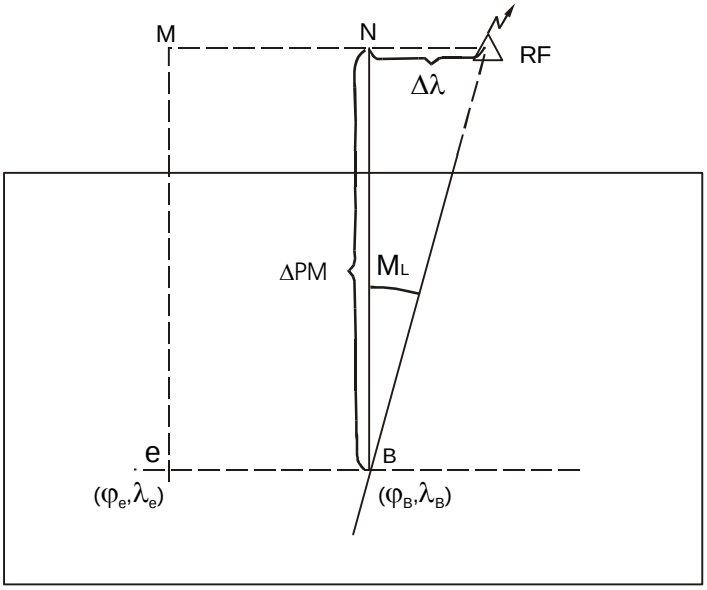


Fig. 244 Método de las longitudes

$\Delta PM = PM_{RF} - PM_e$; $\Delta\lambda = (PM_{RF} - PM_e)\tan M_L$

Por consiguiente:

$$\lambda_B = \lambda_{RF} \pm (PM_{RF} - PM_e) \tan M_L \qquad (203)$$

De acuerdo a las coordenadas φ_B y λ_B del punto determinante B, ploteamos éste en la carta y por él trazamos la RM_L ó $R = RM_L + \varphi$.

2. Metodo de las latitudes. Este se utiliza en aquellos casos cuando la marcación loxodrómica corta los meridianos con un ángulo > de 45° (Fig. 245). Por el punto determinante se toma el punto de intersección de la marcación loxodrómica con el meridiano de la posición de estima. Entonces la longitud del punto B será igual a la longitud de la posición de estima $\lambda_B = \lambda_A$. Su latitud se determina del triángulo NRFB.

$$NRF = \Delta PM = PM_{RF} - PM_B, \quad PM_B = PM_R \pm \Delta PM.$$

El signo (±) está en dependencia de la situación del radiofaro y el buque

$$PM_B = PM_{RF} + \Delta\lambda \tan M_L$$

De acuerdo a PM_B de la tabla TUN se seleccina el valor de φ_B. Ploteando el punto determinante por las coordenadas φ_B y λ_B, por él trazamos la marcación loxodrómica RM_L ó $R = RM_L + \varphi$ en dependencia del valor de la corrección ortodrómica.

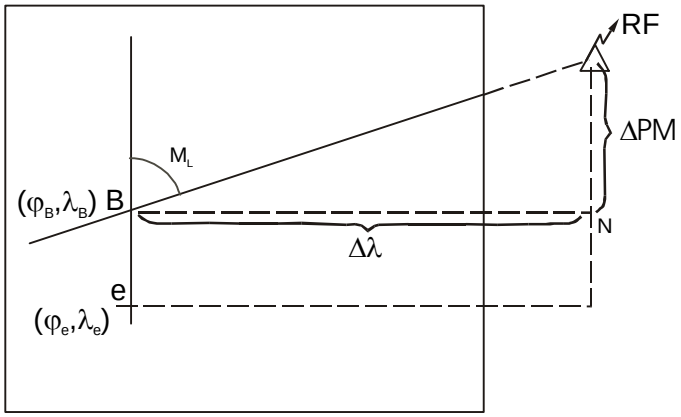


Fig. 245 Método de las latitudes

c) Método de Kovaliov. Los métodos de las latitudes y longitudes exigen realizar los cálculos de las coordenadas del punto determinante, para lo que es necesario mucha pérdida de tiempo y son posibles los errores en los cálculos. El navegante Kovaliov propuso un método más simple, basado en la búsqueda gráfica del punto determinante, que recibió el nombre de "**Método de reflejo**".

La esencia de este método consiste en que en la carta se plotea una posición arbitraria de radiofaro como el reflejo de su posición real con relación a una línea auxiliar (de reflejo). El punto determinante se encuentra en la línea de reflejo por el ploteo de una radiomarcación auxiliar, que pasa por el punto arbitrario del radiofaro. En dependencia de la posición del radiofaro con relación al marco de la carta son posible tres casos.

1. El radiofaro se encuentra a un costado del marco de la carta

Como línea de reflejo se toma el meridiano que limita la región de la carta por el lado del radiofaro aa' (Fig. 246). Calculamos la diferencia de longitud:

$$\Delta\lambda = \lambda_o - \lambda_{RF}$$

Donde:

λ_o - Longitud de la línea de reflejo.

λ_{RF}- Longitud del radiofaro.

Desde el punto Bo, hacia el interior de la carta, por el paralelo del radiofaro se traza la $\Delta\lambda$ y obtenemos el punto RF_1 - posición imaginaria del radiofaro (con esto termina la preparación preliminar de la carta). Los puntos RM_1 y B_o pueden plotearse con lápiz de color.

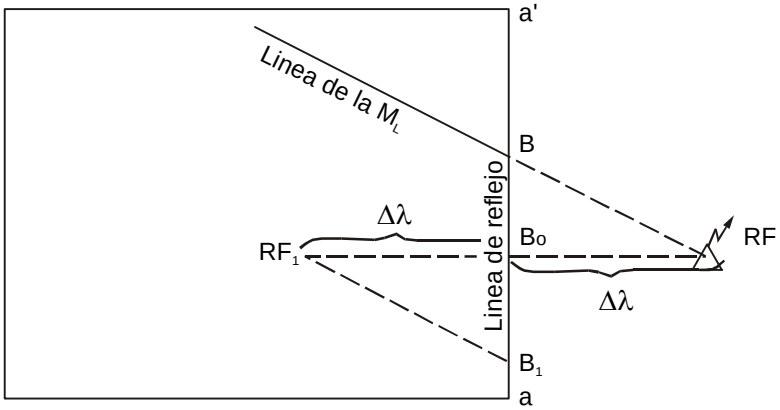


Fig. 246 El radiofaro se encuentra a un lado del marco de la carta

Ya navegando, después de medir la radiomarcación hacia el radiofaro, calculamos RM_L, desde el punto arbitrario del radiofaro RF, trazamos la línea de la radiomarcación auxiliar (una línea paralela a RM_L) hasta su intersección con la línea de reflejo aa' en el punto B_1. Después se trazar el segmento $B_1B_o = B_oB$ por la línea de reflejo aa' hacia el lado opuesto del punto B_1, encontramos el punto determinante B, por el cual trazamos la línea de la radiomarcación loxodrómica RM_L.

2. El radiofaro se encuentra en la parte superior o inferior del marco de la carta

Como línea de reflejo se toma el paralelo que límita la zona de la carta por el lado del radiofaro (Fig. 247). Se calcula la diferencia de partes meridionales entre la línea de reflejo y el paralelo del radiofaro:

$$\Delta PM = PM_{Bo} - PM_{RF}$$

Trazamos el meridiano del radiofaro. Desde el punto B_o, por el meridiano del radiofaro, hacia el interior de la carta desde la línea de reflejo dd', trazamos el valor de ΔPM en la escala de longitud de la carta y determinamos la posición imaginaria del radiofaro RF, trazamos la línea de la radiomarcación auxiliar (una línea paralela a la radiomarcación loxodrómica) hasta su intersección con la línea de reflejo en el punto B_1.

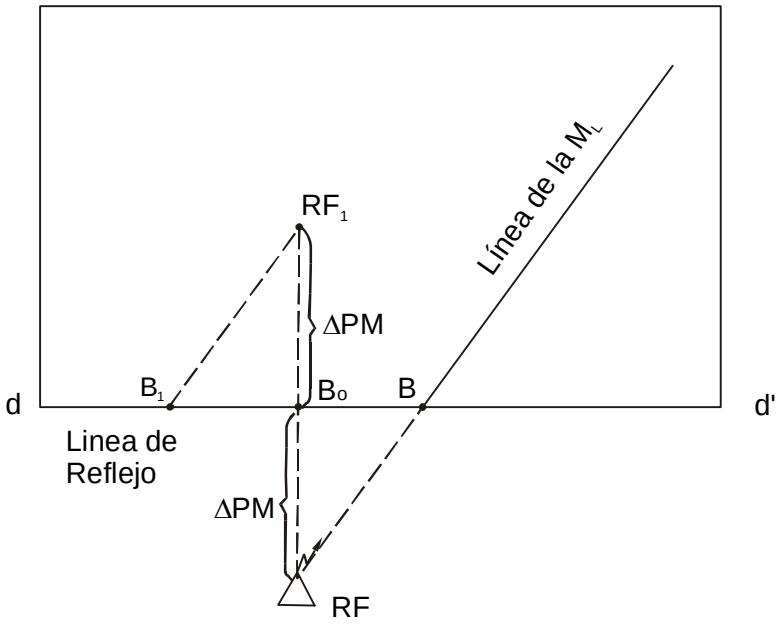


Fig. 247 El radiofaro se encuentra en la parte superior o inferior del marco de la carta

Después de trazar por la línea dd' el espacio $B_1B_r = B_1B$ hacia el lado opuesto al punto B_1 determinamos el punto determinante B, a través del cual se traza la línea de la radiomarcación loxodrómica.

3. El radiofaro se encuentra fuera de la carta y sus líneas de coordenadas no atraviesan el marco de la carta (Fig. 248)

En la carta no existe la línea de reflejo, por lo que es necesario construirla, determinando, en qué esquina se encuentra el radiofaro (RF). En la carta se señala el punto B_o, que como regla se toma en el lugar de la intersección del meridiano y paralelo más cercanos a la esquina de la carta donde se encuentra éste (se puede tomar cualquier punto). El punto B_o se toma como punto de simetría entre la posición real del radiofaro y la posición imaginaria de éste. Encontramos las coordenadas de la posición imaginaria del radiofaro con relación al punto B_o.

$$\Delta\lambda = \lambda_o - \lambda_{RF}$$

$$\Delta PM = PM_o - PM_{RF}$$

donde:

λ_o - Longitud del punto B_o

PM_o - Parte meridional del punto B_o.

De acuerdo a la $\Delta\lambda$ y ΔPM (en la escala de la carta) en la escala de longitud ploteamos la posición arbitraria del radiofaro RF_1 con relación a las líneas de coordenadas del punto B_o. Unimos los puntos RF_1 y B_oy por el punto $B_o$trazamos la línea mm_1 perpendicular a la línea RF_1B_o. La línea mm_1 será la línea de reflejo. Con esto termina la preparación de la carta que se realiza antes de salir el buque a navegar. Los puntos B_oy RF_1 y la línea de reflejo se pueden plotear con lápiz de color.

Durante la navegación, después de determinar la radiomarcación y haber calculado RM_L, se traza la línea de marcación auxiliar (paralela a la línea RM_L), que debe pasar por el punto RF_1. En la intersección de esta línea con la línea de reflejo obtenemos el punto B_1. Trazando en la línea de reflejo el segmento $B_1B_o = B_oB$ encontramos el punto determinante B. Por este punto trazamos la línea de la marcación loxodrómica RM_L.

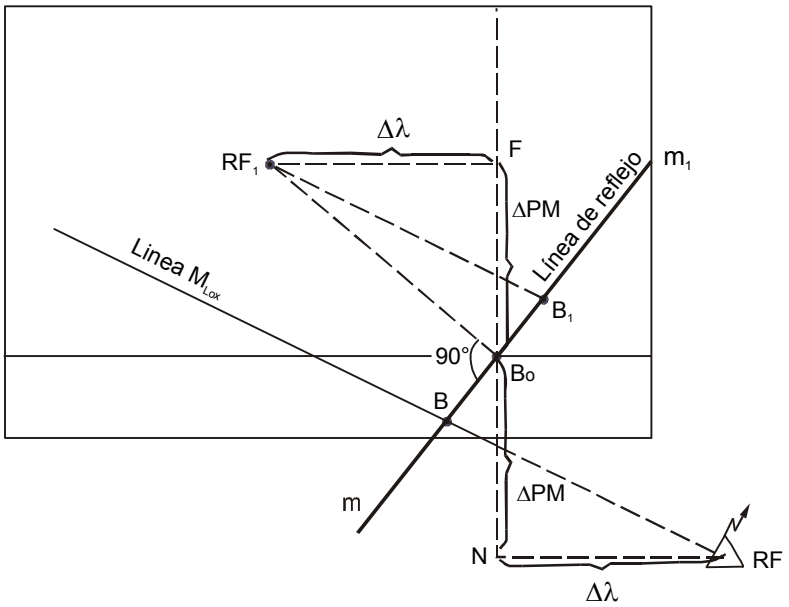


Fig. 248 El radiofaro se encuentra fuera de la carta y sus líneas de coordenadas no cortan el marco de la carta

Las investigaciones han demostrado que el error en la línea de posición en los métodos estudiados es menor que el error de ploteo en una carta general.

7.5 Métodos para la determinación de la posición por radiomarcaciones

- Por dos radiomarcaciones.

- Por tres radiomarcaciones.

- Por marcación corrida.

- Por el método combinado.

a) Determinación de la posición del buque por dos radiomarcaciones

La esencia del método no se diferencia en nada del métododе determinación de la posición por marcaciones visuales. La única diferencia radica en que las radiomarcaciones no se pueden tomar con la misma rapidez que las marcaciones visuales. Entre los momentos de medición de dos radiomarcaciones siempre existirá un gran intervalo de tiempo ya que los radiofaros no trabajan a un mismo tiempo, sino en serie, es decir uno después del otro. Además, para medir radiomarcaciones se necesita más tiempo que para medir marcaciones visuales. Como resultado de esto es necesario reducir las marcaciones a un mismo punto de observación para poderlas plotear en la carta.

Como regla nos interesa la última posición del buque, por eso se debe reducir la primera radiomarcación a la segunda. La reducción de las radiomarcaciones es más cómodo realizarla gráficamente. Desde la posición del primer radifaro se traza una línea paralela al rumbo del buque y por ella se marca el espacio ΔS que recorrió entre la medición de las radiomarcaciones. Por el punto auxiliar obtenido se traza la línea de la primera radiomarcación (al primer radiofaro). La segunda radiomarcación se traza desde la posición observada del buque. En el libro de navegación se hacen las anotaciones:

03	05	Lc=64,4. RF Gamo. LRM =310,8°,f=+0,2° Δg=+1,0°,Ψ =+0,3°
12	26	Lc=64,7. RF Askold. LRM =357,9°,f=+0,8° Δg=+1,0°,Ψ =+0,3°
-	-	φ=41°46,0'N, λ=132°25,5'E, C=266°-3,5 millas.

b) Determinación de la posición del buque por tres radiomarcaciones

De la misma forma que cuando se determina la posición por dos radiomarcaciones, aquí tambien se debe reducir las radiomarcacuiones a un momento para poderlas plotear en la carta. Todas las radiiomarcaciones se reducen al momento de toma de la tercera. Para ello desde la posición del primer radiofaro se traza la línea Rv o Re y en ella se marca el segmento ΔS_1 (figura 249);

$$\Delta S_1 = (Lc_3 - Lc_1)\ Kc$$

A traves del punto obtenido (B_1) se traza la línea de la primera marcación. Desde la posición del segundo radiofaro, de la misma forma, se traza el segmento ΔS_2:

$$\Delta S_2 = (Lc_3 - Lc_2)\ Kc$$

Por el punto obtenido B_2 se traza la línea de la segunda radiomarcación: La línea de la tercera radiomarcación se traza desde la posición del tercer rediofaro.

La posición observada se encontrará en el punto de intercepción de las tres radiomarcaciones, en la mayoría de los casos, éstas forman un triángulo de error, la búsqueda de la posición en los cuales lo estudiaremos más adelante. Las anotaciones en el cuaderno de navegación se hacen de la misma forma que en el caso anterior.

c) Determinación de la posición del buque por radiomarcación corrida

Cuando hay un solo radiofaro cerca de la posición de estima, la posición del buque se determina por el método de marcación corrida.

La técnica de realización de este método no se diferencia en nada del método de marcación corrida cuando se determina la posición por métodos visuales, sin embargo, la exactitud de la posición es menor. Debido a la gran distancia hasta los radiofaros la radiomarcación varía en un valor aproximado de 30° en un período muy largo y el error de estima entre los momentos de medición de las radiomarcaciones se introduce en la posición observada.

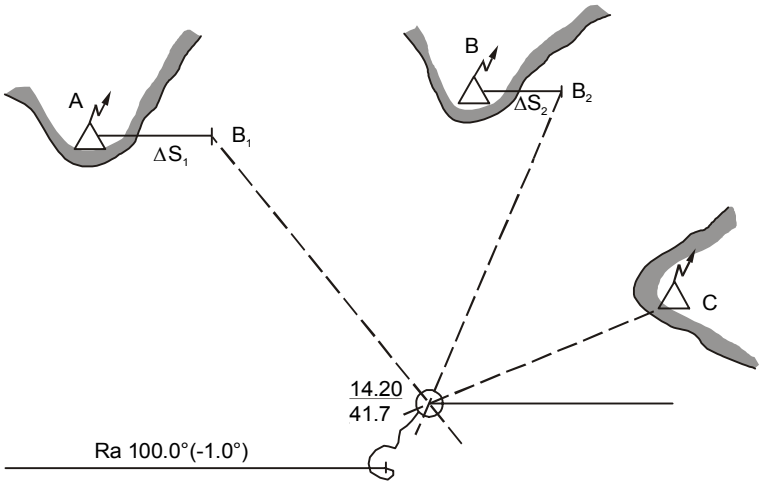


Fig. 249 Determinación de la posición por tres marcaciones

d) Métodos combinados para la determinación de la posición

En la práctica son frecuentes los casos, cuando se puede medir una sola radiomarcación a un radiofaro y al mismo tiempo determinar una recta de altura, una marcación visual, etc. Estos métodos, en dependencia de las condiciones reales, pueden ser utilizados con éxito, ya que dan resultados bastante seguros.

7.6 Búsqueda de la posición más probable en un triángulo de error

En la determinación de la posición por tres radiomarcaciones como resultado de los errores en la radiomarcación en la mayoría de los casos se forma un triángulo de error. Cuando la distancia hasta los radiofaros es muy grande el triángulo puede alcanzar valores considerables. Cuando se obtienen triángulos pequeños (en los cuarterones alrededor de 10 a 15 mm) la posición del buque se toma en el centro si el triángulo es equilatero. Si el triángulo es isósceles u oblicuoángulo la posición más probable se toma cerca del lado menor y del ángulo que más se asemja un ángulo recto. si el triángulo es muy grande la posición probable no puede tomarse en su centro, sino que es necesario determinar las causas de su surgimiento. Para ello es necesario las causas de su surgimiento. Para ello es necesario rigurosamente comprobar la exactitud de las mediciones y cálculos y repetir la determinación de la

posición. Si después de esto los triángulos obtenidos conservan aproximadamente iguales dimensiones y configuración, entonces la causa de su surgimiento son los errores sistemáticos. En este caso el triángulo de error se resuelve por el mismo método que en el caso de la determinación de la posición por tres marcaciones visuales. Si por el contrario los triángulos de error presentan diferentes configuración y dimensiones, significa que la causa de surgimiento son los errores casuales y la posición del buque se toma como el punto de intersección de las antimedianas, que son rectas trazadas desde los vértices del triángulo, simétricamente a las medianas con relación a las bisectrices de los vértices (Fig. 250).

7.7 Particularidades a tener en cuenta para la determinación de la posición por radiomarcaciones a radiofaros aéreos y estaciones de radiodifusión

En las costas de los mares y océanos se encuentran instalados gran número de radiofaros aéreos, destinados para la navegación aérea pero que pueden ser utilizados con éxito en la navegación marítima. Los radiofaros aéreos se encuentran en lugares determinados que se señalan en las cartas náuticas. Estos trabajan de acuerdo a determinados horarios. Si en los cuadernos de radiofaros no aparece la descripción de su trabajo, significa que trabajan todo el tiempo.

Los radiofaros aéreos se dividen en circulares y de enfilación y los métodos de su utilización no se diferencian de los métodos de los radiofaros comunes. Es necesario recordar que los radiofaros pueden dejar de trabajar o variar su frecuencia, sobre lo que no se da ningún aviso a los navegantes. además, en las descripciones sus coordenadas aparecen aproximadas. Algunos radiofaros se encuentran instalados lejos de la costa, por eso las radiomarcaciones obtenidas pueden contener grandes errores debido a la refracción costera.

La medición de las radiomarcaciones a los radiofaros aéreos es más segura por el método auditivo, ya que estos transmiten una raya relativamente corta después de las señales de identificación.

Para la determinación de la posición pueden ser utilizadas estaciones costeras de radiodifusión. Las particularidades en la determinación de la posición en este caso serán las siguientes:

1. Como regla general las radioestaciones se encuentran a grandes distancias de la costa , por lo que las ondas electromagnéticas tienen que pasar por diferentes medios en su propagación, lo que provoca grandes errores debido a la refracción.

2. Las estaciones emiten oscilaciones moduladas en frecuencia, provocando que las señales no sean estables en su intensidad, lo que dificulta la toma exacta de las radiomarcaciones.

3. En el ploteo de las radiomarcaciones debido a la gran distancia que existe hasta las radioestaciones, es posible el surgimiento de grandes errores.

4. Puede ocurrir el corrimiento de la frecuencia de las radioestaciones, por lo que para la medición de las radiomarcaciones es necesario constantemente sintonizar el radiofoniómetro.

5. Es necesario medir las radiomarcaciones por el método auditivo.

6. La inexactitud de las coordenadas de las radioestación, la ausencia de las señales de identificación de la radioestación y que varias estaciones trabajen en frecuencias cercanas, etc, disminuyen la exactitud en la determinación de la posición.

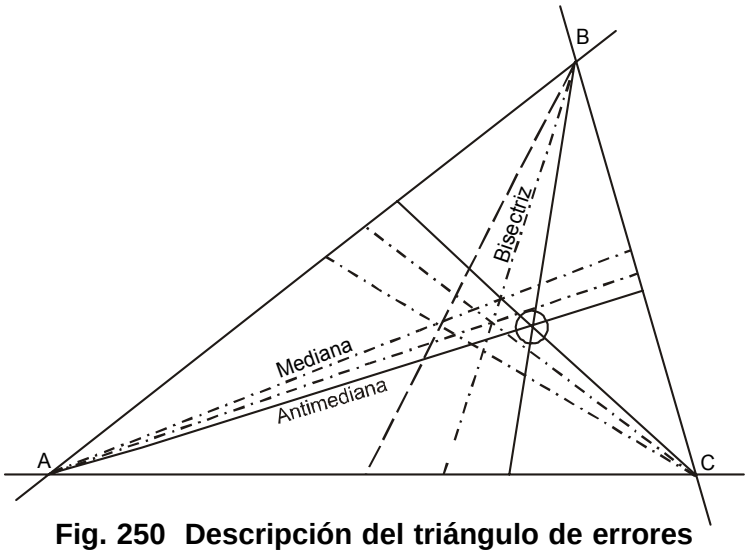


Fig. 250 Descripción del triángulo de errores

7.8 Navegación por radiofaros de enfilación

Los radiofaros de enfilación están destinados para asegurar la navegación por canales, en los estrechos, en las entradas y salidas de los puertos. Ellos representan radiotransmisores con diagrama de transmisión direccional en el plano horizontal.

El diagrama direccional alternativamente se proyecta a uno y otro lado de la línea de simetría, formando una línea de equiseñal. El sistema de antenas está compuesto por dos antenas de cuadro (diagrama direccional en forma de número ocho) o por un cuadro y una antena vertical (diagrama direccional en forma de cardioide).

La línea en la cual la intensidad de las señales emitidas por ambos cuadros, es igual se llama **línea de equiseñal.**

Cuando las desviaciones del buque respecto a la línea de equiseñal son muy pequeñas el operador no puede percibir la diferencia de audibilidad de las señales.

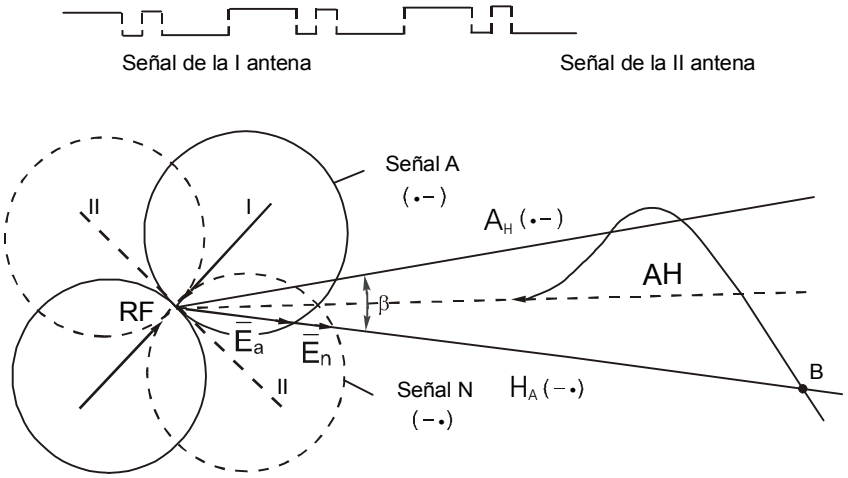


Fig. 251 Principio de funcionamiento de los radiofaros de enfilación

El ángulo en el cual ambas señales se escuchan con igual intensidad (se confunden en una raya larga), se llama **zona de equiseñal.**

Los radiofaros de enfilación que utilizan la zona de equiseñal han encontrado mayor utilización. Su principio de funcionamineto consiste en lo siguiente (Fig. 251).

Supongamos que de la antena I del radiofaro se transmite la señal (.-) y de la antena II la señal N (.-). Además, las señales se transmiten de tal forma, que se complementan, es decir los elementos de la señal de una antena se transmiten durante las pausas entre los elementos de la señal transmitida por la otra antena.

Cuando el buque se encuentra en la zona de equiseñal del radiofaro el observador recibe señales de las dos antenas con igual intensidad y escucha un sonido ininterrumpido: una raya larga.

Cuando el buque sale de la zona de equiseñal el observador comienza a escuchar la A o la N en dependencia del lado en que se encuentre.

Efectivamente, en la dirección RF - B la señal N se escuchará más fuerte que la señal A ya que el radio vector de intensidad del campo electromagnético En > Ea. A veces los radiofaros de enfilación transmiten otras combinaciones de señales: A y N, N y T, etc. La experiencia demuestra que la mejor combinación es la de las señales A y N.

Por regla general los radiofaros de enfilación trabajan únicamente a solicitud. El sistema de antenas de estos radiofaros se orienta de tal forma, que una de las zonas equiseñal coincide con el eje del canal. La navegación por los radiofaros de enfilación consiste en que es necesario mantener el buque en los límites de la zona de equiseñal. En el puente de gobierno puede colocarse un altoparlante para que el mismo timonel pueda guiar el buque por el radiofaro de enfilación. La recepción de las señales puede efectuarse con un receptor común o con el radiogoniómetro del buque, conmutado para el trabajo con la antena vertical. Se recomienda escuchar ambas señales cuando se desvía de la zona de equiseñal y luego caer al eje (centro del canal). Esto se hace con el fin de evitar caer en zonas falsas. Cuando el buque se traslada por la bisectriz de la zona es necesario evitar los giros bruscos, para que ésta no salga de los límites de la zona y no exponerlo a los peligros.

Cuando se van a utilizar los radiofaros de enfilación se debe tomar del cuaderno de radiofaros los siguientes datos: las coordenadas del radiofaro, la longitud de onda en la cual éste trabaja , dirección de la zona de equiseñal, de las señales con relación al eje de la zona de equiseñal, magnitud del ángulo de la zona de equiseñal.

Las principales exigencias a los radiofaros de enfilación son las siguientes: estabilidad, el ancho necesario de la zona de equiseñal (en dependencia del ancho del canal) y el alcance exigido. Por lo general el ancho de la zona de equiseñal no es mayor de 1 - 1,5° y el alcance 15 - 20 millas.

7.9 Determinación de la posición del buque cuando se miden radiomarcaciones (radiodemoras) a éste desde una estación costera

Las estaciones radiogoniómetricas costeras están destinadas para la determinación de la posición del buque y el envío de los resultados obtenidos al propio buque. El radiogoniómetro se instala en la costa a una distancia considerable de las construcciones metálicas y previendo que en la región de servicio las radiomarcaciones al buque no corten la línea de la costa con ángulos menores de 20°, con lo que se elimina la influencia de la refracción costera.

Las estaciones radiogoniométricas intaladas en la costa recibieron gran propagación en muchos países y principalmente en Japón, donde son los medios principales para determinar la posición y realizar las labores de la pesca.

Todas las estaciones costeras de radiogoniómetros se dividen en:

- Estaciones automáticas equipadas con radiogoniómetros y estaciones radiotransmisoras.

- En estaciones unidas en un grupo de acción conjunta y dirigidas por una estación central de control.

Como las estaciones costeras sirven a los buques de todos los países y existe un sólo orden de comunicaciones con ellas, está establecida una frecuencia de trabajo y un procedimiento para el pedido y recepción de las radiomarcaciones.Todos los datos necesarios sobre estos radiofaros aparecen en los cuadernos de radiofaros de la zona marítima correspondiente.

Antes de realizar el pedido a una o más radioestaciones es necesario tomar de los cuadernos de radiofaros:

- Señales de llamada (identificación) de las redioestaciones.

- Longitud de ondas en la cual están de guardia las radioestaciones.

- Longitud de onda, en la cual ellas determinan las radiomarcaciones.

Después de esto el buque llama a la estación radiogoniómetrica por la frecuencia en que están de guardia y, si es necesario, señala la frecuencia en que va a trabajar para la determinación de la radiomarcación. Luego el buque espera las indicaciones de la estación. La estación de radiogoniómetros señala al buque cuándo debe comenzar la transmisión, la frecuencia así como la cantidad de repeticiones de las transmisiones.

El buque transmite sus señales de llamada en combinación con otras señales durante el tiempo que permita la toma de las radiomarcaciones (por ejemplo las señales de llamada y dos rayas de 10 segundos).

Después de determinar la radiomarcación y aplicarles todas las correcciones con excepción de la corrección ortodrómica, la estación de radiogoniómetros transmite las radiomarcaciones al buque.

Después de obtener varias radiomarcaciones ortodrómicas desde varias estaciones, a éstas se se le aplica la corrección ortodrómica y se plotean en la carta desde las radioestaciones. Si las estaciones de radiogoniómetros están unidas en un grupo, dirigidas por una estación central de control, entonces se llama a la estación de control, la cual luego transmite la señal a las estaciones dirigidas por ella, y éstas últimas proceden a tomar marcaciones al buque. Al obtener la radioestación todas las radiomarcaciones, determinan la posición del buque y transmite las coordenadas obtenidas a éste. La radioestación central puede transmitir al buque no solo la posición, sino todos los datos obtenidos en las demás estaciones, entonces el navegante aplica la corrección ortodrómica y las plotea en la carta.

Cuando las radioestaciones trabajan en grupo, todas las radiomarcaciones se toman a un mismo tiempo, por lo que no es necesario reducirlas a un punto de observación.

Las desventajas de la medición de las radiomarcaciones desde la costa al buque son las siguientes:

- Las radiomarcaciones no se miden por la tripulación del buque que es la responsable de la seguridad del mismo, sino por el personal de la radioestación.

- El procedimiento de obtención de la posición desde la estación costera ocupa mucho tiempo.

- El trabajo de la radioestación de abordo desenmascaran el buque.

- Son posibles las interferencias de las estaciones que trabajan en frecuencias vecinas y los errores en la transmisión de las radiomarcaciones.

Ventajas:

- Posibilidad de instalar los equipos con exactitud en bases sólidas y alejados de campos potentes de irradiación secundaria.

- Mayor exactitud en la medición de las radiomarcaciones.

- Posibilidad de utilización de las estaciones costeras por cualquier buque que posea un transmisor común.

7.10 Radiofaros que transmiten correcciones diferenciales DGPS (Sistema de Posicionamiento Global Diferencial)

Debido al desarrollo impetuoso del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y su constante perfeccionamiento en la obtensión de la posición del buque se creó el Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS).

Las investigaciones sobre la forma de transmitir las correcciones de las pseudodistancias (distancia medida entre el satélite y el buque) a los usuarios han determinado que los radiofaros marítimos que transmiten en frecuencia media que operan en la banda de 285-325 kHz son el método terrestre más adecuado para las zonas costeras. Es por eso que los radiofaros marítimos además de su empleo normal como ayuda a la radionavegación en la determinación de la posición del buque se utilizan para transmitir correcciones difernciales DGPS.

DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DEL BUQUE CON AYUDA DE LAS ESTACIONES DE RADIOLACALIZACIÓN

7.11 Tareas que se resuelven con ayuda de las estaciones de radiolocalización

Las estaciones de radiolocalización (ERL-RADAR- esta palabra se deriva de la expresión inglesa **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging) se utilizan como uno de los principales medios para la navegación cerca de las costas, en los canales y estrechos así como en condiciones de poca visibilidad.

Se llama estación de radiolocalización al equipo radiotécnico destinado para la localización de los objetos circundantes al buque y para la determinación de su posición con relación al buque. Las estaciones de radiolocalización dan la posibilidad de ver los objetos ocultos a la observación visual, medir las marcaciones (marcaciones relativas) y distancias hasta ellos.

Los radares instalados en los buques cumplen diferentes objetivos:

- Radares para la localización de los objetivos aéreos.

- Radares para la localización de objetivos de superficie.

- Radares para la dirección del tiro.

- Radares de navegación.

Los radares utilizados en navegación se dividen en:

- Radares de a bordo.

- Radares costeros, destinados a garantizar la navegación en los estrechos, puertos y entradas a ellos.

Los radares permiten resolver las siguientes tareas:

- Determinar la posición del buque cuando se navega cerca de las costas.

- Guiar los buques por los canales cuando se navega en estrechos.

- Determinar los elementos de manobra de los buques.

- Realizar las manobras para evitar colisión con poca visibilidad.

- Determinar los elementos de movimiento del objetivo, mantener la posición en la formación y resolver otras tareas de táctica en la navegación conjunta y utilización del armamento.

En los últimos años los radares se utilizan con éxito en las investigaciones oceanográficas (observación de las corrientes, estudio de fenómenos meteorológicos, hielos, oleajes, etc).

1. Principio de trabajo del radar

Los radares basan su principio de trabajo en el fenómeno de la reflexión de las ondas de radio en los objetos que son transmisores de la corriente eléctrica y cuyas dimensiones son mayores que la longitud de onda.

Las partes principales del radar son: transmisor, receptor, dispositivo de ondas centimétricas, las cuales se propagan en línea recta y se reflejan bien en los objetos. El impulso de energía electromagnética emitido al espacio, a través de la antena direccional del radar, al reflejarse en el objeto regresa al buque, es decir recorre el espacio buque - objeto - buque. La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es una magnitud constante. Midiendo en el indicador el tiempo t desde el momento del envío hasta el momento de la recepción de la señal reflejada y considerando que la onda recorre dos veces el mismo espacio, se puede determinar la distancia D hasta el objeto:

$$D = c\frac{t}{2}, \qquad (204)$$

donde:

t - Tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia.

c - Velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas (300 000 km/seg.).

De esta forma, e**l principio de trabajo de los radares consiste en la medición del intervalo de tiempo que tarda el radioimpulso en recorrer dos veces la distancia entre el buque y el objeto.**

La construcción de los radares nos permite obtener directamente la distancia hasta el objetivo. En calidad de indicador se utiliza un tubo de rayos catódicos con pantalla circular, el cual da la posibilidad de observar la situación circundante y permite determinar la marcación y distancia hasta los objetos. Ya que en la radiolocalización se utilizan radiondas cetimétricas, esto permite obtener la imagen de objetos de cualquier dimensión, entre ellos las boyas, balizas, etc.

La imagen en la pantalla del indicador se forma por el barrido radial circular en el sistema polar de coordenadas. El inicio del barrido corresponde a la posición del buque y coincide con el centro de la pantalla y el círculo azimutal (Fig. 252).

El barrido representa un rayo electrónico, el cual al rotar con relación al centro de la pantalla, sincrónicamente con la antena, "revela" en ésta la imagen en forma de una mancha de color verdoso, que coincide en la carta náutica con la forma de los objetos. Sin embargo, en la utilización de la pantalla circular es necesario tener en cuenta determinadas particularidades de la imagen, la cual a veces se diferencia sustancialmente de la imagen real de los objetos. Para obtención de las marcaciones, las pantallas circulares poseen anillos divididos en grados de 0° a 360°. El anillo exterior es móvil y sirve para la medición de las marcaciones relativas Mr. La marcación verdadera o marcación relativa se mide con ayuda del visor.

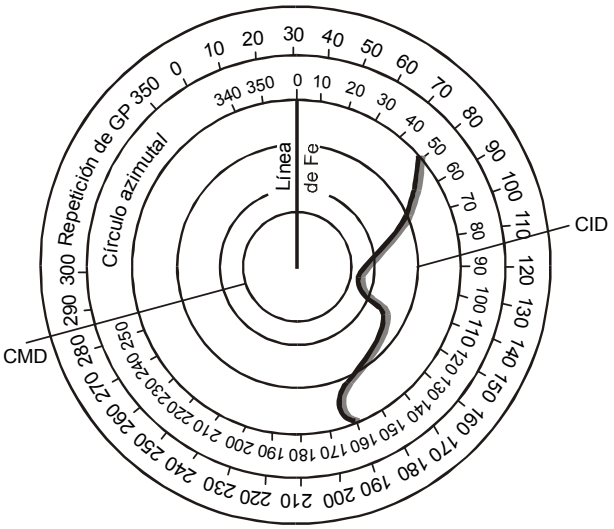


Fig.252 Pantalla circular del radar

En el el tubo de rayos catódicos se forma en la pantalla la línea del rumbo, en forma de una línea brillante, lo que permite tomar la lectura del rumbo por el anillo exterior conectado al girocompás.

La imagen en la pantalla circular se puede orientar con relación al plano diametral o con relación al rumbo aguja.

Cuando la imagen se orienta con relación al plano diametral del buque la línea del rumbo pasa por el cero del cículo azimutal, por el cual se toma la lectura de la marcación relativa. El rumbo y la marcación aguja se toman por el disco móvil exterior conectado con el girocompás.

Cuando el buque realiza un giro, la línea del rumbo se queda inmóvil y la imagen en la pantalla se desplaza al lado contrario al giro del buque. Este tipo de orientación se utiliza en la navegacipón en los estrechos y cuando se utiliza el radar para la maniobra con buques que vienen al encuentro. Con tal orientación la guiñada del buque conlleva el desplazamiento de la imagen, lo que empeora su claridad.

Cuando la orientación es con relación al meridiano aguja la línea del rumbo es móvil y siempre está dirigida por el rumbo del buque.

Ante esta situación el cero del anillo exterior se encuentra siempre situado en la parte superior de la pantalla circular, las marcaciones y rumbos se toman por el disco exterior y las marcaciones relativas por el anillo interior, el cual debe ser manualmente colocado en la posición de la línea de rumbo. Esta orientación favorece la comparación de la imagen en la pantalla con la imagen en la carta, ya que ante los giros la imagen no se desplaza. La guiñada del buque no influye en la claridad de la imagen.

La distancia hasta el objeto se determina por la magnitud de la distancia entre la imagen del objeto y el centro de la pantalla. La magnitud de esta distancia se determina con la ayuda del anillo móvil de distancia (AMD) o con la ayuda de los anillos inmóviles de distancia (AID). Estos se representan por circunferencias concéntricas en la pantalla, la distancia entre las cuales está exactamente determinada. Con ayuda de los AID la distancia hasta los objetos se determina por interpolación visual entre dos anillos vecinos. Con mayor exactitud, la distancia se determina con el ADM. para lo cual su radio se varía de tal forma, que el anillo sea tangente a la parte frontal de la imagen del objeto en la pantalla. La distancia medida se lee en un contador. El tamaño de la imagen se puede variar estableciendo la correspondiente escala de distancia, cuya selección depende de las condiciones de navegación.

2. Alcance máximo del radar y alcance de detección de los objetos

En los radares modernos se utilizan ondas de las bandas centrimétricas, las cuales se propagan y reflejan por las leyes de las ondas lumínicas, con un coeficiente de refracción algo mayor. Por eso ellas penetran más allá del horizonte visible que las ondas lumínicas.

El alcance del horizonte del radar se puede hallar de la tabla 7.1:

Tabla 7.1

Atura de la antena H(metros)	D(millas)	Atura de la antena H(metros)	D(millas)
4	4,4	60	17,0
6	5,3	80	19,7
9	6,6	100	22,0
12	8,8	140	26,0
21	10,1	160	27,7
27	11,5	200	31.0

EL alcance máximo del radar depende de la potencia del impulso, sensibilidad del receptor, altura de la antena, condiciones de radiolocalización, del tamaño y capacidad de reflexión de los objetos. De forma aproximada, el alcance máximo de los objetos en millas se puede calcular por la fórmula:

$$D = 2{,}2\left(\sqrt{H} + \sqrt{h}\right) \qquad (205)$$

donde:

D - Alcance máximo del radar (millas).

H - Altura del objeto (metros).

h - Altura de la antena (metros).

Esta fórmula es válida para condiciones meteorológicas normales. Cuando la temperatura disminuye bruscamente con la altura asi como con el aumento de la humedad relativa, el alcance de detección de los objetos disminuye.

Los impulsos reflejados en las partículas suspendidas en la atmósfera clarean la pantalla del indicador y dificultan la detección de los objetos. A su vez, el alcance de detección de los objetos depende de la capacidad de reflexión que éstos tienen y que dependen de las dimensiones, forma y propiedades eléctricas del material del objeto. Las costas bajas inclinadas tienen propiedades de poca reflexión. La mayor parte de la energía de la radionda se refleja en estas costas de forma de espejp (por las leyes de la óptica) y no se regresan a la antena del radar. Estas pueden ser captadas por el radar sólo a cortas distancias (Fig. 253).

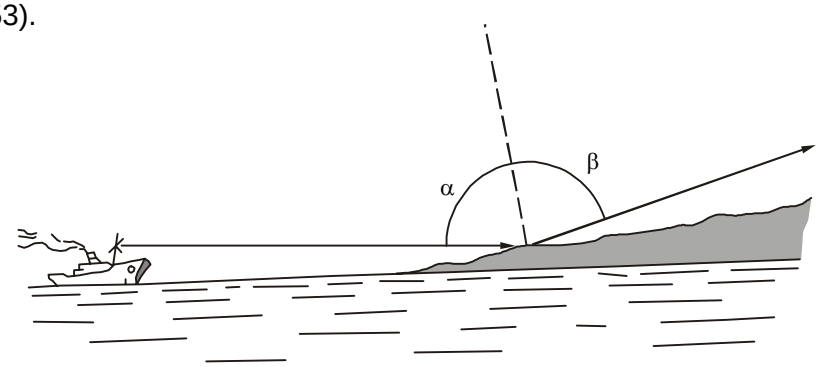


Fig. 253 Reflexión de las ondas de radio en una pendiente

Mejores propiedades de reflexión poseen las rocas independientes, costas abruptas, mástiles metálicos, grúas de puertos, construcciones hidrotécnicas, etc.

Alcance aproximado de algunos objetos **Tabla 7.2**

Nomenclatura del objeto	Alcance posible (millas)
Boya pequeña	0,5 - 1,0
Buque de desplazamiento 1000T	6, 0-10.0
Muelles, rompeolas	5,0-10.0
Rocas verticales	hasta 20,0
Lomas	De 15,0 hasta 40,0

3. Alcance mínimo del radar y zona muerta

El alcance mínimo del radar es la menor distancia a que pueden ser captados los objetos. Este se determina principalmente por la duración de los impulsos. Mientras dure la emisión de las señales de radio su recepción es imposible ya que la antena en este tiempo se encuentra conectada al transmisor.

El alcance mínimo del radar puede ser determinado aproximadamente por la fórmula:

$$D_{min} = (0,8 \div 0,9)\, c\tau, \qquad (206)$$

donde:

τ - Duración del impulso

c - velocidad de propagación de las ondas de radio.

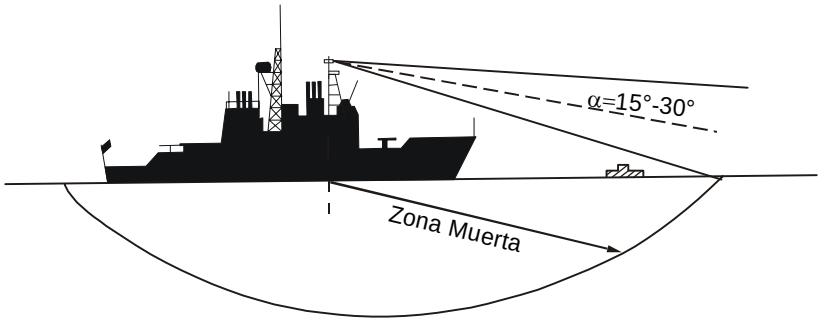


Fig. 254 Alcance mínimo del radar

El alcance mínimo del radar depende también de la relación entre la altura de la antena y el objeto así como del ancho del diagrama direccional en el plano vertical. Si la altura de la antena es mayor que la altura del objeto, entonces los objetos que se encuentran debajo del borde inferior del diagrama de emisión no serán captados por el radar (Fig. 254).

El espacio alrededor del buque, en el cual los objetos no son captados se llama **zona muerta**. El alcance mínimo del radar y la zona muerta se brindan en el formulario técnico del equipo.

4. Capacidad resolutiva del radar en ángulo y distancia

El menor ángulo en el plano horizontal, en cuyos límites dos objetos vecinos que están a igual distancia del buque se pueden observar en la pantalla circular por separado, se llama **capacidad resolutiva del radar en ángulo (marcación).**

La capacidad resolutiva del radar en ángulo depende del ancho del diagrama direccional en el plano horizontal β, cuyo valor en los radares modernos es aproximadamente igual a 2,0°. Dos objetos se ven separados en la pantalla sólo cuando la distancia angular α entre ellos es mayor que el ángulo β (Fig. 255).

La menor distancia entre los objetos colocados en una línea de marcación y los cuales en la pantalla se ven separados, se llama **capacidad resolutiva del radar en distancia.**

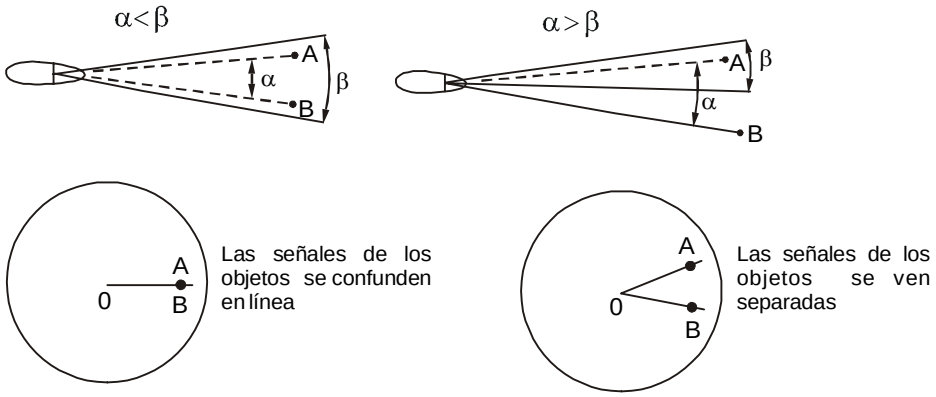


Fig. 255 Capacidad resolutiva del radar en ángulo

La capacidad resolutiva del radar en distancia para las estaciones marinas es aproximadamente igual a 0,5 cables y depende de la duración de los impulsos y de las dimensiones de la imagen en la pantalla.

Cuanto menor sea la duración del impulso, mayor será la capacidad resolutiva del radar en distancia.

Las distancias resolutivas para los objetos puntuales es menor que para los objetos grandes (Fig. 256).

Si $\delta > 0{,}5$ cables, los objetos se ven por separados en la pantalla,

Si $\delta < 0{,}5$ cables, los objetos se confunden en la pantalla.

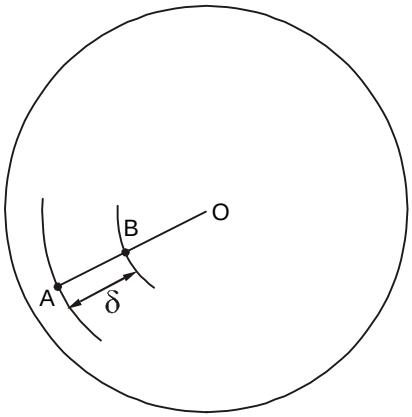


Fig. 256 Capacidad resolutiva del radar en distancia

7.12 Determinación de la posición con ayuda del radar

1. Reconocimiento de la costa con ayuda del radar. Tipos de objetos de radiolocalización

El reconocimiento de sectores de la línea de la costa y de los objetos que se encuentran en ellos con ayuda del radar con frecuencia es bastante difícil, ya que la imagen en la pantalla del indicador circular sólo en rasgos generales se parecen a la imagen de estos en la carta, En la imagen obtenida influye el relieve de la localidad. Los sectores cerrados de la costa no se registran en la pantalla, detrás de las elevaciones se forma la zona de la sombra de radiolocalización y en ellas no se observa la imagen de la localidad. Cuando más cerca de la costa se encuentre el buque, mejor será la imagen de ésta en la pantalla y más se parecerá a la imagen de la carta.

El sector de la costa que mejor se representará en la pantalla es aquel, cuyo frente se ve desde el buque en un ángulo recto. Cuando la línea de ésta forma con la línea de la radiolocalización un ángulo menor de 30° la imagen en la pantalla se deforma considerablemente: los cabos se alargan, los pasos estrechos en las bahías desaparecen. Con claridad se representa aquellos sectores de la costa que reflejan con fuerza la energía electromagnética: las montañas de minerales duros, las costas en forma de pendientes con alturas de 10 - 20 metros, las construcciones artificiales (muros, muelles, grúas de puertos, tanques de petróleo, tubos, edificios altos), etc.

Las costas montañosas y abruptas se representan en la pantalla en forma de puntos separados. Las costas arenosas y salientes bajos arenosos por lo general no aparecen en la pantalla o se ven en forma de líneas débiles discontinuas. Las plantas que cubren las costas crean manchas en la señal reflejada. Para poder reconocer la región en cualquier condición de navegación de acuerdo a la imagen en la pantallar del radar, es necesario estudiar sistemáticamente las particularidades de radiolocalización de la región.

Todos los objetos costeros y de navegación detectables por el radar se dividen en puntuales y no puntuales.

Se llama **objeto puntual** a aquel punto de referencia cuyas dimensiones pueden ser despreciadas al medir marcaciones, distancias y plotear éstas en la carta.

Los puntos de referencia puntuales se dividen en:

- Puntos de referencia naturales y artificiales. Los cuales comprenden las torres de los faros, los medios de ayuda a la navegación, las construcciones, las antenas de las estaciones de radio, rocas aisladas, peñascos, etc.

- Reflectores activos, pueden definirse como estaciones de radiolocalización costeras especiales respondedores

- Reflectores pasivos construidos de metal en forma de figuras geométricas que se instalan en la costa o en medios flotantes de balizamiento. Las particularidades construtivas consisten en que cuando reciben la energía electromagnética casi por completo la reflejan nuevamente hacia la estación de radar (Fig. 257).

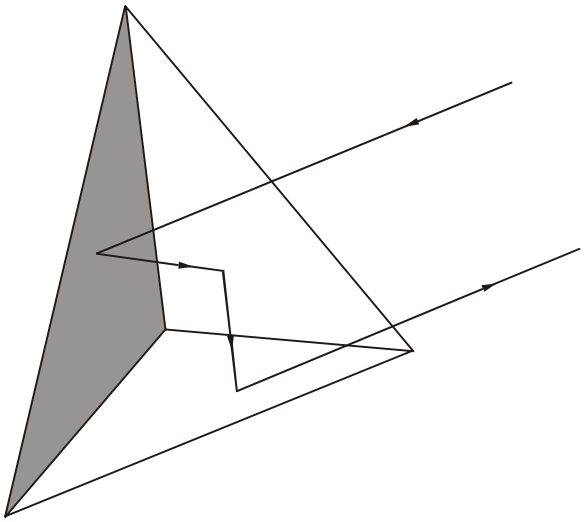


Fig. 257 Reflexión de las ondas de radio en los reflectores pasivos

Los reflectores pasivos aumentan varias veces la superficie efectiva del objeto de referencia , y por consiguiente su alcance de detección con el radar. Por ejemplo una boya con reflector pasivo es detectada a D = 4,5 - 5 millas.

Los reflectores activos y pasivos se instalan en las regiones peligrosas para la navegación , en las entradas de los puertos y bases asi como en las regiones donde no existen puntos de referencia naturales para la radiolocalización. Al determinar la posición del buque con ayuda del radar es necesario tener en cuenta que la exactitud relativa en la medición de distancias es mayor que en la medición de marcaciones.

Se llama **punto de referencia no puntual** a aquellos puntos de referencia, cuyas dimensiones no pueden ser despreciadas en la medición de distancias, marcaciones y su ploteo en la carta. Ellos comprenden la línea de la costa, los cabos que no son muy pronunciados, las elevaciones, islas, etc.

2. Orientación y determinación de la posición por los puntos notables no puntuales

En las condiciones de navegación no siempre es posible determinar la posición del buque por objetos puntuales, ya que a veces no es posible seleccionarlos en la región. En este caso la posición puede ser determinada por puntos notables no puntuales.

a) Determinación de la posición por una serie de marcaciones y distancias

El método dado puede ser utilizado cuando la costa sea acantilada y abrupta.

Con ayuda del indicador del radar en secuencia rápida se mide una serie de marcaciones y distancias hasta los objetos que reflejan las ondas de radio con estabilidad. En realidad éstas serán tomadas a la línea de la costa o a las alturas prominentes.

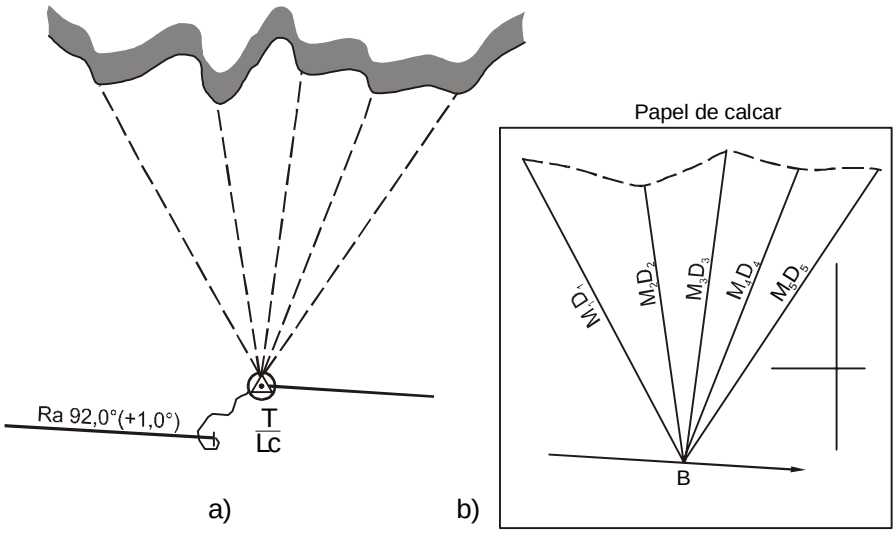


Fig. 258. Determinación de la posición del buque por abanico de marcaciones y distancias

Si la velocidad del buque es menor de 12 nudos, para el momento medio se anota la hora y la lectura de la corredera. Los datos obtenidos se plotean en un papel de calcar, para lo que es necesario trazar el meridiano verdadero y la línea del rumbo verdadero del buque (línea del rumbo efectivo), sobre la línea del rumbo verdadero se toma un punto arbitrario, desde el cual se trazan las marcaciones verdaderas y distancias medidas. En cada línea de marcación se traza la distancia medida (Fig. 258b). Los extremos de las marcaciones se unen por una línea de puntos que corresponderá a la imagen de la costa o a una de sus líneas horizontales.

Luego el papel de calcar se coloca en la carta y se desplaza de tal forma, que las líneas del meridiano y rumbo verdadero cerca de la posición de estima queden todo el tiempo paralelos a sí mismos. Al alcanzar tal posición, donde el mayor número de distancias se apoya en la línea de la costa o en el contorno de los objetos costeros (en la carta), se hace un orificio a través del papel de calcar en el punto de intersección de las marcaciones, obteniendo la posición del buque para el momento medio de la observación. Si la medición de las marcaciones y las distancias se realizó a gran velocidad (más de 12 nudos), y no se puede despreciar el espacio recorrido por el buque durante el tiempo de medición de las marcaciones y distancias, la hora y lectura de la corredera se anotan en el momento de cada medición. En el papel de calcar se traza la línea del rumbo y en ella se plotea a la escala de la carta, los puntos correspondientes a la posición de estima del buque en el momento de cada medición. Desde estos puntos se trazan las marcaciones y distancias. El papel de calcar se coloca en la carta y se mueve alrededor de la posición de estima de tal forma, que la línea del rumbo en el papel y la carta queden todo el tiempo paralelas una de la otra y se selecciona la posición donde el mayor número de distancias se apoyan en la línea de la costa o en los objetos: Esta posición será más exacta cuanto mayor sea el número de marcaciones y distancias.

Anotaciones en el cuaderno de navegación.

Tabla 7.3

09 03 Lc = , Hasta la línea de la costa se midió				
- - Ma = ,	Dr = ,	Δg= ,	ΔDr = ,	
09 01 Lc = ,	Mam = ,	Dr = ,	Δg= ,	ΔDr =
09 02 Lc = ,	Mam = ,	Dr = ,	Δg= ,	ΔDr =
09 03 Lc = ,	Mam = ,	Dr = ,	Δg= ,	ΔDr =
- - Determinemos la posición obtenida por un haz de marcaciones y distancias				
φ_0 =	λ_0 =	C =		

Siempre se debe desconfiar de la posición obtenida por este método y en la primera oportunidad determinar ésta por un método más exacto.

b) Método de las mínimas distancias

En la práctica de navegación se dan casos, cuando en la pantalla del indicador del radar se ve totalmente la imagen de la línea de costa sin ningún tipo de referencia. Esto sucede a la entrada de los estrechos, desembocadura de los ríos, etc. Para la determinación de la posición del buque en tales condiciones se toman rápidamente las distancias hasta una orilla (D_1) y luego hasta la otra (D_2) moviendo el anillo móvil de distancia de tal forma, que sean tangentes a la imagen de la línea de costa (Fig. 259). Luego en una hoja de papel de calcar se traza la línea del rumbo del buque, sobre ella se toma un punto arbitrario desde el cual se coloca en la carta de tal forma, que el centro de los arcos se encuentre en la región de la posición de estima y moviéndolo por la carta encontramos tal posición, donde los arcos son tangentes a ambos sectores de la costa.

Los centros de los arcos determina la posición del buque, la cual se traslada a la carta. Sin embargo, si no existe la certeza que la imagen que aparece en la pantalla es precisamente la configuración de la costa, no es conveniente utilizar este método.

3. Determinación de la posición del buque por objetos puntuales

a) Determinación de la posición del buque por distancia hasta varios objetos.

Se acostumbra determinar la posición del buque por distancias hasta tres objetos reconocidos. La posición se obtiene en el punto de intersección de tres circunferencias, las cuales son las líneas isométricas en la medición de distancias.

Si en la intercepción de las circunferencias se forma un triángulo pequeño, la posición se toma en el centro de éste. Al formarse un triángulo grande es necesario determinar nuevamente la posición, comprobando minusiosamente los objetos seleccionados.

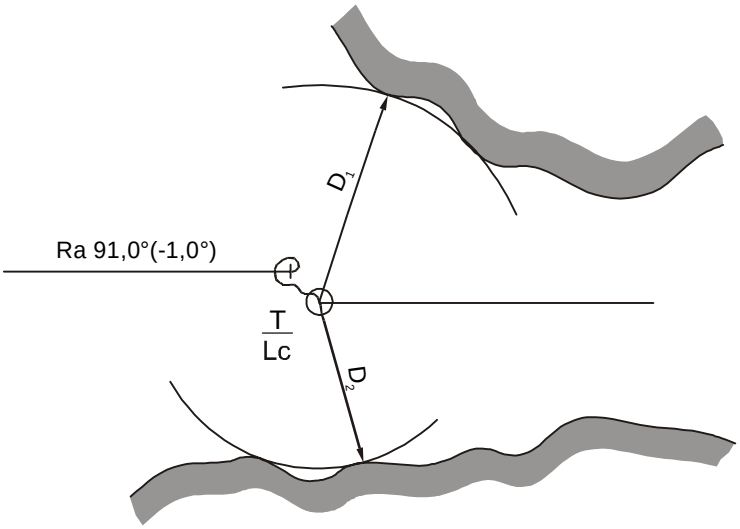


Fig 259. Método de las mínimas distancias

La posición determinada con ayuda del radar por tres distancias posee alta exactitud. Si se miden sólo dos distancias la exactitud bruscamente disminuye, puesto que los errores en la medición de distancia y en la elección de los objetos no pueden ser detectados.

Anotaciones en el cuaderno de guardias de navegación:

11 30	Lc = 25,3 Punta Seboruco Dr = 37 cables
- -	Punta Carabinero Dr = 93 cables. Faro Punta Maya Dr = cables.
- -	ΔDr = +1cable, C = 15° - 0.5 millas

b) Determinación de la posición del buque por marcación y distancia

Este método se utiliza en aquellos casos cuando en la zona de acción del radar existe un sólo objeto puntual reconocido, hasta el cual se pueden medir una marcación y una distancia. La marcación y la distancia se miden casi a un mismo tiempo y en la determinación prácticamente no se incluye error por el movimiento del buque (Fig. 260).

Desde el objeto de referencia se plotea la marcación verdadera inversa MvI y tomando éste como centro, con un radio igual a la distancia medida, se traza un arco que intercepte la línea de la marcación. El punto de intersección será la posición observada.

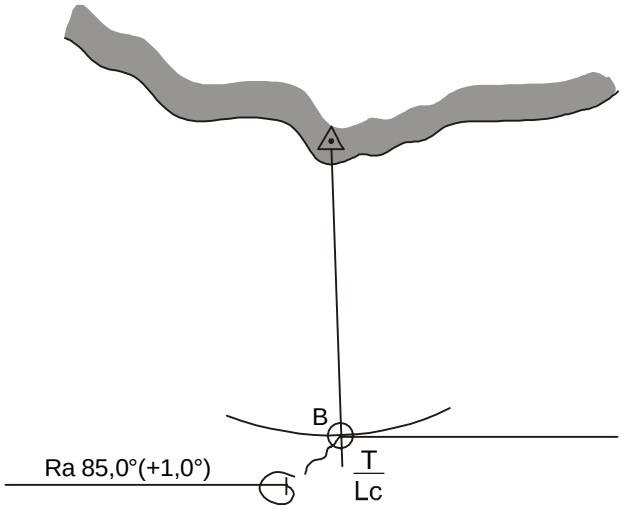


Fig. 260. Determinación de la posición por marcación y distancia

Las anotaciones en la página derecha del cuaderno de navegación se realizan de la siguiente forma:

11 05	Lc = 33.0. Faro Cayo Piedra del Norte M = 153°
- -	Δg = + 0,5°, Dr = 54 cables ΔDr = +1 cable. C = 35°- 0.4 millas

Cuando hay un objeto costero en la visibilidad del buque la posición puede ser determinada por una marcación visual y una distancia. Con esta combinación, la marcación y la distancia se miden con gran precisión y la posición será más exacta que en el método anterior. La desventaja del método consiste en la imposibilidad de comprobar si la selección del punto notable ha sido correcto, siendo necesario otras medidas de control (medición de profundidades, etc).

c) Determinación de la posición del buque por distancia corrida

Cuando en la zona de acción del radar existe un solo objeto hasta el cual se puede tomar distancias, pero no se pueden medir marcaciones, la posición se determina por distancia corrida (Fig. 261).

Desde el buque que navega con rumbo verdadero arbitrario, por ejemplo Rv = 95°, se mide la distancia D_1 hasta el objeto A y al mismo tiempo se anotan la hora y lectura de la corredera (T_1/Lc_1).

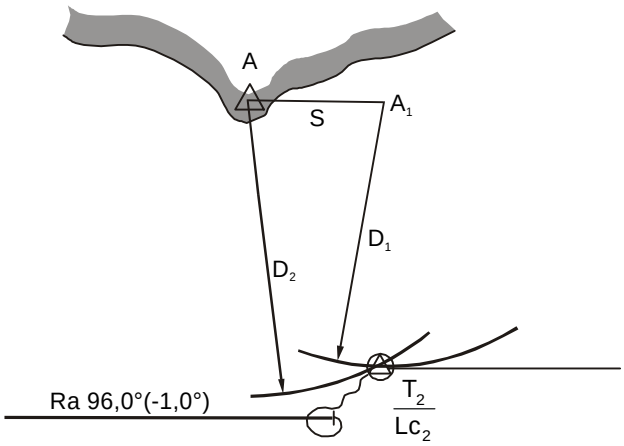


Fig. 261. Distancia corrida

Después que la marcación varíe en un ángulo mayor de 30° se mide nuevamente la distancia D_2 y se anota la hora T_2 y la lectura de la corredera Lc_2. Desde el objeto A se traza una línea paralela a la línea del rumbo verdadero o efectivo del buque y sobre ella se plotea el espacio S = (Lc_2- Lc_1) Kc que recorre el buque en el tiempo transcurrido entre las distancias medida hasta el punto notable A . Con esta operación se obtiene el punto A_1. Desde este punto con radio igual a la distancia D_1 se traza un arco de circunferencia en la región de la posición de estima y desde la posición del objeto A con un radio igual a la distancia D_2 se traza el segundo arco en esta misma zona. El punto de intersección de ambos arcos corresponde a la posición observada por el método de distancia corrida. La exactitud de este método depende de la exactitud en la medición de las distancias, del ángulo de intersección de los arcos y del error de estima entre la medición de las distancias.

Las principales desventajas de este método son las siguientes:

- Para su realización se exige mucho tiempo.

- Los errores en la estima entre los momentos de medición de las distancias se introducen totalmente en la posición observada.

Las anotaciones en el cuaderno de guardias de navegación se realiza de la siguiente forma:

11 40	Lc = 37,2 Faro Cayo Bahía de Cádiz Dr = 70 cables ΔDr = +0.5 cables
11 55	Lc = 42,3 Faro Cayo Bahía de Cádiz Dr = 78 cables ΔDr = +0.5 cables
- -	C = 45° - 0.4 millas

d) Determinación de la posición del buque por varias marcaciones

Este método se utiliza sólo en aquellos casos, cuando la costa es baja y en la pantalla no aparece su imagen con claridad, pero permite tomar marcaciones a las alturas que se encuentran detrás de la línea de costa.

El orden de determinación de la posición en este caso es el mismo que en el método de determinación de la posición por marcaciones visuales. A causa de la baja exactitud de las marcaciones medidas por el radar este método debe utilizarse sólo en aquel caso, cuando no se puede determinar la posición por un método más exacto. En el caso cuando se obtiene un triángulo de error de grandes dimensiones es necesario realizar las mediciones por segunda vez después de comprobar la selección de los objetos de referencia.

4. Determinación de la posición del buque por faros respondedores de navegación.

El faro respondedor de navegación (**RA**dio bea**CON** - **RACON**) representa un mecanismo de impulsos de acción por relay y se relaciona al género de los objetos de referencia puntuales. El RACON puede definise como un faro respondedo que emite una señal al ser activada por la emisión del radar del buque. Cuando es necesario determinar la posición se conecta el radar, cuya frecuencia debe coincidir con la frecuencia de trabajo del faro respondedor (del receptor de éste). El impulso del radar es recibido por la antena del faro y conducido al receptor, donde se amplifica y conecta el transmisor, el cual a su vez emite un impulso de respuesta hacia el buque. En la pantalla circular del radar de a bordo destella la imagen de este impulso (Fig. 262). El radar repondedor tiene un mecanismo de codificación, de acuerdo a la construcción del cual puede ser emitida una señal simple o una señal especial que es conocida por el navegante para poder diferenciar un faro de otro. Con el indicador se mide una marcación y una distancia hasta el faro. Cuando se mide la marcación se toma al centro de la señal de respuesta. Para medir la distancia es necesario mover el AMD de tal forma, que estos sean tangentes a la parte central del arco de la señal de respuesta y por el contador tomar la lectura de la distancia medida. Para el paso de la señal a través del receptor, el codificador y el transmisor es necesario la pérdida de determinada cantidad de microsegundos, es decir, que sucede el retardo de la señal entre la recepcción en el faro y la emisión de la respuesta, por lo que la señal recibida en la pantalla se encontrará a determinada distancia mayor que la distancia real hasta el faro. Por consiguiente, la distancia medida D' debe ser corregida en ΔD por el retardo de la señal. ΔD siempre tiene signo negativo por el retardo en un valor de 1 a 4 microsegundos (300 - 1200 metros):

$$D = D' - \Delta D,$$

donde:

D - Distancia real hasta el faro.

Cuando existe un sólo faro respondedor la posición puede ser determinada por marcación y distancia y cuando son más de uno por distancias solamente.

Las anotaciones en el cuaderno de guardias de navegación se realizan de la seguiente forma:

07 15	Lc = 45.2 Racon Punta Lucrecia M = 133° D = 49.5 cables, ΔDr = cables.
- -	ΔDr = cables, C = 210° - 0.6 millas.

La exactitud en la medición de distancias con ayuda del faro respondedor es algo menor en la medición con los reflectores pasivos a una misma distancia hasta ellos, ya que al error del propio radar se le suma el error por el retardo de la señal. En comparación con los reflectores pasivos los faros respondedores tienen como ventajas más importantes que se elimina el error en el reconocimiento del faro y se aumenta considerablemente el alcance del radar.

5. Determinación de la posición y dirección del buque por los canales con ayuda de los radares costeros y de puertos

Para garantizar la entrada de los buques a los puertos en condiciones de poca visibilidad, para el paso de los estrechos, las regiones peligrosas a la navegación, por los canales pueden ser utilizadas las estaciones costeras de radiolocalización.

Con vista a garantizar, además, la dirección del movimiento seguro en los puertos, entradas y salidas de éstos se instalan los radares de puerto que garantizan el panorama del espacio marítimo de éste y de las regiones a él aledañas. Los radares de puertos modernos poseen una alta capacidad resolutiva por distancia (hasta 15 - 20 metros) y por ángulo (hasta 0,5°). El alcance de los radares costeros puede ser de varias decenas de millas, sin embargo, el de los radares de puerto es de sólo de unas pocas millas.

Para garantizar la navegación por los radares costeros debe hacerse la solicitudo al servicio de guardia operativo y cuando se llega a la región, asegurar la comunicación por radio.

La dirección del buque por el radar siempre comienza por el reconocimiento del buque entre otros que son captados por el radar costero. El buque informa su posición, rumbo y velocidad y si ésto no es suficiente, de acuerdo a una señal de la estación, conecta el aparato de reconocimiento o realiza una maniobra especial. Después del reconocimiento comienza la dirección del buque, que puede ser realizada por dos métodos:

- Señalando la posición del buque dirigido.

- Señalando los rumbos y velocidades de movimiento.

En el primer método desde la estación costera cada 1 - 2 minutos se informa al buque los datos de su posición en forma de:

-Marcaciones y distancias del radar costero al buque.

- Marcaciones y distancias desde un objeto arbitrario hasta el buque.

- Marcaciones y distancias de los puntos de recalada y maniobra del canal hasta el buque.

- Coordenadas geográficas.

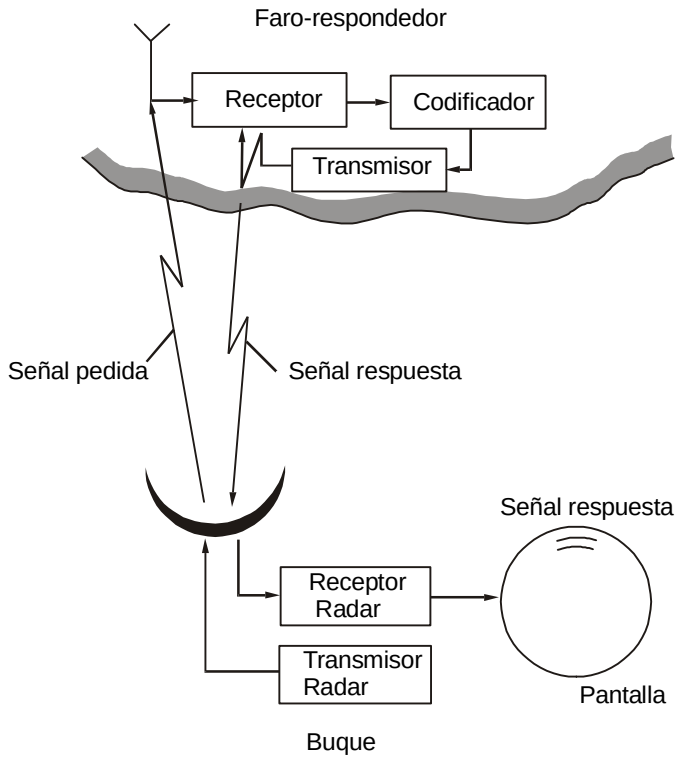


Fig. 262 Determinación de la posición por el faro respondedor de radiolocalización

Todos los datos se informan por un radiograma, en el cual se señala la hora de la observación y el número del objeto de referencia hasta donde se midieron las distancias y marcaciones. El navegante obtiene en la carta la posición de acuerdo a los datos recibidos.

Para garantizar la determinación de la posición se confeccionan redes de líneas isométricas, compuestas por líneas de marcaciones y arcos de circunsferencias correspondientes a las distancias. Estas redes se construyen en las cartas de escala mayor para las regiones dadas.

Cuando se realiza la dirección por el segundo método la estación costera asigna al buque los rumbos y velocidades que debe realizar , señala la hora de los giros e informa los datos necesarios para la orientación general.

La responsabilidad sobre la información correcta de los datos al buque la tiene el personal de la estación costera, sin embargo, esto no exime al capitán y los navegantes de su responsabilidad en lo que se refiere a la seguridad de la navegación.

De esta forma, las estaciones costeras de radar pueden garantizar con seguridad la navegación en las regiones peligrosas, en los canales y aguas restrigidas.

7.13 Determinación de la posición del buque con ayuda de las estaciones de hidrolocalización

1. Tareas de navegación que se resuelven con ayuda de las estaciones de hidrolocalización (EHL- SONAR)

Los buques de guerra, de pesca y de investigación modernos poseen en su equipamiento estaciones de hidrolocalización que permiten determinar la dirección (marcación relativa y marcaciones verdaderas)

y la distancia hasta los objetos submarinos.

Teniendo suficiente alcance y exactitud relativamente alta para determinar los parámetros de navegación, las estaciones de hidrolocalización se utilizan para resolver las siguientes tareas de navegación:

- Determinación de la posición del buque.

- Asegurar la navegación en los estrechos y al acercarse a la costa en condiciones de poca visibilidad.

- Determinación de los elementos de movimiento del objetivo.

- Mantener la posición en la formación y la navegación conjunta.

En el presente contenido se analizará solamente las dos primeras tareas. Las Estaciones de Hidrolocalización (EHL) poseen dos regímenes de trabajo: **régimen de ecomarcación** y **régimen de fonomarcación.**

En el régimen de ecomarcación se realiza la medición de la marcación relativa (marcación verdadera) y la distancia hasta los objetivos submarinos. En el régimen de la fonomarcación se mide sólo la dirección a las fuentes submarinas de ruidos.

El alcance de las EHL en el régimen de ecomarcación depende de muchos factores y entre ellos, de la potencia de los impulsos de las oscilaciones ultrasónicas, que reflejan las propiedades de los objetos submarinos y las condiciones hidrológicas (la variación de la temperatura, la salinidad y la presión hidroestática con la profundidad). El alcance en el régimen de fonomarcación depende de la potencia de la fuente de ruidos de las condiciones hidrológicas y de la sensibilidad del receptor.

2. Principio de trabajo de la EHL (SONAR).

El principio de determinación de la distancia con ayuda de la EHL consiste en la determinación del intervalo de tiempo (t) que transcurre entre los momentos de transmisión y recepción de la oscilación ultrasónica (el intervalo de tiempo necesario para que la oscilación ultrasónica recorra la distancia entre el buque, el objeto y de nuevo al buque), es decir:

$$Dh = \frac{1}{2} ct \qquad (207)$$

donde:

c - Velocidad del sonido en el agua.

La lectura de la distancia se toma de la escala del indicador (receptor), en el cual se lleva el registro de las señales reflejadas en el objeto submarino.

La escala del indicador está enumerada considerando el doble del recorrido de la distancia entre el buque y el objeto lo que permite tomar las lecturas directamente.

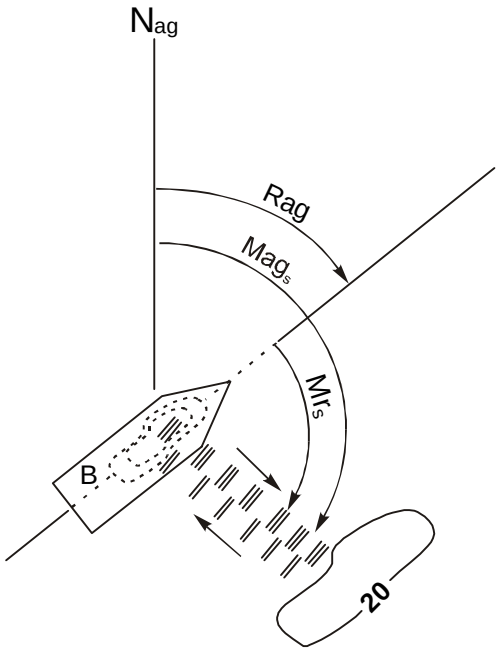


Fig. 263 Marcación ultrasónica

La dirección hacia los objetos submarinos se determina por la posición del vibrador con relación al plano diametral del buque (Mr_s).

En las estaciones de hidrolocalización modernas el vibrador puede ser orientado por el meridiano giroscópico, lo que permite obtener la marcación aguja hacia el objeto submarino (Mag_s) (Fig. 263).

3. Isobata de reflexión

Si la distancia y marcación se miden respecto a los llamados objetos submarinos puntuales (escollos, buques hundidos, reflectores submarinos), el ploteo de las correspondientes líneas isométricas y la obtensión de la posición observada se realiza por los métodos comunes en navegación.

Es mucho más complejo obtener la posición cuando las distancias y marcaciones se miden a la línea de costa o a los objetos del relieve del fondo marino.

Sucede que los impulsos de las oscilaciones ultrasónicas como regla; no se reflejan en la línea de la costa representada en la carta, sino en la parte que se encuentra aproximadamente a la profundidad del vibrador h_v.

Además, la propagación de las ondas ultrasónicas en línea recta es posible sólo en un medio acústico homogéneo, donde el gradiente de temperatura y salinidad es igual a cero (g_t=0, g_s‰ = 0).

Por lo general la temperatura y salinidad del agua varían con la profundidad, o sea que los gradientes g_t y g_s ‰ tienen valores desiguales a cero. En virtud de este fenómeno se observa la refracción de las oscilaciones ultrasónicas. Las investigaciones han demostrado que los haces se inclinan hacia donde la velocidad del sonido es menor. Al mismo tiempo, en la variación de la velocidad del sonido tiene una influencia determinante el gradiente de temperatura g_t.

Se diferencian dos tipos de refracción (Fig. 263).

- Positiva cuando $g_t > 0$ por lo que el haz sonoro se inclina hacia la superficie (FC).

- Negativa cuando $g_t < 0$, por lo que el haz sonoro se inclina hacia el fondo (FD).

De esta forma, cuando se mide la distancia hasta la línea de la costa, en dependencia del tipo de refracción y profundidad del vibrador h_V los impulsos de las oscilaciones ultrasónicas se reflejarán en distintos puntos del fondo B, C ó D que se encuentra a diferentes profundidades h_1, h_2 y h_3.

En la figura 264 se ve cuando no se conoce la posición de la isobata de reflexión, al plotear las distancias medidas hasta la línea de la costa señalada en la carta, el navegante puede cometer los errores ΔD_1, ΔD_2 y ΔD_3.

La magnitud de estos errores dependerá de la inclinación del fondo y de la magnitud del gradiente de temperatura g_t.

Para un gradiente de temperatura pequeño y una inclinación considerable del fondo ; la magnitud del error en la distancia será pequeña.

Si por el contrario el gradiente de temperatura posee un valor considerable y el fondo es prácticamente liso, el error en la medición de la distancia es grande y se hace necesario considerarlo. Partiendo de estos razonamientos, las isobatas de reflexión en las zonas peligrosas para la navegación (estrechos, pasos, etc). deben aparecer trazadas en las cartas.
La posición de las isobatas de reflexión se determina de forma experimental.

Cuando hay buena visibilidad el buque se aproa a un rumbo recomendado, por ejemplo para el paso de un estrecho. El vibrador de la estación de hidrolocalización se coloca en la marcación relativa:

$$Mr = 90° \frac{E_R}{B_R}$$

En intervalos de tiempo aproximadamente iguales cuando el buque hace exactamente el rumbo dado, se mide la distancia hasta la línea de la costa y se anota la hora y lectura de la corredera. Es recomendable medir la profundidad. A un mismo tiempo se determina la posición del buque por los objetos costeros por los métodos más exactos en las condiciones dadas.

Posteriormente en la carta de mayor escala se plotea la línea del rumbo efectivo del buque según las posiciones obtenidas y en ella se señalan los puntos correspondientes a los momentos de las mediciones.

Desde estos puntos, en la escala de la carta perpendicular a la línea del R_V se trazan los segmentos correspondientes a las distancias medidas. Los extremos de estos segmentos se unen por una línea curva que representará la isobata de reflexión para las condiciones hidrológicas dadas.

La isobata de reflexión se traza en la carta con tinta china de color o lápiz de color señalando los valores de los gradientes de temperatura y salinidad que ella corresponde (las magnitudes g_t y $g_{s‰}$ se toman de las descripciones hidrometeorológicas de la región de navegación).

La posición de la isobata de reflexión se debe determinar para cada estación del año, lo que permite elevar la seguridad de la posición cuando se navega en esta región en condiciones de poca visibilidad (Fig. 264).

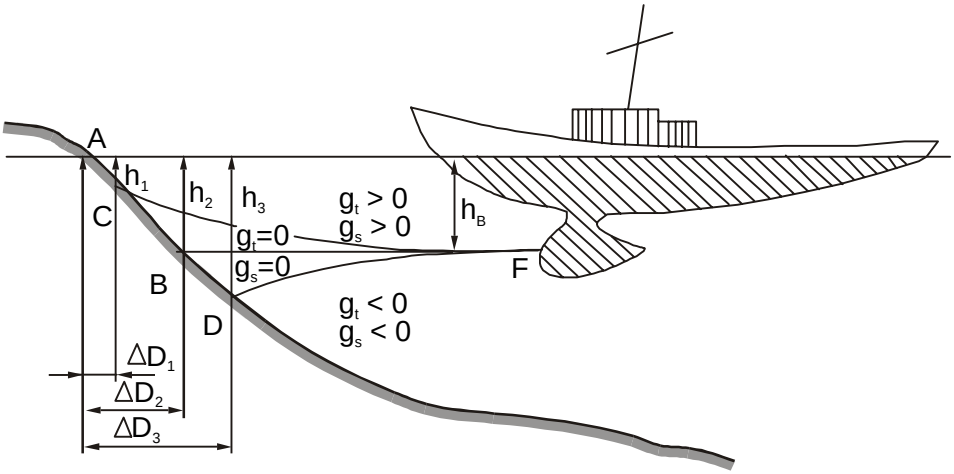


Fig. 264 Trayectoria de propagación de la oscilación ultrasónica en dependencia del signo del gradiente de temperatura

4. Determinación de la posición del buque por las distancias mínimas hasta la isobata de reflexión

Cuando no existe a la vista del buque objetos costeros visuales y objetos de referencia submarinos puntuales, la posición del buque puede ser determinada, cuando el buque se acerca a la costa, por el método de las distancias mínimas a las isobatas de reflexión.

Este método tiene gran inportancia cuando se navega en condiciones de poca visibilidad, donde utilizar el radar es imposible por determinadas causas.

La esencia del método consiste en lo siguiente:

Cuando el buque se acerca a la costa se designa un sector de rastreo (por lo general 90° - 0° - 90°) de acuerdo a la posición de estima. Después de recibir las señales reflejadas, desde la posición de estima se plotean las distancias y marcaciones correspondientes a ellas, para el reconocimiento de la isobata de reflexión (por lo general en las regiones de los cabos, bahías, etc). Luego en la dirección de los sectores de la isobata de reflexión reconocidos se realiza una serie de mediciones de distancias. En el momento de las mediciones centrales se anota la hora y la lectura de la corredera.

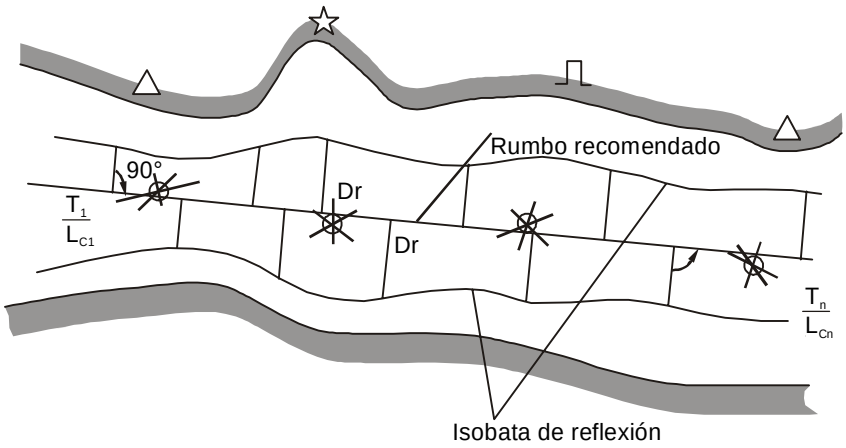


Fig. 265 Isobata de reflexión

Si se requiere controlar la certeza de las mediciones se puede proceder a la medición de la profundidad. Por lo general el acercamiento a la costa, y especialmente en condiciones de poca visibilidad, se realiza a poca máquina, por lo que la reducción de las mediciones a un momento de observación no se hace necesario.

En cada serie se escojen las distancias mínimas D_{1min} y D_{2min}.

Esto es muy fácil de determinar en el registrador de acuerdo al carácter del registro (Fig. 266). Luego en el papel de calcar se traza una línea paralela a la línea del rumbo verdadero (rumbo efectivo) y se escoje en ella un punto 0 arbitrario, desde el cual se trazan arcos de circunferencia I - I y II - II de radios D_{1min} y D_{2min} en la escala de la carta.

El papel de calcar se coloca en la carta y se mueve sobre ésta de tal forma, que las líneas del rumbo verdadero en ambas queden paralelas y en tal posición, donde los arcos de circunferencias II - II y I -I sean tangentes a la isobata de reflexión en la región reconocida de la costa. La posición fija será el punto 0, que se traslada a la carta por un pequeño orificio en el papel de calcar.

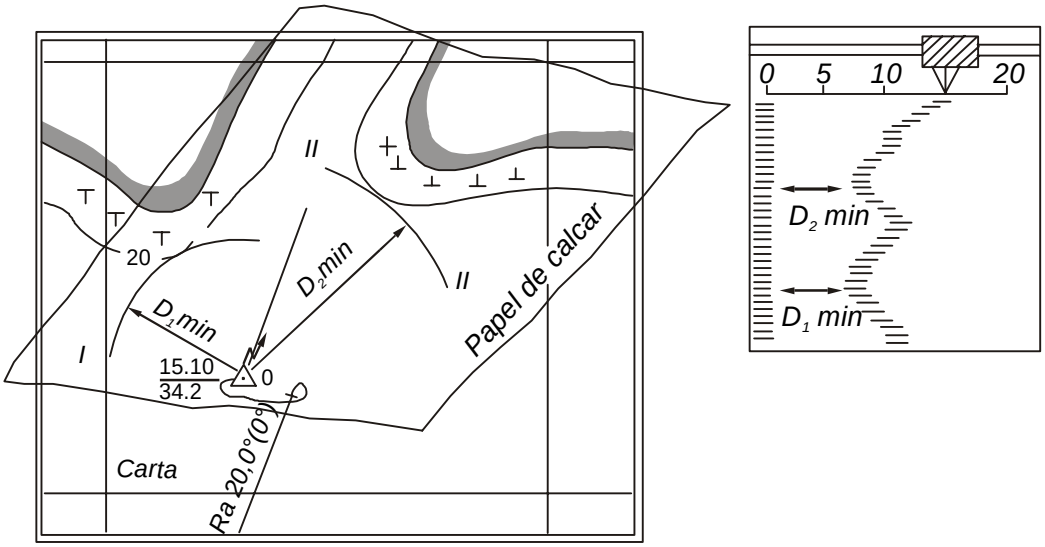


Fig. 266 Determinación de la posición del buque por las distancias mínimas hasta la isobata de reflexión

En el cuaderno de guardias de navegación las anotaciones se realizan de la siguiente forma:

1510	Lc = 34.2 Comenzamos a medir la distancia hasta la isobata
- -	de reflexión 20m ; Dr=10,1 cab. ; He=27m ; Dr=10,1 cab.
- -	ΔD=0; φ_o=69°15,7 ' N , λ=31°11,4 ' E ; C = 310° - 2,1 millas

Si la isobata de reflexión fue correctamente reconocida la exactitud en la determinación de la posición depende fundamentalmente de las condiciones hidrológicas, de la preparación del observador y del conocimiento de las correcciones de la estación de sonar en la distancia ΔD y en dirección $\Delta M_s = \Delta Mr_s$. Las estaciones de hidrolocalización bien reguladas poseen:

$$\Delta D = 0 \quad y \quad \Delta M_s = \Delta Mr_s = \Delta g.$$

Resumiendo señalaremos que la posibilidad de errores en el reconocimiento del sector de la isobata de reflexión es bastante grande, por lo que nunca se debe determinar la posición sólo por este método.

Sólo cuando no existe dispersión en las observaciones consecutivas se puede considerar que la posición es segura.

5. Determinación de la posición por marcaciones a objetos de referencia puntuales

Este método se utiliza, como regla, cuando en la región de navegación cerca del rumbo del buque se poseen algún tipo de emisores submarinos de sonido, cuyas posiciones se conocen con exactitud, u objetos puntuales (rocas, buques hundidos).

En el primer caso las EHL se utilizan en el régimen de fonomarcación y en segundo en el régimen de ecomarcación.

La determinación de la posición del buque por dos y tres marcaciones medidas por el sonar se realiza de la siguiente forma:

Al operador del sonar se le asigna un sector de búsqueda de acuerdo a la posición de estima. Despúes de detectar el punto de referencia submarino y de ser éste reconocido, por orden del navegante se comienza a tomar las marcaciones agujas o relativas.

En primer lugar se miden las marcaciones verdaderas (relativas) a los objetos submarinos que se encuentran por marcaciones relativas más agudas. En dependencia de la velocidad de movimiento del buque, la hora y lectura de la corredera se anotan para cada marcación o en el momento de la última medición. Es conveniente medir simultáneamente la profundidad.

Por último las marcaciones medidas se corrigen y se determinan las marcaciones verdaderas $Mv = Mag_s + \Delta M_s$ ó $Mv = Rag + Mr_s + \Delta M_s$, se reducen a un mismo instante de observación (punto 6,4, capítulo VI), y se plotean en la carta desde los puntos de referencia submarino.

En el punto de intersección de las marcaciones se encontrará la posición del buque, valorando su exactitud según lo expuesto en el punto 9.1del capítulo IX.

En el cuaderno de guardias de navegación se hacen las anotaciones:

1517	Lc = 11,4 Buque hundido M_s= 325,0° roca M_s= 45,0°
- -	Δg= +1,0° φ_o=67°18,6 ' , λ_0 =31°,15' E
- -	C = 310°- 3,1 millas.

Para evitar graves errores se recomienda comparar las profundidades de las cartas con las profundidades medidas.

Si cuando se determina la posición por tres marcaciones se forma un triángulo de error grande, es necesario repetir el reconocimiento de los puntos de referencias submarinos, y, después de ello, determinar la posición del buque.

6. Determinación de la posición del buque por distancias hasta los objetos de referncias puntuales

Este método se utiliza en aquellos casos, cuando en la región de navegación se encuentra dos o tres objetos submarinos notables cerca del rumbo del buque.

La determinación de la posición del buque se realiza de la siguiente forma: En la carta se seleccionan los objetos submarinos de referencia de acuerdo a la posición de estima y se lee asigna el sector de búsqueda.

Después de detectar y reconocer los objetos submarinos, a la orden del navegante, el operador hidroacústico comienza la medición de las distancias hasta los objetos (primero la distancia hasta los objetos que se encuentran por el **través**).

Para evitar grandes errores en la medición de las distancias hasta los objetos deben medirse durante 25 - 30 segundos. La hora y lectura de la corredera se anotan para el momento de las mediciones medias en cada serie de distancias.

Las distancias D_{B1} D_{B2} ó D_{B1} D_{B2} D_{B3} se corrigen por la variación de la velocidad del sonido respecto al valor calcualdo (para la cual está regulada la EHL).

Luego en una carta de escala mayor, con radios iguales a las distancias corregidas y desde las posiciones de los objetos se traza arcos de circunferencias I - I, II - II, III - III), en cuya intersección se encontrará la posición observada del buque . Se debe valorar su exactitud (Fig. 266,punto 9.4, cap. IX).

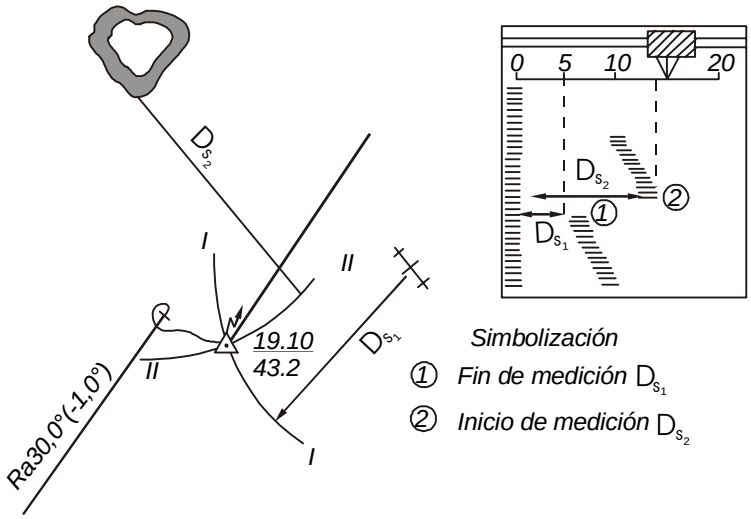


Fig 267. Determinación de la posición del buque por distancias hasta objetos submarinos

Si es necesario las líneas isométricas de distancia se reducen a un momento de observación.

En el cuaderno de guardias de navegación se anota:

1910	Lc = 43,2 Faro Cayo Confites D_s=6,2 cables, buque hundido
- -	D_s =14,3 cables ΔD=+1,0 cables, φ_o =22°11,86'N, λ_o=77°39,1'W
- -	C = 30°- 1,0 millas.

Para valorar la seguridad de la posición observada, al mismo tiempo que se miden las distancias hasta los objetos submarinos, las marcaciones y la profundidad.

La divergencia brusca entre las posiciones obtenidas por distancias y marcaciones o la no correspondencia entre las profundidades medidas y las profundidades en la carta, señalan como regla, que los errores se encuentran en el reconocimiento de los puntos de referencia o en las mediciones realizadas..

Es necesario considerar, además, que la variación del régimen hidrológico en la región de navegación, puede introducir errores considerables en los parámetros de navegación, lo que influye en la exactitud de la posición observada.

Por eso, cuando se determina la posición con ayuda del sonar, se debe llevar la estima del buque lo más posible en cartas de la mayor escala, medir sistemáticamente las profundidades y en el momento conveniente realizar una observación por métodos más exactos.

7.14 Determinación de la posición del buque con ayuda del sondador

1. Medición y registro de la profundidad en el buque

En las cartas náuticas, en dependencia de la escala, el carácter del fondo y el número de mediciones realizadas, se plotea el relieve submarino, que puede ser utilizado para la determinación de la posición del buque por profundidades.

Por su principio, cualquier método de determinación de la posición, consiste en la comparación de las profundidades medidas con las profundidades mostradas en la carta.
En los buques modernos la medición de la profundidad se realiza con el sondador acústico (ecosonda) que trabaja basándos en el principio de medición del intervalo de tiempo que transcurre para que el impulso ultrasónico recorra el espacio entre el vibrador transmisor, el fondo y el vibrador receptor.

$$H_V = \frac{1}{2} ct, \qquad (208)$$

donde:

c - velocidad del sonido en el agua, para la cual está calculada la ecosonda.

t - iIntervalo de tiempo que transcurre entre el momento de irradiación del impulso ultrasónico y el momento de la recepción.

La escala del indicador de profundidad de la ecosonda está dividida de acuerdo a la doble trayectoria del impulso ultrasónico, lo que permite tomar la lectura de la profundidad en su valor real.

En algunos sondadores acústicos paralelamente al indicador de profundidad se conecta el registrador automático, el cual realiza el registro de la profundidad en una cinta de papel que se mueve con velocidad constante.

2. Corrección de las profundidades medidas

Las profundidades medidas con la ecosonda son corregidas con una serie de correcciones.

a) Corrección por la profundidad de instalación de los vibradores

En la figura 268 se observa que la profundidad del mar H se diferencia de la profundidad medida por la ecosonda en la magnitud de la profundidad de instalación del vibrador ΔH_c, la cual se determina por el calado del buque o puede ser tomada del formulario técnico de la ecosonda.

$$H = H_s + \Delta H_c \qquad (209)$$

Es necesario señalar que la magnitud ΔH_c puede ser considerada en la regulación de la ecosonda, por lo que la lectura de la profundidad se toma para la superficie del mar.

b) Corrección por la variación de la velocidad del sonido en el agua

En dependencia de las condiciones hidrológicas la velocidad del sonido puede diferenciarse de aquella velocidad, para la cual está calculada la ecosonda y, por consiguiente, la lectura del equipo será errónea.

Para la aplicación de las correcciones a la profundidad por la variación de la velocidad del sonido ΔH_v, se utilizan tablas especiales, como la tabla 34-a, 34-b, 34-c de laTUN. La tabla 34-a está calculada por la fórmula:

$$Co = 1448{,}6 + 4{,}618\ t - 0{,}0523\ t^2 + 0{,}00023\ t^3 + 1{,}25\ (S-35) - 0{,}011(S-35)t,$$

y da la velocidad del sonido en la capa superficial en dependencia de la temperatura del agua (t) y la salinidad ‰.

.

La tabla 34 - b está calculada por la fórmula:

$$C = 0{,}00175H,$$

y da la corrección de la velocidad de sonido por la presión hidroestática.

La magnitud H generalmente se toma como 0,5 H, donde H_s profundidad media con el ecosonda.

De esta forma la velocidad del sonido para las condiciones hidrológicas dadas se determina por la fórmula:

$$C = C_o + \Delta C$$

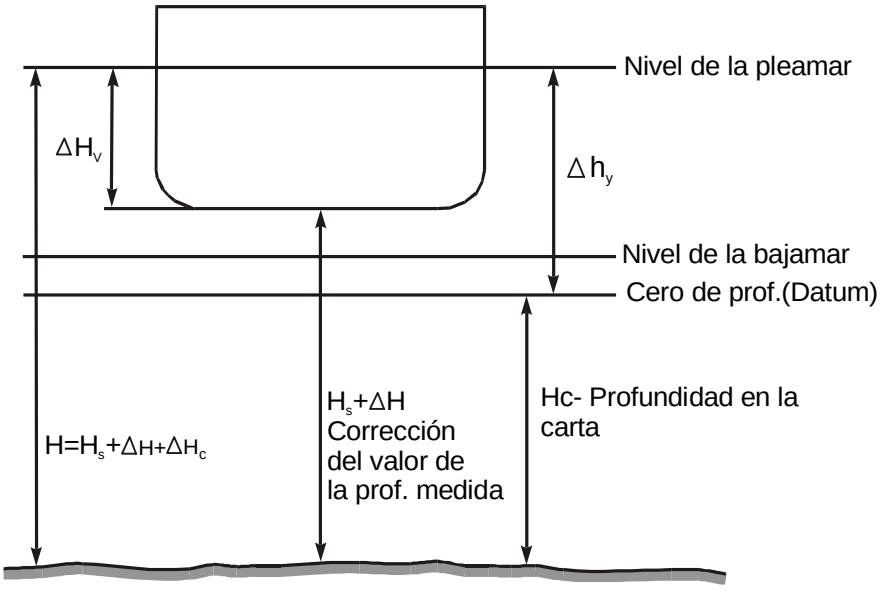


Fig. 268 Correccción de las profundidades medidas por la ecosonda

La tabla 34 - b correspondiente a las TUN da la corrección de la profundidad medida por la ecosonda y está calculada por la fórmula:

$$\Delta H = H_S \frac{C - C'}{C'},$$

donde:

H_s- Profundidad medida por la ecosonda.

C' - Velocidad del sonido, para la cual está calculada la ecosonda.

C - Velocidad del sonido para la hidrología dada del mar y calculada por las tablas 34 - a y 34.

El valor corregido de la profundidad será:

$H = H_s + \Delta H_c + \Delta H$ (para la regulación de la ecosonda desde la superficie);

$H = H_s + \Delta H$ (para la regulación de la ecosonda desde los vibradores).

En las cartas náuticas las profundidades están reducidas a la bajamar. Por eso al comparar las profundidades de las cartas con las profundidades medidas y corregidas, es necesario reducir estas últimas al valor de la bajamar.

Señalaremos que este trabajo se realiza sólo en los casos cuando se navega en aguas poco profundas (menos de 50 metros) en los mares, donde las oscilaciones del nivel son mayores de 50 cm.
La magnitud de la corrección Δh_y se toma de las tablas de mareas para el momento de la medición de las profudidaes. Entonces:

$$H = H_s + \Delta H + \Delta H_c - \Delta h_y, \text{ ó } H = H_s + \Delta h_y$$

En las cartas rusas el valor de Δh_y siempre es positivo (Fig. 268).

3. Determinación de la posición del buque por profundidades

Existen varios métodos de determinación de la posición del buque por profundidades. Analicemos los más empleados.

a) Determinación de la posición del buque por el rumbo y profundidades

La esencia del método consiste en la comparación de las propfundidades medidas con la ecosonda en determinados intervalos de tiempo sobre la línea del rumbo del buque, con las profundidades señaladas en la carta en la región de la posición de estima. En la práctica la posición del buque se determina de la siguiente forma.

En una carta de escala mayor (1:50 000 y mayores), en la región de la posición de estima, se miden las distancias entre las señales de profundidad. Se calcula el valor medio de los intervalos de tiempo, necesarios para que el buque pase de una señal a otra:

$$t^m_{med.} = \frac{S_m 60}{V_{(nudos)}}. \qquad (210)$$

Con antelación se conecta la ecosonda considerando la posición de estima y se miden las profundidades en los intervalos de tiempo calculados, anotando simultáneamente, la hora y lectura de la corredera. Las profundidades medidas se le aplican con las correcciones correspondientes, y, si es necesario, se reducen a la bajamar que se señala en la carta.

En una hoja de papel de calcar se traza la línea del rumbo verdadero (efectivo) y un meridiano. Sobre la línea del rumbo, desde un punto arbitrario en la escala de la carta, se plotean las posiciones de estima para los momentos de las mediciones de las profundidades, al lado de las cuales se anotan las profundidades; en los puntos inicial y final de las mediciones se anota la hora y lectura de la corredera (Fig. 269).

El papel de calcar se coloca en la carta en la región de la posición de estima y moviéndolo de tal forma, que la línea del rumbo en la carta y en el papel sean paralelos todo el tiempo, se busca la coincidencia del mayor número de profundidades.

Si el número de las coincidencias es no menor de 5 - 6 profundidades, se obtiene una posición fija para el momento de las últimas mediciones, la cual se traslada a la carta perforando el papel con un compás.

Si con la posición paralela de las líneas del rumbo en la carta y en el papel no se logra hacer coincidir las profundidades, entonces el papel de calcar se puede mover por la carta hacia uno u otro lado, suponiendo que existe un error en el ángulo de abatimiento o deriva.

Es importante señalar que, lograr que la coincidencia de las profundidades sea exacta sucede con poca frecuencia, por eso la seguridad de la posición aumenta considerablemente si en la región de navegación existe algún tipo de profundidades distintivas o bancos que no sean peligrosas para la navegación.

Esta condición debe considerarse al plotear los rumbos, teniendo cuidado de que ellos pasen de acuerdo a las posibilidades, por las regiones donde el relieve del fondo sea característico.

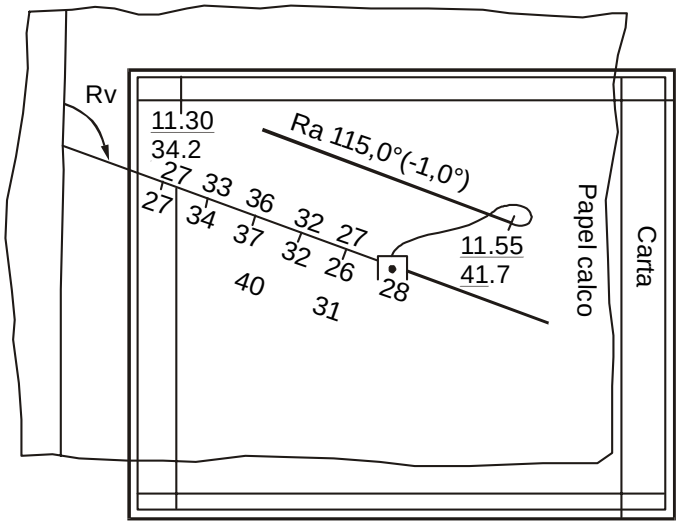


Fig. 269 Determinación de la posición del buque por el rumbo y profundidades

En el cuaderno de guardias de navegación se hacen las anotaciones siguientes:

1135	Lc = 35.7. Conectamos la ecosonda para determinar la posición
- -	por el relieve del fondo para H_o= 32 m, ΔH = + 2.0 m
1140	L_c = 37,2. H_s = 33 m, ΔH = + 2,0 m, etc.
1155	L_c = 37,2. H_s = 26 m, ΔH = + 2,0 m, Determinamos la posición por
- -	El rumbo y las profundidades. φ_o = 44°15;6 N, λ_o = 29°57,3 E.
- -	C = 230° - 1,2 millas. Desconectamos la ecosonda.

b) Determinación de la posición del buque por el método de la isobata corrida

Si en la región de navegación en cartas están ploteadas las isobatas formando ángulos no menores de 25° - 30° unas con respecto las otras, entonces ellas pueden ser utilizadas como líneas de posición para determinar la posición del buque.

La esencia del método expuesto es similar a la marcación corrida.

Supongamos que al encontrarnos por estima en el punto M_1, con ayuda de la ecosonda se anota el paso por la isobata I - I, registramos simultaneamente la hora y lectura de la corredera $(T_1 y Lc_1)$.

Cuando transcurre determinado intervalo de tiempo, al encontrarse el buque por estima en la posición M_2, se registra el paso por la isobata II - II, donde se anota la hora y lectura de la corredera $(T_2 y Lc_2)$.

Evidentemente la posición puede ser determinada por el espacio recorrido por el buque $Sc = (Lc_2 - Lc_1)Kc$ entre las correspondientes isobatas paralelamente a la línea del rumbo.

El procedimiento más práctico para obtener ese resultado es correr la isobata I -I en la magnitud del espacio recorrido por el buque entre ambas mediciones $Sc = (Lc_2 - Lc_1)Kc$, paralelamente al rumbo.

En la práctica la posición del buque por el método de la isobata corrida se realiza de la siguiente forma:

Se selecciona en la carta sobre la trayectoria del buque, las isobatas distribuidas como se describió anteriormente, con ángulos de 25 - 30° entre sí. Si las condiciones lo permiten temporalmente se varía el rumbo del buque calculando cortar las isobatas con ángulos próximos a 90°. Con anticipación se conecta la ecosonda y en los momentos cuando se cortan las isobatas señaladas se anota la hora y la lectura de la corredera.

En un papel de calcar se traza un meridiano y la línea del rumbo (rumbo efectivo) del buque. Se calcula el espacio a recorrer por el buque entre las isobatas y se plotea sobre la línea del rumbo a partir de un punto A arbitrario, obteniéndose el punto B.

El papel se coloca en la carta de tal forma que las líneas de los rumbos coinciden y que el punto B se encuentre en la isobata I -I. En esta la posición la isobata se traslada hacia el papel de calcar (Fig. 269a).

Luego el papel de calcar se desplaza por la línea del rumbo hasta la posición en que el punto A se sitúe en la isobata I - I (Fig. 269 b).

De esta forma la isobata I - I se encontrará traslada en la magnitud del espacio recorrido por el buque S_c y ocupa la posición I' - I'.

La posición estima observada Mo se encuentra en la intersección de la isobata II - II con la isobata I' - I', la cual se traslada a la carta por un pequeño orificio en el papel de calcar.

En el cuaderno de guardias de navegación se hacen las siguientes anotaciones:

1130	Lc = 41,6. Conectamos la ecosonda para la determinación de la
- -	Posición por el relieve del fondo H_o= 48,5 m, ΔH = + 1,5 m.
1050	L_c = 47,9. H_s = 20 m, ΔH =0. Determinamos la posición por las
- -	Isobatas de los 50 y 20 metros, φ_o = 43°57;3 N, λ_o = 29°56,3 E.
- -	C = 35° = 1,2 millas.

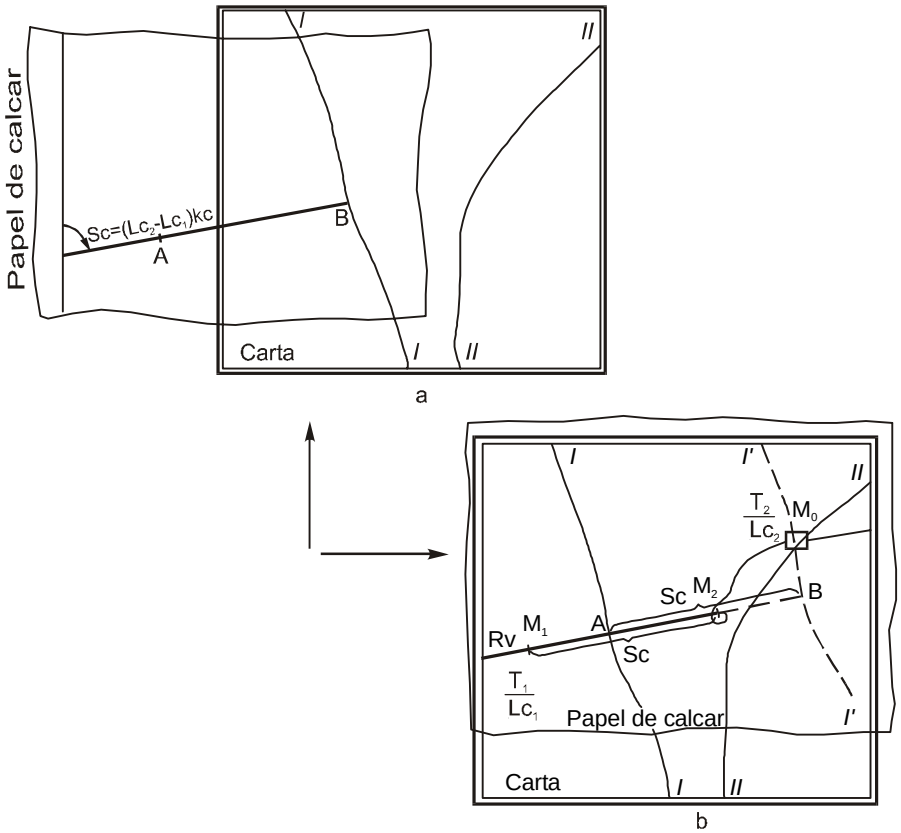


Fig. 270 Determinación de la posición por el método de la isobata corrida

c) Determinación de la posición por profundidades características

Si el rumbo del buque corta profundidades características, buque pequeños no peligrosos con relación a la navegación o isobatas que tienen curvaturas características, la posición del buque puede ser determinada con suficiente exactitud (Fig. 270).

Efectivamente, si se registra el momento de paso sobre la profundidad característica (10 metros) que ocupa un área no muy grande, entonces la posición fija se encontrará en el punto A.

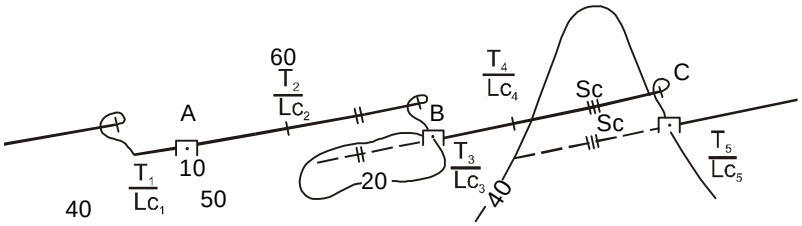


Fig. 271 Determinación de la posición del buque por profundidades características

Si se registra el momento de paso sobre el banco, entonces la posición puede ser determinada situando la distancia recorrida $Sc = (Lc_2 - Lc_1)Kc$ paralelamente a la línea del rumbo (rumbo efectivo) entre la isobata cerrada que limita este banco (punto B).

Por un procedimiento análogo la posición puede ser determinada por la intersección de las isobatas que poseen curvaturas características (punto C).

d) Métodos combinados de determinación de la posición del buque mediante medición de profundidades

Las isobatas como líneas isométricas de profundidad pueden ser utilizadas en combinación con las líneas isométricas de otros parámetros de navegación (marcación, radiomarcación, recta de altura, etc) para la determinación de la posición del buque.

Efectivamente, si en el momento de paso por una isobata se mide una marcación al objeto A, entonces la posición fija se encontrará en el punto de intersección de esta isobata con la línea de marcación (Fig. 272).

Este método se utiliza con más frecuencia el acercarse a la costa, cuando por determinadas causas no se puede medir la distancia hasta el objeto simultaneamente con la marcación.

Resumiendo, es necesario señalar que la exactitud de las observaciones por las profundidades depende de muchos factores y entre ellos de la autenticidad de las profundidades señaladas en la carta, del número de mediciones, del carácter del relieve del fondo, de la exactitud de las mediciones de profundidad y de la dirección de movimiento del buque con relación a la isobata.

En virtud de estos razonamientos respecto a la posición determinada por profundidades, debe tomarse críticamente y en la primera oportunidad, comprobar esta posición por otros métodos más exactos.

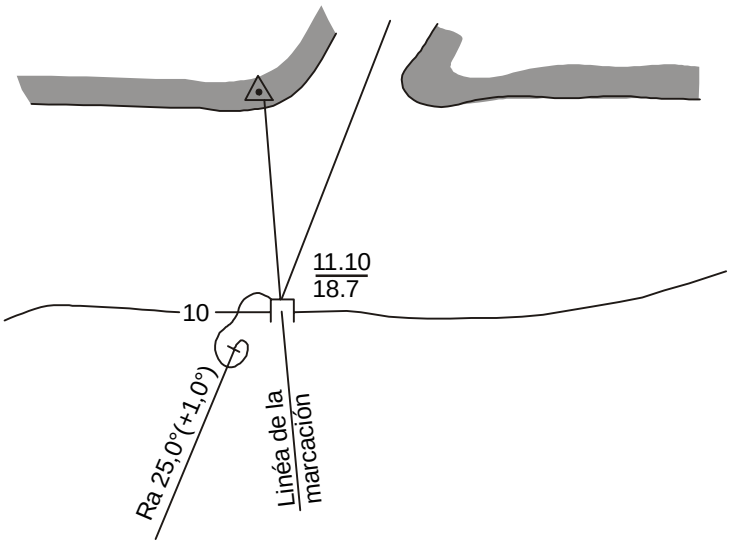


Fig. 272 Determinación de la posición del buque por marcación y profundidad

4. Utilización de la ecosonda en la aproximación a la costa y en el fondeo

Además de la determinación de la posición la ecosonda se utiliza para prevenir al navegante sobre la proximidad de profundidades peligrosas, lo que tiene gran importancia cuando el buque se acerca a la costa después de una navegación prolongada por estima, cuando se navega en aguas poco profundas así como en las regiones con el relieve submarino complejo.

En estas condiciones, para asegurar la nevegación es necesario:

- En dependencia del calado del buque señalar en la carta las isobatas peligrosas las cuales no se recomienda rebasar.

- Los rumbos del buque deben distribuirse lo más perpendicular posible a las isobatas, lo que permite registrar el momento del paso por ellas con mayor exactitud.

- Conectar la ecosonda con anticipación y observar la variación de la profundidad, controlar la posición del buque con relación a los peligros submarinos y las isobatas peligrosas.

- Sistemáticamente determinar la posición del buque por todos los métodos posibles en las condiciones dadas. La comparaciónde de las profundidades madidas con las profundidades en la carta de la región de la observación permite valorar su seguridad.

La medición de las profundidades es necesario realizarlas también cuando el buque se acerca a la posición de fondeo. Esto permite determinar con anterioridad la cantidad de cadena a lascar y eliminar la posibilidad de fondear el ancla a grandes profundidades, lo que puede provocar su pérdida.

7.15 Sistemas de radionavegación LORAN - C

La Loran proviene del inglés **LO**ng - **RA**nge - **N**avegation, es decir, sistema de radionavegación de largo alcance. Originario de EE.UU. en el año 1940, es utilizado en la II guerra mundial y en la guerra de Corea como Loran.

El primer sistema básico conocido como Loran A, se despliega a partir de los años 1955 -70 y se convierte en el de mayor alcance en ese tiempo (1400 millas) gracias a la onda espacial y con 450 - 800 millas desde la línea de base, de día, con la señal superficial. No obstante se realizaron estudios , de la posibilidad de extenderse hasta las regiones del óceano medio, pero la idea fue abandonada debido a las dificultades en sincronizar las estaciones y que estas distinguieran la onda superficial de la espacial, producido el fenómeno por la corta reflexión en el tiempo de la onda espacial a bajas frecuencias.

Las dificultades del sistema Loran - A y el conocimiento adquirido en las investigaciones de la evolución fásica de las señales, puesta a prueba en el sistema Decca, fueron las premisas que desarrollaron la escalada hacia una novedosa fusión: el Loran C, un sistema que mide el tiempo y la fase de la señal.

a) Posicionamiento

La hipérbolas de posición del sistema fásico y del sistema de tiempo, tienen las mismas características físicas. El estudio del principio de trabajo del sistema Decca, deja sentadas las bases de la comprensión del trabajo del Loran C, cuando utiliza la fase de la señal en el calculo de la hipérbola de posición del buque. Así para determinar la posición, se realiza la medición de la diferencia de tiempo en que llegan las señales al receptor y luego se calcula la diferencia fásica entre las señales de la estación maestra y

esclava. Del par de estación se obtendrá la hipérbola de posición conocida y se necesitará otro par, que nos proporcione la segunda hipérbola, imprescindible para determinar la posición definitiva de nuestra embarcación.

Esta acción no es nueva, sin embargo, hay un elemento inédito introducido que puede generar algunas preguntas.

¿ Qué función realiza el tiempo en la determinación de la posición?

¿ Utilizar la medición de la fase no complica el problema e introduce la indefinición del parámetro?.

El sistema Loran A, un sistema de tiempo o impulso, como también se le conoce a este principio de trabajo seleccionado para su diseño, es obviamente uno de los pilares conocidos sobre los que se fundamenta el Loran C, por lo que creemos conveniente indagar sobre su trabajo. En el Loran A, las diferencias de distancias entre el buque y la estación, se determinan por la comparación entre los intervalos de tiempos durante los cuales, las señales de ambas estaciones, recorren las distancias hasta el buque.

b) Principio de trabajo de los sistemas Loran A

En la costa se instalan 4 estaciones, una de ellas es la estación maestra. A diferencia de los sistemas fásicos que trabajan con oscilaciones amortiguadas, los sistemas de tiempo envían las señales en forma de breves impulsos, de ahí su nombre, con duración de 30 a 40 microsegundos (μ), unos 25 a 34 impulsos por segundos.

La estación maestra envía las señales al receptor del buque y son recibidas además por las estaciones esclavas. Estas últimas tienen un tiempo de espera, una vez recibida la señal de la maestra, antes de transmitir la suya propia, tiempo conocido como retardo interno o tiempo de retardo (tK), que puede variar de una estación esclava a otra. Esto significa que las señales no llegan al unísono al receptor. La diferencia de tiempo de recepción de ambas señales, es la utilizada para determinar la hipérbola de posición.

La fórmula que describe el pricipio está dada por:

$$\Delta t = (t_t - t_{EE}) - t_{EM}$$

$$t_t = tb + tk$$

donde: Δt = diferencia de tiempo entre las estaciones.

t_t = tiempo real.

t_{EE}= tiempo desde la estación esclava.

tb = retardo de base: correspondiente a la distancia entre la estación maestra y la esclava.

tk = tiempo de retardo interno de la estación esclava.

Observemos el siguiente ejemplo.

En la figura se observa un par de estaciones cuyas hipérbolas medidas, pasan por la posición A y B.

Comprobemos según la fórmula de calculo que emplea el sistema, el valor de la hipérbola que pasa por la posición A.

Para ello expresemos que la distancia base entre las estaciones es de:

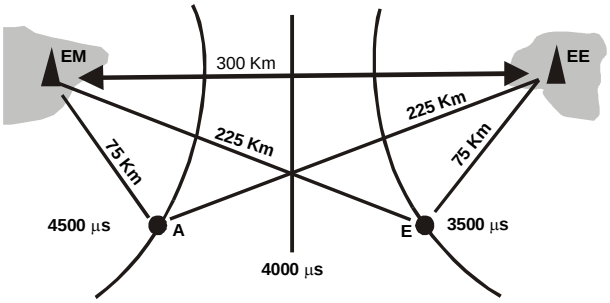
300 km = 1000 µs (tb).

$$t = \frac{S}{c} = \frac{300km}{300000km/s}$$

$$= 0{,}001s = 1000\mu s$$

225 km = 750 µs.

75 km = 250 µs.



Unidad µseg (microsegundos).

Fig. 273 Principio de trabajo de sistema Loran- A

Tiempo de retardo interno de la estación esclava 3000 µs.

$T_t = t_b + T_k = 1000 + 3000 = 4000\mu s$.

De la EM al punto A = 250 µs.

De la EE al punto A = 750µs.

$\Delta t = (t_t + t_{EE}) - t_{EM}$

$\Delta t = (4000 + 750) - 250$ µs.

$\Delta t = 4750 - 250$ µseg.= 4500

4500 µs es el valor de la hipérbola que pasa por la posición A. El mismo calculo puede realizarse en la posición B y se obtendrá el valor de 3500 µs. Como puede apreciarse en el ejemplo, ninguna hipérbola es igual a la otra en valor, son muy definidas y no existe por ese motivo multiplicidad de valores. Sin embargo los sistemas de tiempo deben mostrarse muy exacto. La señal electromagnética viaja a la velocidad de la luz y en tan extraordinaria velocidad, no cabe imprecisiones en la medición. Sería incalculable la inexactitud cuando se ubicara el buque con solo un segundo de error en la medición del tiempo.

En la actualidad se han modernizado los sistemas de transmisión costeros para alcanzar la mayor sincronización de las estaciones y que los receptores logren más exactitud en la medición, pero sigue siendo el sistema poco preciso.

La medición del tiempo proporciona una senda ancha, pero definirá cual es la hipébola de posición medida a través de la fase, que al mismo tiempo, proporcionará al sistema su exactitud, quedando inhibida así la multiplicidad de valores y establecido el principio del Loran C.

c) Características del sistema Loran C

El sistema está compuesto por una estación maestra (EM) y 4 estaciones esclavas (EE), nombradas (W) Whiskey), X (Rayor X), Y (Yankee) y Z (Zulú). Emitiendo a una frecuencia portadora de 100 kHz.

Como se conoce, el Loran transmite las señales en forma de impulso en lugar de señales de onda continua. El impulso adquiere su máxima amplitud durante los primeros 65 µseg de emisión y decrece exponencialmente hasta cero dentro de los 200 a 300 µseg.

El receptor Loran está diseñado para detectar la señal al comienzo del tercer ciclo de la frecuencia portadora (Fig. 274). Esto está determinado por dos razones:

En primer lugar, es suficiente el tiempo transcurrido para que el impulso adquiera la potencia necesaria y sea detectado por el receptor y en segundo lugar es suficiente el tiempo transcurrido entre el cominzo del primer y tercer ciclo para garantizar que el teceptor detecte los impulsos de las ondas superficiales y no las especiales (Fig. 274).

La EM emite 8 impulsos más 1, separados a 1000 µseg. cada impulso y el 9no a unos 2000 µseg. del resto. Este impulso identifica además a la EM y señala la sincronización a que trabajan el resto de las estaciones.

Las EE emiten solo 8 impulsos, separados a 1000 µseg. Para evitar la interferencia, cada estación transmite por orden; EM, W, X, Y, Z, distanciado en un tiempo conocido como tiempo de retardo, que identifica también la estación que está transmitiendo. El tiempo de retardo no es igual en todas las estaciones, incluso puede variar en otras cadenas.

En la tabla más abajo relacionada, puede observarse el tiempo de retraso que identifica las EE en la cadena del sur de los EE.UU.

7980 (GRI) **Tabla 7.4**

TIEMPO MÍNIMO DE RETARDO		MÁXIMO RETARDO
W	11000 µseg.	1461908 µseg.
X	23000 µseg.	3188676 µseg.
Y	43000 µseg.	4740376 µseg.
Z	59000 µseg.	6408544 µseg.

El intervalo de repetición del grupo (GRI), según las siglas en inglés, es el tiempo medido desde el primer impulso de la estación maestra, hasta el primer impulso de la EE en su nueva emisión. Las cadenas del Loran C pueden encontrarse unas al lado de las otras, ocupando grandes extensiones en la costa. Cada cadena tiene su propio ritmo de repetición de los impulsos y es lo que la identifica de la vecina. La cadena del sur de la Florida tiene un GRI de 79800 µseg., pero en los receptores solo se introduce los 4 primeros dígitos; 7980. La cadena de la costa este de los EE.UU., emite con un GRI de 99600 µseg.

El GRI puede variar en todo el mundo desde los 400000 - 99900 µseg.

Las estaciones esclavas tienen la posibilidad de trabajar para 2 cadenas distintas, siempre que se encuentren ubicadas en los extremos exteriores. Para semejante función, transmiten en dos ritmos de repetición diferentes.

Las bajas frecuencias y el alto poder de transmisión (1500 kWen algunos casos), ha permitido que la señal puede penetrar la superficie del agua, proceso este que facilita la determinación de la posición por submarinos sumergidos. Ningún sistema de radionavegación logra una condición similar y al Loran C le concede ventajas evidentes.

"Exactitud y cobertura"

A finales de la decada de los 60 y principios de la decada 70, se introduce el tiempo atómico que regula todas las transmisiones con gran precisión y las estaciones esclavas son renombradas estaciones secundarias.

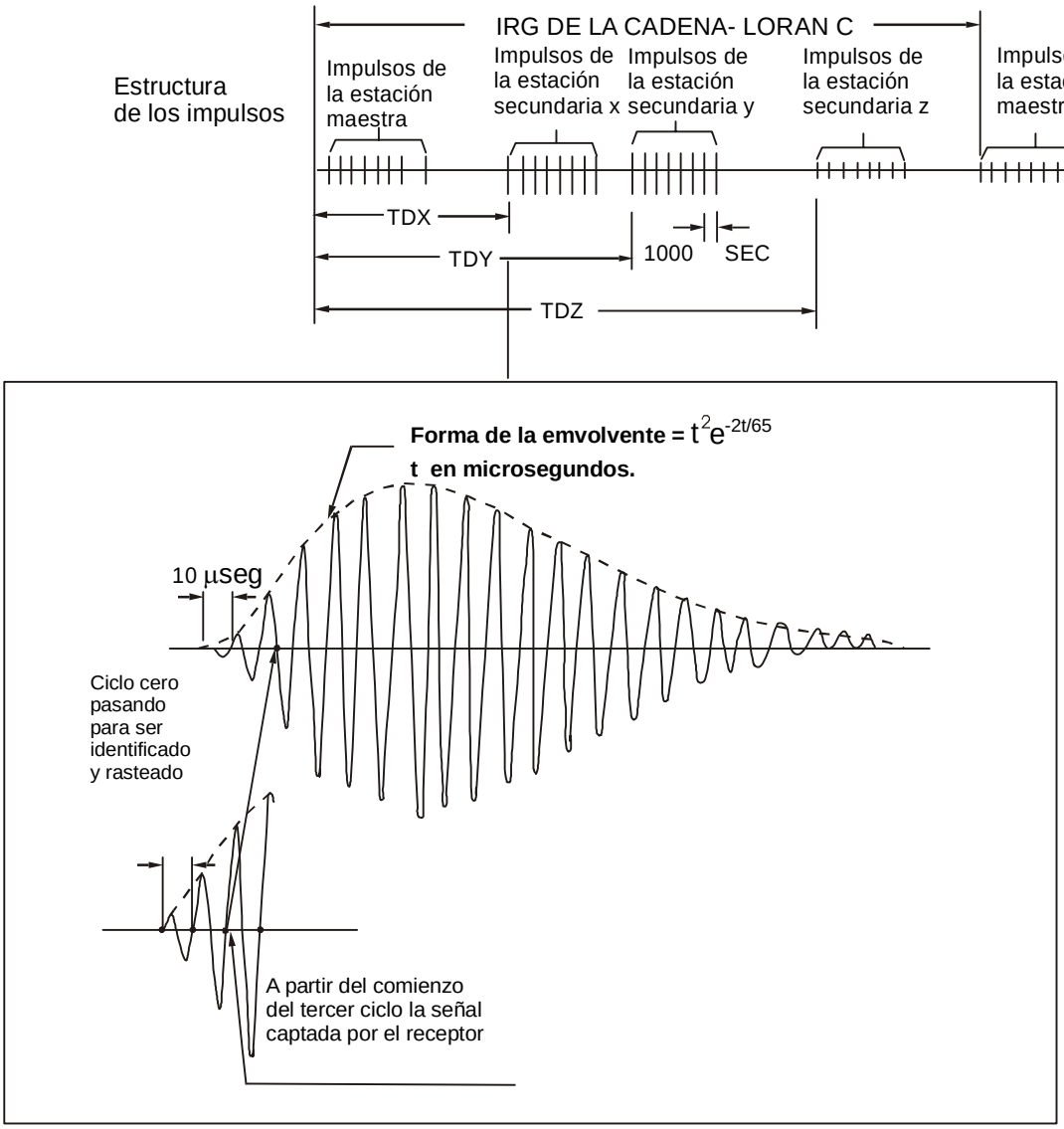


Fig. 274 Vista detallada de la forma de un impulso

Las ondas superficiales alcanzan las 1200 millas. La onda especial en el primer salto puede alcanzar las 2300 millas y en el segundo salto las 4000 millas desde la estación transmisora. El primer salto puede producirse de día, pero el segundo solo de noche.

El uso de los osciladores atómicos para la regulación de las transmisiones de las estaciones secundarias, ha permitido alejar la línea de base del Loran C, hasta 1500 millas, con logros en la exactitud para estas distancias de entre 182 y 457 metros, precisión que se hace más efectiva en la medida que nos acercamos al punto de emisión.

Las mediciones realizadas con las ondas superficiales, llegan directamente al receptor y mantienen la

regularidad de la fase de la señal. Por tal causa, se obtiene mayor efectividad cuando se utilizan para determinar la posición.

De noche, la señal espacial llega al receptor con un retardo de 30 a 40 μseg., permitiendo medir las diferencias de fases a través de las ondas superficiales. Sin embargo, a ciertas distancias, se podrán recibir señales espaciales y superficiales al unísono, generando interferencia a la entrada del receptor.

Los paquetes de impulsos reflejados varias veces sobre la ionosfera amplía la posibilidad de coincidir áun más con la onda superficial y aumentar la relación señal - ruido.

La situación crea beneficios, relacionados con una señal más nítida o potente a grandes distancias y puede ser controlada con el empleo en los receptores de codificadores fásicos, donde las fases entre ambas señales son rotadas a 90° una con respecto a la otra, pulso a pulso, evitando la interferencia y propiciando su identificación. Aún existiendo alto nivel de ruido, se rastreará la señal de la EM.

La onda espacial resulta inexacta para las mediciones, debido al tiempo que necesita para cubrir una distancia cualquiera. La reflexión en las altas capas de la ionosfera, existente durante la noche, no reflejo de la verdadera distancia que separa al buque del transmisor y deriva en un error en la medición por el receptor, como sistema de tiempo.

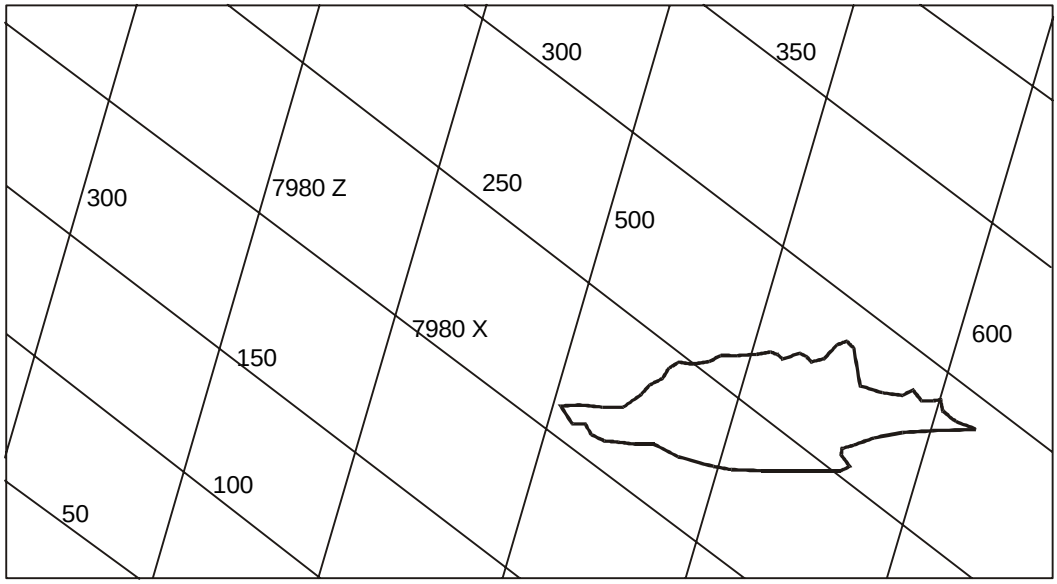


Fig. 275 Fragmento de una carta de Loran - C

La exactitud del Loran es comprometida durante el crepúsculo y períodos de mal tiempo. La velocidad de la señal de radio puede variar por las condiciones atmosféricas, tormentas eléctricas, disturbios eléctricos atmosfericos etc.Los errores ocasionados por estas causas son conocidos como errores variables, muy difíciles de compensar. La recepción puede **censurarse** totalmente.

Errores fijos: Se produce cuando la señal atraviesa la superficie de la Tierra o por lugares escabrosos, montañosos, cuidades, líneas de distribución eléctricas etc. No se corrige en el microcompensador del receptor y se hace necesario corregirlo en la carta, donde aparece como ASPF. (factor secundario adicional de fase). La corrección ASPF es matemáticamente posible utilizando el método Millinton expuestos en tablas o cartas especiales.

Si se utiliza un receptor Loran C, que exponga sus parámentros en latitud y longitud, puede que no se logre gran exactitud, si lo comparamos con las lecturas en μseg aportadas para el trabajo en las cartas especiales.

Las líneas de posición en las cartas especiales se muestran más unidas en las áreas cercanas a la línea de base. La exactitud del ploteo de la hipérbola, por esta causa, se advierte con mayor facilidad. En la misma medida que nos alejamos del área de transmisión veremos la acción contraria, el ancho entre las hipérbolas se amplia con la distancia y decrece la precisión.

AREA DE COBERTURA DEL LORAN - C EN LAS DIFERENTES REGIONES

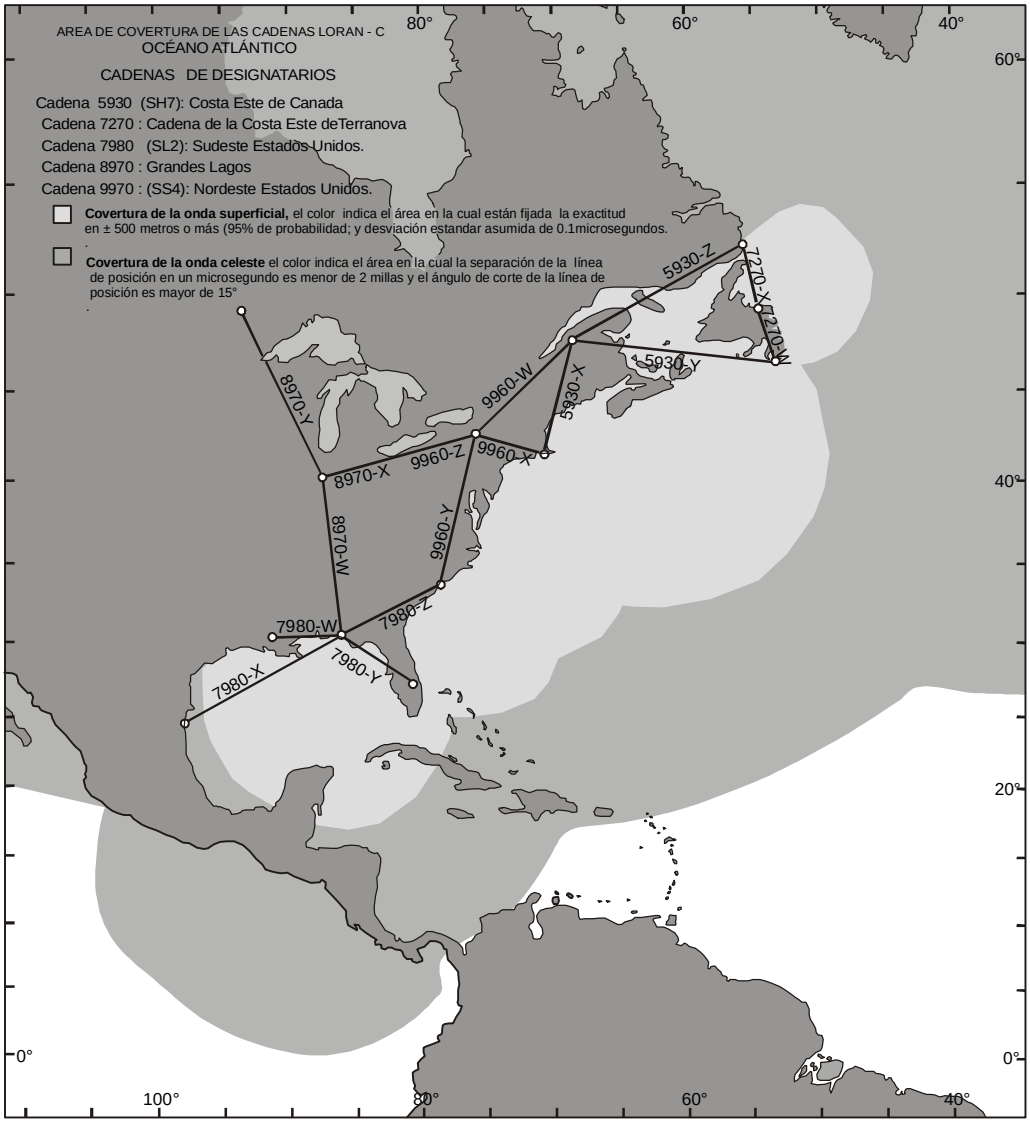


Fig. 276 Área de cobertura de las cadenas Loran-C Océano Atlántico

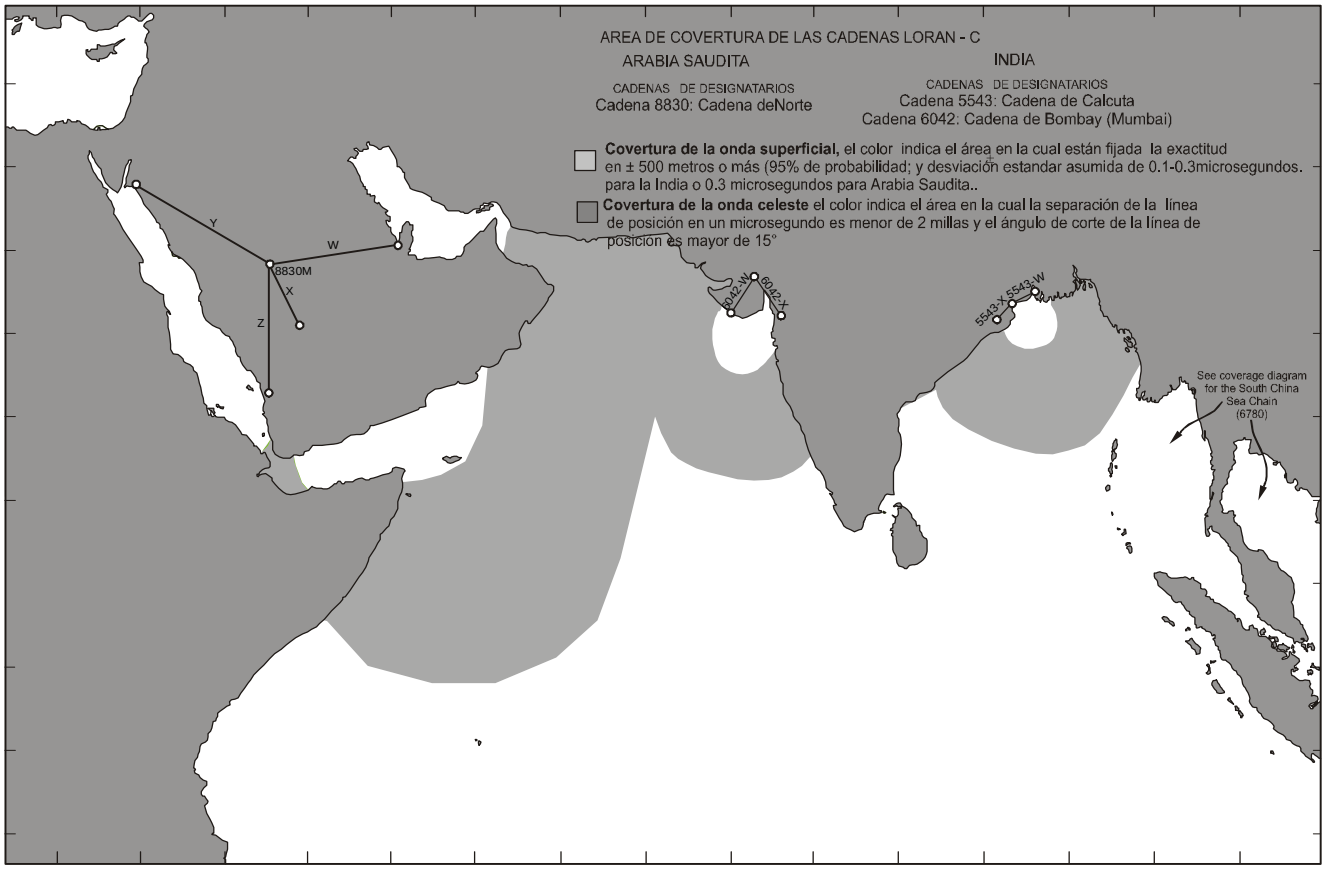


Fig. 277 Área de cobertura de las cadenas Loran - C Océano Índico

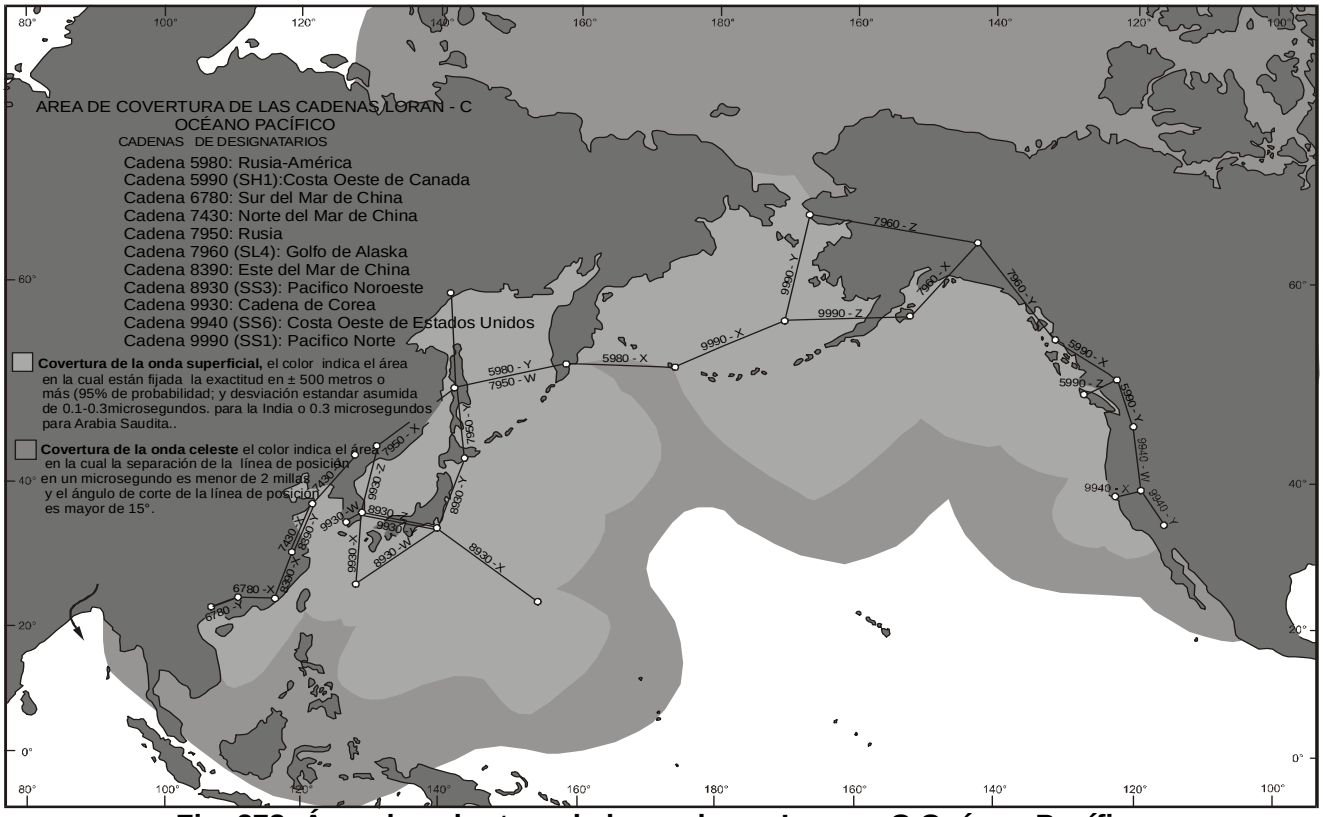


Fig. 278 Área de cobertura de las cadenas Loran - C Océano Pacífico

En áreas cercanas a la costa, donde la estación maestra transmite, se han notado exactitudes de 50 metrois y menos.

En la actualidad el Loran C alcanza grandes extensiones continentales en Norteamérica y regiones costeras. Cubre el norte del océano Atlántico y Pacífico, el mar Mediterráneo y el Golfo Pérsico, Mar Rojo, con **ondas espaciales recepcionables** en el hemisferio norte con exepción del océano Indico y el Pacífico NW.

d) Características de los receptores

Los receptores modernos calculan la posición a partir de la entrada de datos del GRI y el tiempo de retardo del par de estación escogido. Las ayudas existentes o los manuales de los receptores a menudo muestran las zonas de cobertura en las cuales un par de estación es más propicia que otra para determinar la posición con exactitud. En algunos casos el tiempo de retardo puede fijarse en el display con dos dígitos, pero en general solo se utiliza el primer dígito del tiempio de retardo mínimo de la estación adecuada, mostrada en la tabla 7.4 y los 4 primeros del GRI. Ejemplo 7980 - 1- 4. (estación W y X).

Se utilizan 2 métodos fundamentales para seleccionar las cadenas en el área geográfica.

1. Selección manual: se introduce la cadena en el receptor.

2. La selección automática: el usuario introduce la posición geográfica aproximada y el receptor selecciona la cadena apropiada de la región. Una vez que identifique la transmisión y su ciclo, puede automáticamente seguir las cadenas en su trayectoria, acomodando en el display solo dos pares de estaciones.

Todos los receptores del Loran indican la intensidad de la señal que se recibe, proporcionando una lectura numérica entre la intensidad de la señal de radio recibida y el ruido existente en general. Estas indicaciones son llamadas **señal de ruido**, y son presentadas con escalas de 000 - 999. Los números indicarán en proporción la intensidad de la señal recibida. Las señales consideradas razonablemente buenas estarán entre 600 y 999, aunque algunos receptores solo utilizan los dos primeros dígitos. El receptor que ofrezca valores inferiores a 600 tendrá dificultades en la medición de la posición como exactitud.

Los receptores pueden tener alarmas asociadas a los problemas con la recepción. Estas alarmas incluyen.

1. Parapadeo de la alarma: muestra que la estación maestra tiene dificultades asociadas a la sincronización de las estaciones.

2. Pérdida de la señal: cuando la señal no puede recepcionarse por encima de la señal de ruido.

3. Ciclo de alarma: aparece cuando se inicia el receptor o cunado la señal se encuentra perdida. Indica que el receptor no está listo.

Algunos receptores están equipados con los filtros necesarios para eliminar el alto nivel de ruido. Algunos de ellos incluso ajustan los filtros para una recepcción más clara.

Los receptores actuales trabajan con varios conceptos de exactitud.

Exactitud absoluta: cuando se compara la posición del Loran-C con una posición verdadera.

Exactitud repetible: habilidad para determinar una posición media anteriormente .

Exactitud relativa: es la posición medida por dos receptores en el mismo tiempo y con el mismo sistema.

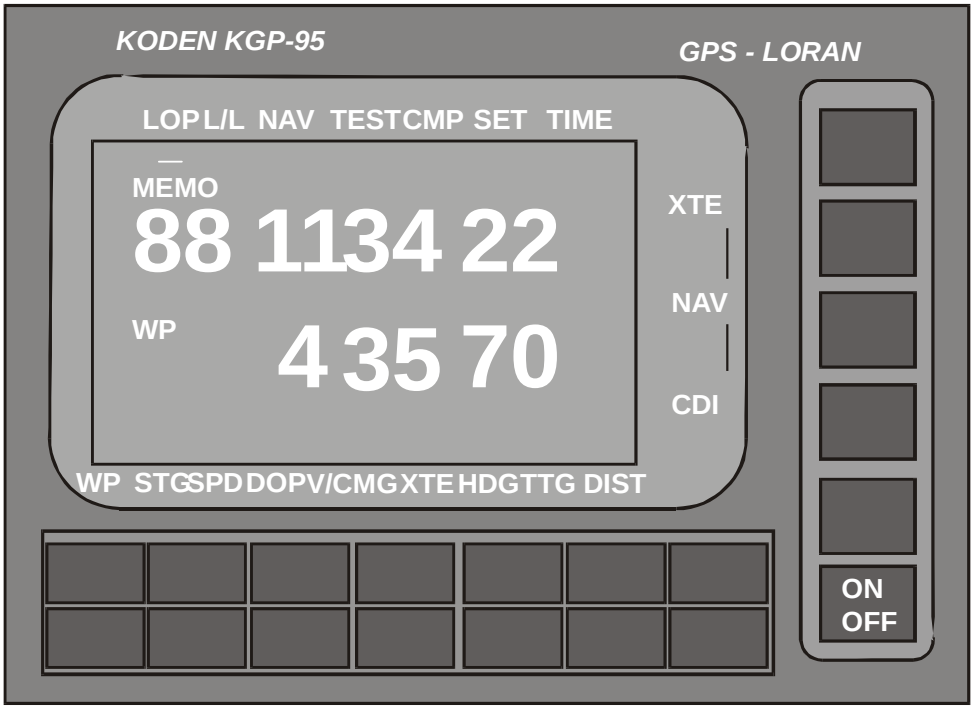


Fig. 279 Receptor de GPS/LORAN - C mostrando la posición del buque

2) Determinación de la posición con ayuda de las tablas Loran - C

Estas tablas proporcionan las coordenadas necesarias para el trazado de una línea recta que representa una línea de posición hiperbólica. Ecepto cuando el observador se encuentra aproximádamente dentro de las 20 millas náuticas de una estación transmisora, la unión de dos puntos adyacentes un segmento de línea recta puede ser utilizado sin un error apreciable. Si existe duda acerca de la línea de posición with regard a la curvatura, la magnitud del error puede ser resuelta ploteando un segmento de línea recta adyacente a la línea de posición.

Tablas Loran-C (pub 221). Estas tablas están confeccionadas para cada par de estaciones de una cadena . Cada tabla es identificada por el número de publicación (221), su fijo pertinente y el par de estaciones.Ejemplo, Pub, 221 (2013) de la cadena del Golfo de Alaska .

Los puntos en las hipérbolas separdas por 10 μseg. de diferencia de tiempo están tabuladas en la red de tablas (Fig. 280) en intervalos de grados enteros de latitud o longitud excepto en áreas proxima a la estación transmisora.En tales áreas los puntos están tabulados en intervalos de grados enteros o cuarto de grados dependiendo de la curvatura de la línea. Una columna separada está dada para cada lectura tabulada,intervalo de 10 μseg. Se da una tabla auxiliar designada por Δ para el cambio de latitud o longitud (hasta 0,01') para 1 μseg de variación en la lectura de la diferencia de tiempo. También están ploteados los puntos en la extensión de la línea base en una columna encabezada por la lectura de la diferencia de tiempo en la misma.

Las lecturas tabuladas son para las ondas superficiales. Las ondas espaciales son corregidas a las ondas superficiales equivalentes antes de entrar en las tablas. Una lectura de onda superficial es designada por T_s y una lectura espacial por T. Si una onda superficial coincide con una espacial, la lectura es simbolizada T_{SE} si la onda superficial es desde la estación maestra y T_{ES} si es desde la estación siendo subordinada.

En la red de tabla de Loran - C los argumentos de entrada son la lectura en microsegundos y la latitud o longitud.

Para una línea de posición corriente en general en la dirección norte - sur en la tabla se entra con la latitud, tomándose la longitud de la tabla. Para una línea este - oeste, se entra en la tabla con la longitud, y de la tabla se toma la latitud. Por lo tanto dos puntos son determinados y ploteados, uno a cada lado de la posición de estima.

La línea recta que los une es una aproximación de un pequeño segmento de la línea de posición: Usualmente es necesario realizar la interpolación. Para cada argumento de latitud o longitud, en la red de tablas se entra con la diferencia de tiempo tabulada más cercana a la lectura de la onda superficial. Las longitudes o latitudes extraidas entonces son corregidas por (T_s - T_e) y Δ, la variación en longitud o latitud por 1µseg de variación de T. Se debe prestar atención a los signos de Δ y (T_o - T). El signo de Δ es determinado por la variación de los argumentos de entrada a la tabla (si aumenta o disminuye). El signo de (T_s - T) es hallado siempre por la resta algebraica de T respecto a T_s.

Ejemplo 1. A las 1530 horas la posición de estima de un buque es φ = 48°35'N; λ = 30°17'W
Las lecturas en el recepto Loran -C obtenidas son las siguientes:

1530	7930 - X	T_s 29523,8
1530	7930 - Z	T_s 48635,7

Se requiere. La posición fija a las 1530

Solución. Entre en la red de tablas (Fig. 280) en la columna T (diferencia de tiempo) con el valor más próximas a ambos lados de la posición de estima. Anote las latitudes o longitudes correspondientes para estos dos puntos. Interpole si es necesario. Plotee los dos puntos obtenidos y una los mismos mediante una línea recta para determinar un segmento de línea de posición hiperbólica.

La intersección de las dos líneas para diferentes pares de estaciones determina la posición fija Loran - C.

PAR 7930-X	**Latitud**	**Longitud tabulada**	**Δ**	**Variación de longitud (Ts-T) X(Δ)**	**Longitud interpolada**
T.....29520	48°N	30° 24,3' W	+22	(+3,8)(+0,22)=+0,8'	30° 25,1' W
Ts.....29523,8	49°N	30° 21,5' W	+21	(+3,8)(+0,21)=+0,8'	30° 22,3' W
Ts–T + 3,8					

PAR 7930-Z	**Longitud**	**Latitud tabulada**	**Δ**		**Latitud interpolada**
T.....48640	30°W	48° 24,3'N	+20	(-4,3)(+0,20)=-0,9'	48° 23,4'N
Ts.....48635,7	31°W	48° 47,5'N	+19	(-4,3)(+0,19)=-0,8'	48° 46,7'N
Ts–T - 4,3					

A continuación son ploteadas las líneas de posición Loran - C por las coordenadas:

φ = 48°N, λ = 30°25,1' W; φ = 49° N, λ = 30°22,3'W

y φ = 48°23,4' N, λ = 30°W; φ = 48°46,7' N, λ = 31°W

Respuesta. Posición fija (φ = 48°32,7' N, λ = 30°23,6' W).

240 GF 7930-X

T	29500		29520		29540		29560		29580		T
Lat ° ′	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	Long ° ′
25 N	31 39.6W	36	31 46.8W	35	31 53.9W	35	32 01.1W	36	32 08.3W	36	
26 N	31 36.1W	35	31 43.3W	35	31 50.4W	35	31 57.5W	35	32 04.5W	35	
27 N	31 32.8W	34	31 39.7W	34	31 46.8W	35	31 53.8W	35	32 00.8W	34	
28 N	31 29.4W	34	31 36.3W	34	31 43.2W	34	31 50.0W	34	31 57.0W	34	
29 N	31 25.9W	34	31 32.8W	33	31 39.5W	33	31 46.3W	34	31 53.1W	34	
30 N	31 22.4W	33	31 29.1W	33	31 35.8W	33	31 42.6W	33	31 49.3W	33	
31 N	31 19.0W	32	31 25.5W	32	31 32.1W	32	31 38.7W	33	31 45.4W	33	
32 N	31 15.4W	32	31 21.9W	32	31 28.4W	32	31 34.9W	32	31 41.4W	32	
33 N	31 11.9W	31	31 18.2W	31	31 24.6W	31	31 31.0W	32	31 37.5W	31	
34 N	31 08.3W	31	31 14.6W	31	31 20.8W	31	31 27.1W	31	31 33.4W	31	
35 N	31 04.7W	30	31 10.9W	30	31 17.0W	30	31 23.2W	31	31 29.4W	30	
36 N	31 01.1W	30	31 07.1W	30	31 13.1W	30	31 19.2W	30	31 25.3W	30	
37 N	30 57.5W	29	31 03.4W	29	31 09.3W	29	31 15.3W	29	31 21.3W	29	
38 N	30 53.8W	29	30 59.6W	28	31 05.4W	29	31 11.3W	29	31 17.2W	29	
39 N	30 50.2W	28	30 55.9W	28	31 01.6W	28	31 07.2W	28	31 13.0W	28	
40 N	30 46.6W	27	30 52.1W	27	30 57.6W	27	31 03.3W	28	31 08.9W	27	
41 N	30 42.9W	27	30 48.4W	27	30 53.8W	27	30 59.3W	27	31 04.8W	27	
42 N	30 39.3W	26	30 44.7W	26	30 50.0W	26	30 55.3W	26	31 00.7W	26	
43 N	30 35.7W	26	30 41.0W	26	30 46.2W	26	30 51.4W	25	30 56.6W	26	
44 N	30 32.3W	25	30 37.4W	25	30 42.5W	25	30 47.5W	25	30 52.6W	25	
45 N	30 28.9W	24	30 33.9W	24	30 38.8W	24	30 43.7W	24	30 48.7W	25	
46 N	30 25.7W	24	30 30.5W	23	30 35.3W	24	30 40.1W	24	30 45.0W	24	
47 N	30 22.6W	23	30 27.3W	23	30 31.9W	23	30 36.6W	23	30 41.4W	23	
48 N	30 19.7W	22	30 24.3W	22	30 28.9W	22	30 33.4W	22	30 37.9W	22	
49 N	30 17.2W	22	30 21.5W	21	30 25.9W	22	30 30.4W	22	30 34.8W	22	

7930-Z GR 197

T	48600		48620		48640		48660		48680		T
Lat ° ′	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	Long ° ′
	47 51.8N	21	47 56.0N	21	48 00.3N	21	48 04.5N	21	48 08.7N	21	29 W
	48 16.2N	20	48 20.3N	20	48 24.3N	20	48 28.3N	20	48 32.3N	20	30 W
	48 39.9N	19	48 43.7N	19	48 47.5N	19	48 51.3N	19	48 55.1N	19	31 W
	49 02.7N	18	49 06.3N	18	49 09.9N	18	49 13.6N	18	49 17.2N	17	32 W
	49 24.7N	17	49 28.1N	17	49 31.5N	17	49 35.0N	17	49 38.4N	17	33 W
	49 45.9N	16	49 49.2N	16	49 52.4N	16	49 55.7N	16	49 58.9N	16	34 W
	50 06.4N	15	50 09.5N	15	50 12.5N	15	50 15.6N	15	50 18.7N	15	35 W
	50 26.1N	14	50 29.1N	14	50 32.0N	14	50 34.9N	14	50 37.8N	14	36 W
	50 45.2N	13	50 48.0N	13	50 50.8N	13	50 53.5N	13	50 56.2N	13	37 W
	51 03.6N	13	51 06.2N	13	51 08.9N	13	51 11.5N	12	51 14.0N	13	38 W
	51 21.3N	12	51 23.9N	12	51 26.3N	12	51 28.8N	12	51 31.3N	12	39 W
	51 38.5N	11	51 40.8N	11	51 43.2N	11	51 45.6N	11	51 47.9N	11	40 W
	51 55.0N	11	51 57.3N	11	51 59.6N	11	52 01.8N	10	52 04.0N	11	41 W
	52 11.1N	10	52 13.2N	10	52 15.3N	10	52 17.5N	10	52 19.6N	10	42 W
	52 26.6N	10	52 23.6N	10	52 30.6N	10	52 32.7N	10	52 34.7N	9	43 W

Fig. 280 Extractos de las tablas Loran - C

Cuando sea posible compare dos ondas superficiales, nunca compare una onda superficial con una onda espacial. Bajo las mejores condiciones para la superposición de las ondas superficiales con las ondas espaciales, el valor obtenido puede ser indeterminado en una cantidad equivalente a varias millas

de la posición. Como es el caso con la superposición de dos ondas celestes, el error puede ser muy grande cuendo el observador se encuentra dentro de los 200 μseg de la línea de base.

Cuando se recibe la señal de una onda espacial de una estación Loran - C y señales fuertes de las ondas superficiales de la segunda estación, el procedimiento práctico es superponer la onda espacial de la primera estación con la onda espacial de segunda estación. Esta situación podría presentarse cuando el receptor está situado lejos de la primera estación y cerca de la segunda . El uso de la superposición de toda la onda espacial en esta situación puede causar grandes errores debido a la gran indeterminación en la corrección de la onda espacial por la estación cercana.

Ejemplo 2 En la posición de estima de los 2130 el buque se encontraba en φ = 48°35'N, λ = 46°45'W.

Las lecturas obtenidas por el Loran - C fueron las siguientes:

2130	7930 - X	T_E = 33114,3
2130	7930 - Z	T_{ES} = 54632,2

Se requiere la posición fija Loran - C

Solución. La lectura observada (T_E) debe ser corregida a la lectura equivalente de la onda superficial T_S. El procedimiento de cada diferencia de tiempo de la tabla están en la tabla convencional de corrección de las ondas espaciales para las horas del día (altura de la ionosfera = 73 km) y para las horas de la noche (h = 91 km). Entre en la tabla pertinente (Fig. 282) (en este ejemplo, de noche ya que la lectura de Loran - C fueron tomadas a las 2130) con la posición de estima y obtenga la corrección de la onda espacial. Interpole si es necesario. Aplique la corrección a la T_E observada para determinar T_s.

Si una onda espacial y superficial son superpuestas, la lectura observada, (T_{ES} ó T_{SE}) deben ser tambien corregidas a un equivalente de lectura de onda superficial (T_s).

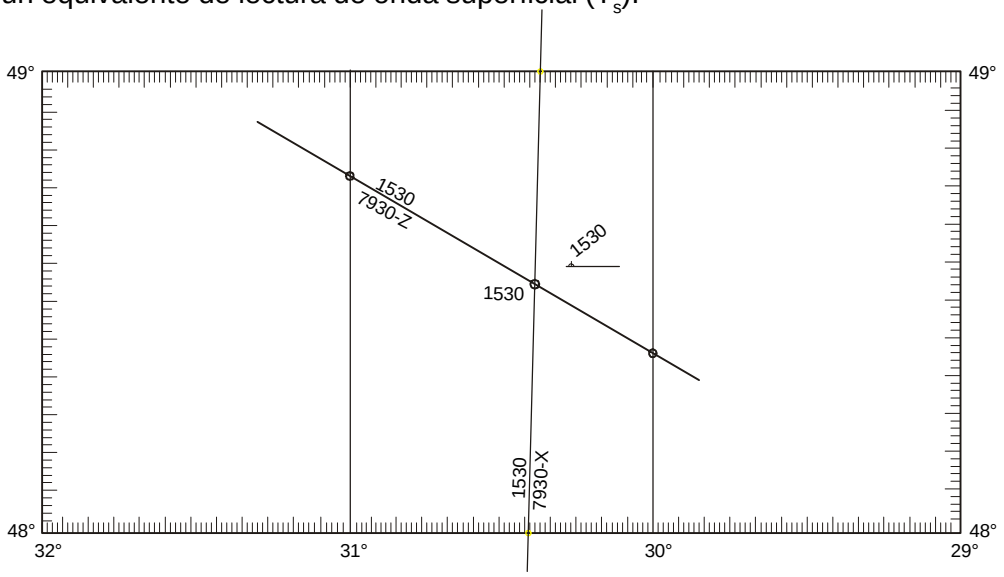


Fig. 281 Posición fija Loran - C

La tabla espacial de corrección de onda espacial a onda superficial (Fig.283) precede a las tablas de diferencia de tiempo. Entre la tabla especial de corrección (en este ejemplo - de noche) y obtenga la corrección espacial.

Para determinar T_s aplique esta corrección a las lecturas de T_{ES} ó T_{SE} observada.

Después que T_s se ha determinado, el resto de la solución es análogo al ejemplo 1.

El extracto de la red de tabla está dado en la fig. 284

.PAR 7930-X		PAR 7930-X	
T_E	33114,3	T	33120
Corrección convencional	8,1	Ts	33122.5
Ts	33122.5	T- Ts	+2,5

Latitud	Longitud tabulada	Δ	Variación de longitud (T- Ts)Δ	Longitud interpolada
48°	46° 59,5' W	+40	(+2,5)(+0, 40)=+1,0'	47° 00,5' W
49°	46°20,5' W	+38	(+2,5)(+0, 38)=+0,9'	46° 21,4' W

PAR 7930-Z		PAR 7930-Z	
Ts_E	45632,2	T	45700
Corrección espacial	+62	Ts	45694,2
Ts	45694,2	T- Ts	-5,8

Longitud	Latitud tabulada	Δ	Variación de latitud	Latitud interpolada
46° W	48° 10,9' N	+13	(-5,8)(+0,13)=-0,8'	48° 10,1'
47° W	48° 41,8' N	+11	(-5,8)(+0,11)=-0,6'	48° 41,2'

Respuesta. Siguiendo el procedimiento para el ploteo de las líneas posición como fue mostrado en el ejemplo 1, las coordenadas de la posición fija por Loran-C son: $\varphi = 48°31{,}3'N$, $\lambda = 46°40{,}2'W$

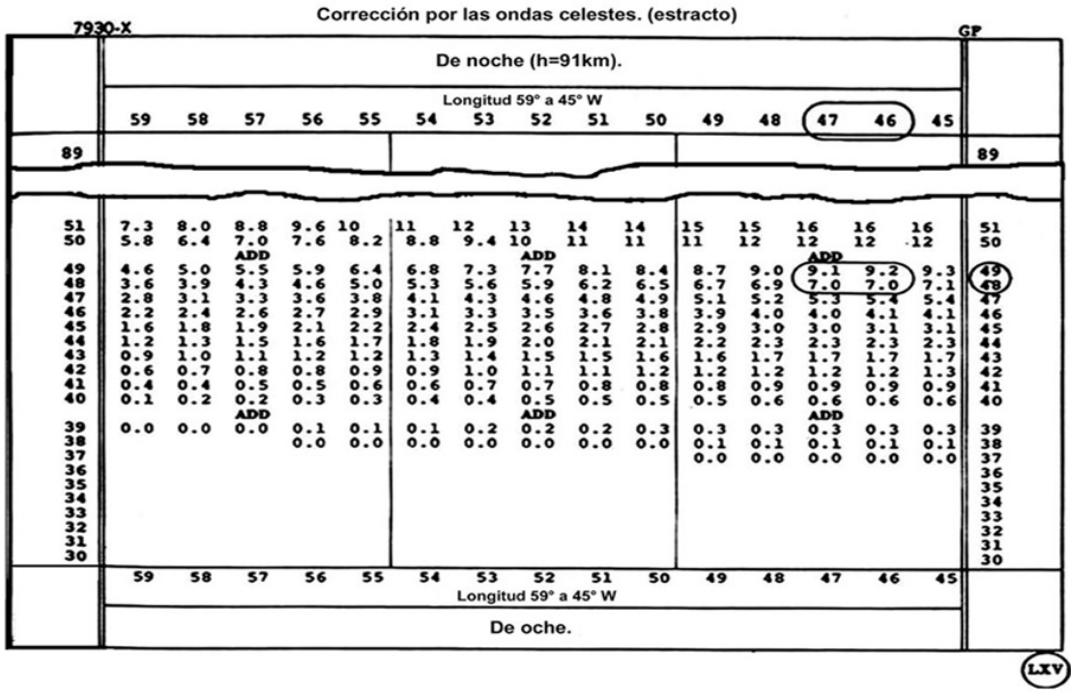


Fig. 282 Tabla convencional de correcciones de las ondas celestes

7930-Z GR

NIGHTTIME (h = 91 km.)

Groundwave from Slave (R) to First-hop Skywave from Master (G)

Longitude—59°W to 45°W

Latitude North	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45
69															
68															
67															
66															
65															
64															
63															
62															
61															
60															
59															
58															
57															
56															
55															
		ADD													
54	68	69	71	73											
53	65	66	68	69	71	72									
52	63	64	65	66	67	68	70	71	72	73					
51	61	62	63	64	65	65	66	67	68	68	69	69	70	70	70
50	60	60	61	62	62	63	63	64	65	65	66	66	66	66	66
					ADD						ADD				
49	59	59	60	60	60	61	61	62	62	63	63	63	63	63	63
48	58	58	58	59	59	59	60	60	60	61	61	61	61	61	61
47	57	57	57	58	58	58	58	59	59	59	59	59	59	59	59
46	56	56	57	57	57	57	57	58	58	58	58	58	58	58	58
45	56	56	56	56	56	56	57	57	57	57	57	57	57	57	57
		ADD						ADD						ADD	
44	55	55	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
43	55	55	55	55	55	55	55	56	56	56	56	56	56	56	56
42	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
41	54	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
40	54	54	54	54	54	54	55	55	55	55	55	55	55		
					ADD										
39			54	54	54	54	54	54	54	54					
38															
37															
36															
35															
34															
33															
32															
31															
30															

59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45

Longitude—59°W to 45°W

Groundwave from Slave (R) to First-hop Skywave from Master (G)

NIGHTTIME

XLVII

Fig. 283 Tabla especial de correcciones de ondas superficiales a ondas celestes

328 GF 7930-X

T	33100		33120		33140		33160		33180		T
Lat ° ′	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	Long ° ′
34 N	54 29.0W	56	54 40.5W	57	54 51.9W	57	55 03.5W	58	55 15.1W	58	
35 N	54 01.1W	55	54 12.3W	56	54 23.6W	56	54 35.0W	57	54 46.5W	57	
36 N	53 32.6W	54	53 43.5W	55	53 54.7W	55	54 05.8W	56	54 17.2W	56	
37 N	53 03.4W	53	53 14.1W	54	53 25.1W	54	53 36.0W	55	53 47.2W	55	
38 N	52 33.4W	52	52 44.1W	53	52 54.8W	53	53 05.6W	54	53 16.5W	54	
39 N	52 02.9W	51	52 13.3W	52	52 23.8W	52	52 34.3W	53	52 45.0W	53	
40 N	51 31.5W	50	51 41.7W	51	51 52.0W	51	52 02.4W	51	52 12.8W	52	
41 N	50 59.5W	49	51 09.4W	49	51 19.5W	50	51 29.5W	50	51 39.8W	51	
42 N	50 26.5W	48	50 36.3W	48	50 46.0W	49	50 56.0W	49	51 05.9W	50	
43 N	49 52.8W	47	50 02.3W	47	50 11.8W	47	50 21.5W	48	50 31.2W	48	
44 N	49 18.3W	45	49 27.5W	46	49 36.7W	46	49 46.1W	47	49 55.6W	47	
45 N	48 42.9W	44	48 51.8W	44	49 00.8W	45	49 09.9W	45	49 19.1W	46	
46 N	48 06.6W	43	48 15.2W	43	48 23.9W	43	48 32.8W	44	48 41.6W	44	
47 N	47 29.5W	41	47 37.8W	41	47 46.2W	42	47 54.7W	42	48 03.3W	42	
48 N	46 51.5W	39	46 59.5W	40	47 07.7W	40	47 15.8W	40	47 24.1W	41	
49 N	46 12.9W	38	46 20.5W	38	46 28.3W	38	46 36.1W	39	46 44.0W	39	
50 N	45 33.6W	36	45 40.9W	36	45 48.3W	37	45 55.7W	37	46 03.3W	37	
51 N	44 53.8W	34	45 00.8W	34	45 07.7W	35	45 14.8W	35	45 21.9W	35	
52 N	44 13.9W	32	44 20.5W	32	44 27.0W	33	44 33.7W	33	44 40.4W	33	
53 N	43 34.2W	30	43 40.4W	30	43 46.5W	30	43 52.8W	31	43 59.0W	31	

7930-Z GR 97

T	45700		45720		45740		45760		45780		T
Lat ° ′	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	° ′	Δ	Long ° ′
	46 57.7N	16	47 01.0N	16	47 04.3N	16	47 07.6N	16	47 10.8N	16	44 W
	47 36.2N	14	47 39.2N	14	47 42.1N	14	47 45.0N	14	47 47.8N	14	45 W
	48 10.9N	13	48 13.6N	13	48 16.2N	12	48 18.7N	12	48 21.3N	12	46 W
	48 41.8N	11	48 44.2N	11	48 46.5N	11	48 48.8N	11	48 51.1N	11	47 W
	49 08.9N	10	49 11.0N	10	49 13.1N	10	49 15.2N	10	49 17.2N	10	48 W
	49 32.1N	9	49 34.0N	9	49 36.0N	9	49 37.9N	9	49 39.8N	9	49 W
	49 37.3N	9	49 39.2N	9	49 41.1N	9	49 43.0N	9	49 44.9N	9	49 15W
	49 42.3N	9	49 44.2N	9	49 46.0N	9	49 47.9N	9	49 49.8N	9	49 30W
	49 47.0N	9	49 48.9N	9	49 50.8N	9	49 52.6N	8	49 54.4N	9	49 45W
	49 51.6N	8	49 53.4N	9	49 55.2N	9	49 57.1N	9	49 58.8N	8	50 W
	49 56.0N	8	49 57.7N	8	49 59.4N	8	50 01.3N	9	50 03.1N	8	50 15W
	50 00.0N	8	50 01.7N	8	50 03.5N	8	50 05.3N	8	50 07.0N	8	50 30W
	50 03.9N	8	50 05.6N	8	50 07.4N	8	50 09.1N	8	50 10.9N	8	50 45W
	50 07.6N	8	50 09.3N	8	50 11.0N	8	50 12.7N	8	50 14.5N	8	51 W
	50 11.0N	8	50 12.7N	8	50 14.4N	8	50 16.1N	8	50 17.9N	8	51 15W
	50 14.3N	8	50 15.9N	8	50 17.7N	8	50 19.4N	8	50 21.1N	8	51 30W
	50 17.4N	8	50 19.0N	8	50 20.7N	8	50 22.4N	8	50 24.1N	8	51 45W
	50 20.2N	8	50 21.9N	8	50 23.6N	8	50 25.2N	8	50 26.9N	8	52 W
	50 22.8N	8	50 24.5N	8	50 26.2N	8	50 27.9N	8	50 29.5N	8	52 15W
	50 25.3N	8	50 27.0N	8	50 28.7N	8	50 30.4N	8	50 32.0N	8	52 30W

Fig. 284 Extractos de las tablas Loran - C

7.16 Proyecto Eurofix.

Desde el año 1989 la Universidad de Delf, de Noruega, ha estado trabajando en un nuevo proyecto, para mejorar la exactitud del Loran C, conocido como **EUROFIX**. La confirmación real de los estudios comienza a partir del año 1997, cuando se instala una estación referencial de GPS en Alemania relacionada con estos fines.

Las intenciones de **EUROFIX** quedan bien claras; mejorar la exactitud del sistema Loran, inicialmente en determinadas áreas importantes, tanto marítimas como terrestres de Europa.

Las señales del Loran penetran fácilmente en superficies escabrosas, áreas urbanas, gracias a la onda larga de 3 kms que puede contornear las grandes construcciones y no es fácilmente bloqueada o reflejada , tal como ocurre con la señal del GPS.

La señal de baja frecuencia que se propaga por la superficie de la Tierra y el espacio, casi no tienen diferencias. Debido a la limitada conductividad del agua y el suelo, la señal experimenta un adicional y desconocido retraso en la propagación, que atenta contra la exactitud del Loran C.

Si los receptores contienen una base de datos con la conductividad de la Tierra o la corrección ASF (Additional Secondary Factor - Factor Adicional Secundario), para el área total de cobertura, la exactitud del sistema puede ser perfeccionada, anticipándose precisiones del orden de los 10 - 20 metros.

Eurofix funciona sobre la base de la recepción de las señales diferenciales del GPS utilizadas para corregir el sistema Loran, ampliando su capacidad y exactitud.

Las señales diferenciales se transmiten utilizando el Sistema Global de Navegación por Satélite (**G**lobal **N**avigation **S**atellite **S**istem - GNSS), de factura Europea. Actualmente cuenta con solo 3 estaciones diferenciales de Loran C, ubicadas en Francia, Alemania y Noruega. Esto implica gran cobertura en toda Europa y mares adyacentes con calidad, gracias a la modulación de la señal.

Las estaciones diferenciales contienen una computadora con receptor de GPS de 12 canales. Una antena de transmisión localizada a solo 100 metros de la estación. La computadora procesa las señales recibidas del Loran, el GPS y sus señales diferenciales, que son recibidas del sistema GNSS. Con el uso de las tablas ASF y las señales de corrección elaboradas gracias a la información recibida del sistema GNSS, se calcula la corrección final del Loran C con una elevada exactitud.

Las señales diferenciales del Loran, una vez elaboradas, son distribuidas en el área por las tres estaciones existentes, aprovechando los satélites del sistema GNSS.

La perfección no puede ser mejor para el Loran. Eurofix es un proyecto en expansión que actualmente permite exactitudes de 5 metros y menos.

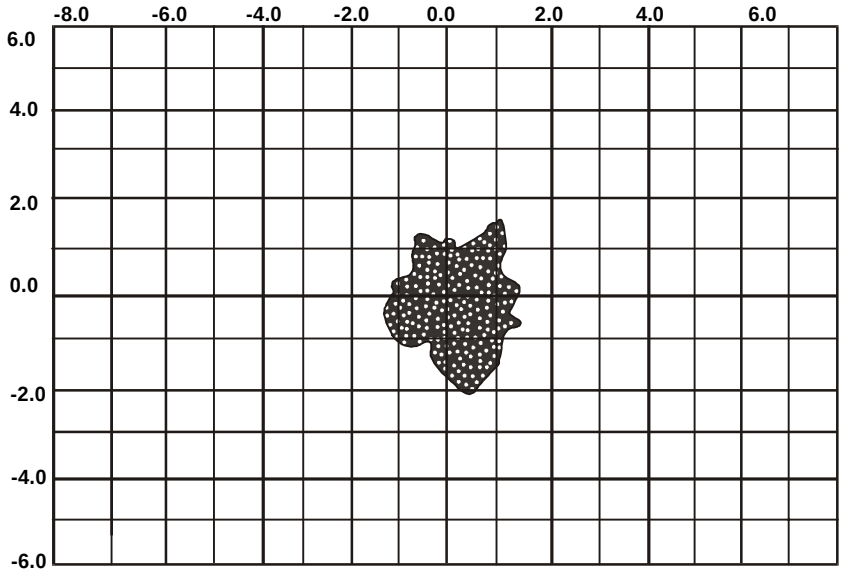


Fig. 285 Resultado de las pruebas de Eurofix

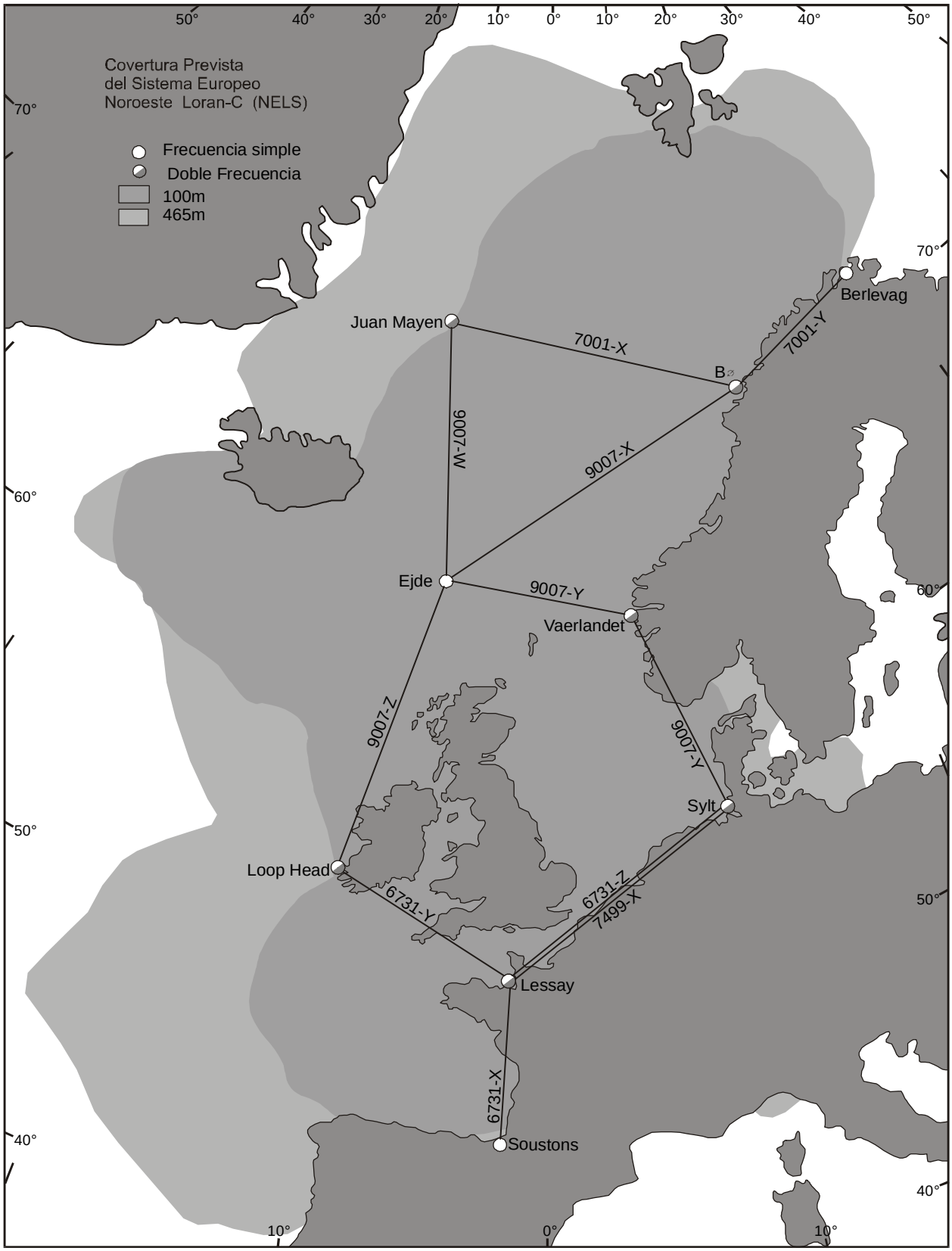


Fig. 286 Covertura prevista del sistema EUROFIX

Los datos modulados por las señales transmitidas por el Loran C, son independientes y no afectan la normal transmisión del sistema. Ud. puede recibir ambas señales (diferencial y Loran C), sin interferencia, si cuenta con el receptor adecuado. La corrección es transmitida en el formato del Comité Marítimo Radiotécnico (RTCM - 9) con 26 bit, es esencialmente idéntico al utilizado por el servicio de guardacostas de Norteamerica en el sistema diferencial del GPS.

El sistema GNSS pretende extender sus servicios a la totalidad del planeta, apoyado en su integración con los sistemas de navegación por satélite NAVSTAR y GLONASS. Para la ampliación de sus servicios ha diseñado el sistema Eurofix, en el cual, como sabemos, ha integrado las señales diferenciales del GPS. La combinación Loran C y GNSS ofrece tres ventajas fundamentales:

1. Servicio diferencial GNSS (DGNSS) a través del Loran C.
2. Una disponibilidad perfeccionada y continua para el uso calibrado del Loran, que asegura la navegación.
3. Un servicio Integrado: GNSS y Loran C.

La disponibilidad y continuidad dependerán siempre del GNSS y su servicio diferencial. Siempre que uno de los dos falle, no se hace factible la determinación con presición de la posición por largo tiempo, además de perder el usuario el monitoreo integral externo de la estación referencial.

El sistema en desarrollo aún, deberá asegurar la navegación en toda la región de Europa. Con solo tres estaciones diferenciales posibilita la integaración con el sistema GNSS complementado con el GPS. El uso de múltiples estaciones permitirá además captar las correcciones por el sistema satelitario Ruso GLONASS.

Los resultados mostrados en las pruebas realizadas, aseguran un futuro cierto al sistema, cuando en los propios EU, comienza a implementarse.

7.17 Sistema de navegación por satélite (NAVSTAR-GPS)

Introducción

La amplia aceptación por el hombre, hace que el primer satélite entre a la publicidad el 4 de Octubre de 1957 cuando la antigua URSS lanzó el primer satélite llamado Sputnik1, en una órbita cerrada alrededor de la Tierra. El pequeño satélite, que es el modelo actual, pesa alrededor de 185 libras (84 Kg.) fue puesto en la órbita alrededor de la Tierra con un apogeo (punto más alejado de la Tierra) de 585 millas (942 Km.) y un perigeo (punto más cercano a la tierra) de 143 millas (230 Km.). El Sputnik 1 con un período orbital de 96 min. alrededor de la Tierra permaneció en órbita hasta principio de 1958 en que descendió hasta incendiarse en la atmósfera terrestre. El así llamado “La Era Espacial” había comenzado.

Durante la fase de la órbita del Sputnik 1, los científicos notaron que la transmisión de los radiotransmisores de a bordo del satélite, al recibirse en un punto fijo sobre la superficie terrestre exhibía una muy acentuada variación del efecto Doppler. No duró mucho tiempo para algunos científicos y geodésicos norteamericanos en analizar que utilizando un numero de órbitas satelitarias conformadas en una “estructura de jaula “ alrededor de la Tierra, asi como el procesamiento del efecto Doppler podría crear la base para el sistema de navegación por satélite con exactitud.

En 1964 la Armada de los Estados Unidos (US Navy AstronautIcs Department) comenzó un programa de lanzamiento con el propósito de colocar en órbita una constelación de satélites con la capacidad de

ser utilizados ampliamente con precisión en todo el mundo para la navegación marítima y terrestre. Este sistema embrión fue denominado Sistema NAVSAT (Navy **NAV**igation **SAT**ellite System).

Un decreto presidencial de los Estados Unidos en 1967 estableció que el sistema desarrollado podría ser utilizado en la actualidad con fines comerciales . A finales de 1970, con el desarrollo del sistema NAVSTAR (**NAV**igation **S**atellite **T**iming **A**nd **R**anging), un sistema de posicionamiento global (GPS) se transformó en otra realidad. Las particularidades operacionales completa de este sistema esta mostrado en la figura 288.

Con los mismos objetivos de perspectivas, que proporciona un satélite de cobertura mundial basado en los sistemas de navegación, las autoridades militares de la URRS comenzaron en octubre de 1982 el lanzamiento de una constelación de satélites dedicado a este propósito. En septiembre de 1993 bajo un decreto del presidente de la Federación Rusa , declaró la puesta en funcionamiento de toda la constelación de satélite. Este sistema es conocido como el **GLO**balsnaya **NA**vigatsionnaya **S**putnikova **S**istema o **GLO**bal **NA**vigation **S**atellite **S**ystem (GLONASS). Las particularidades operacionales completas de este sistema se muestra en la figura 294.

Los componentes principales fueron parcialmente dedicados al sistema de navegación por satélite de disposición global, durante las 24 horas, bajo cualquier condición del tiempo para precisar la posición, velocidad y la hora de información a un usuario debidamente equipado.

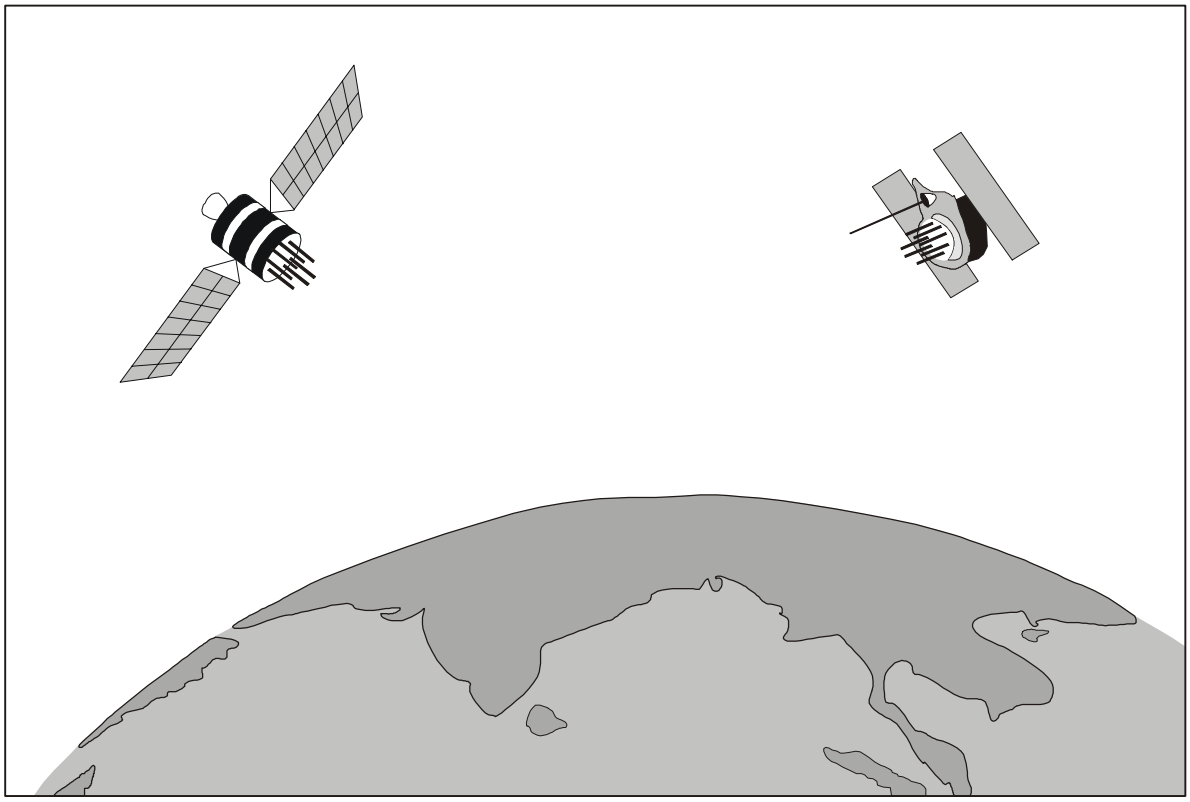


Fig. 287 Iustración de los satélites NAVSTAR Y GLONASS

1. Información General

El GPS (**G**lobal **P**ositioning **S**ystem) es un sistema de navegación por satélite militar, es decir es propiedad y es operado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. El segmento espacial de este

Sistema , consta de 24 satélites en servicio igualmente distribuidos en 6 planos orbitales con una inclinación de 55° respecto al Ecuador y una altura de 20200 Km. (10,900 millas) (Fig. 288).

Esta configuración garantiza que un mínimo de **cuatro satélites** con una altura adecuada están visibles a un receptor en cualquier parte sobre la superficie de la tierra y a cualquier hora; Por tanto el GPS proporcionará una posición fija en todo el mundo. La constelación completa es la apropiada y las autoridades de los EEUU. han declarado su capacidad operacional inicial. Sujeto a un numero de impedimentos la constelación actual de satélites permitirá determinar la posición.

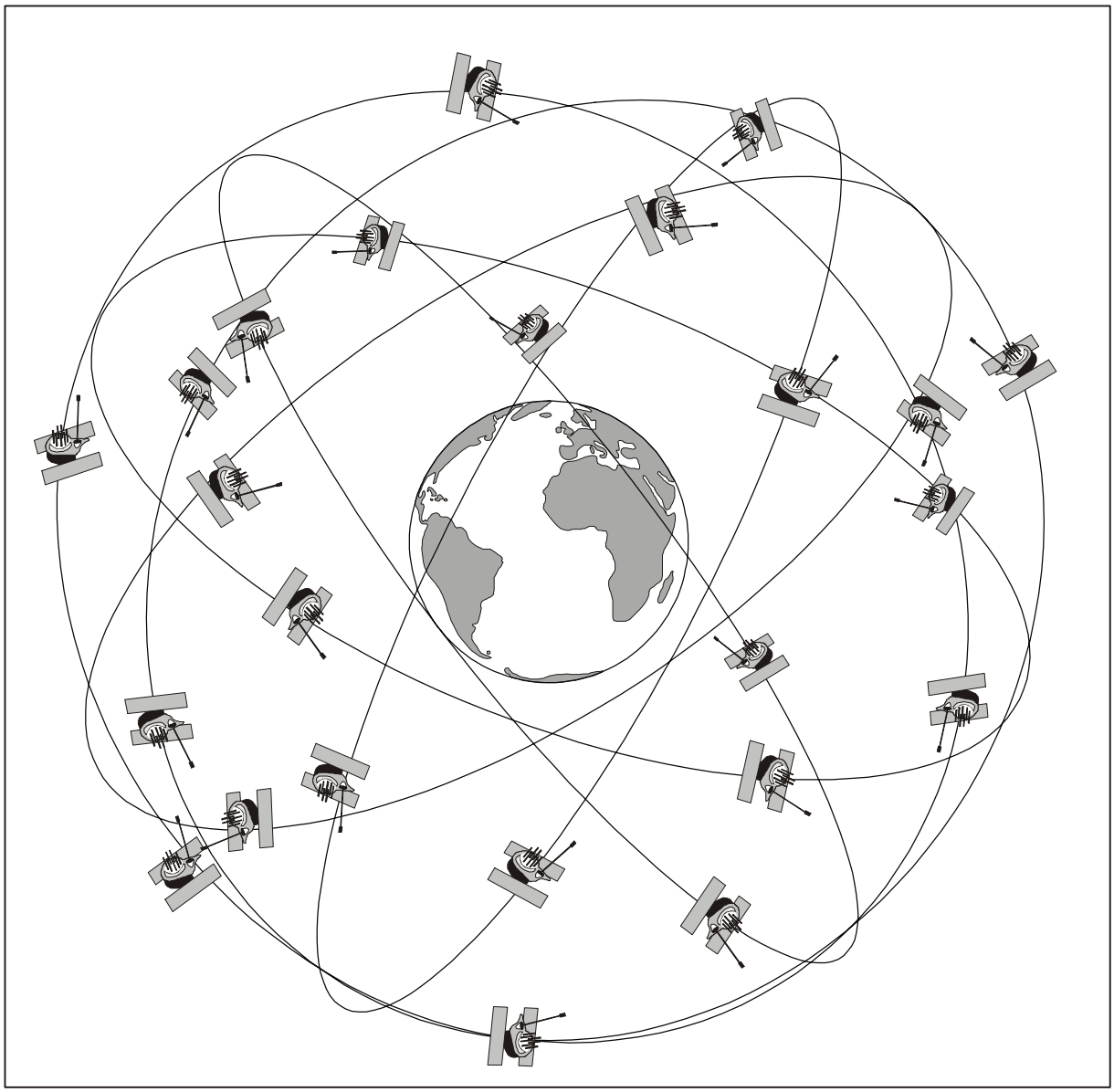


Fig. 288 Diagrama representativo del funcionamiento completo de los satélite, conjuntamente con los de reserva en órbita del sistema GPS, los cuales eventualmente están distribuidos en 6 planos obitales formando una jaula alrededor de la Tierra

En la política del Departamento de Defensa de los Estados Unidos se considera que los Satélites GPS transmitan señales que sean proyectadas principalmente para fines militares y estén sujetas a cambios sin previo aviso. El uso de la señales de GPS para determinar la posición, navegación, transferencia de tiempo o para cualquier otro fin será un riesgo para los usuarios. Sin embargo, siempre que sea posible ofrecer noticias del período cuando los satélites GPS no deban ser utilizados, será proporcionado por el Departamento de Defensa y distribuido por los guardacostas de EE.UU. Una advertencia reciente (1998) por la Oficina de subsecretario para los Asuntos Públicos en el Dist. Fed. en Washington, EE.UU., estableció que dos nuevas señales con fines comerciales serán incorporadas al Sistema de Posicionamiento Global de los EE.UU. (GPS). La segunda señal, se hará disponible para el año 2005, y tendrá aplicaciones públicas de seguridad, particularmente en la utilización de la aviación internacional, transportación terrestre y marítima. Un tiempo de espera de varios años se necesitó debido a que la nueva señal inteligente tendrá que estar estructurada dentro de la próxima generación de satélites de GPS. La adición de una segunda señal mejorará considerablemente la exactitud, contabilidad y robustez de los receptores GPS con fines comerciales, proporcionándole a éstos realizar correcciones más efectivas por el efecto de distorsión de la atmósfera terrestre en la señal espacial (para una información más detallada vea el punto 7.18 "Fuente de errores"). La adición de una tercera frecuencia será de utilidad a los usuarios e inspectores científicos, añadiendo la **velocidad** con la cual los usuarios pueden obtener la posición y la medición del tiempo por el GPS, mejorando totalmente la exactitud y confiabilidad del sistema. Una de las nuevas señales será localizada **en la frecuencia** de la señal L_2 la cual previamente ha sido utilizada solamente para fines militares. La separación de las señales para uso civil y militar pueden coexistir en esta frecuencia, como es en la frecuencia L_1 del GPS. La frecuencia para la tercera señal civil está por ser definida. En consulta con muchos usuarios internacionales, una de las cuestiones claves que está por resolverse será, cual de las nuevas frecuencias recibirá la distribución de **frecuencias internacionales** y protección necesaria para permitir los requerimientos de la seguridad de la vida.

La posición fija por el GPS es obtenida midiendo las distancias de varios de satélites seleccionados por un receptor. **Las distancias son determinadas midiendo el tiempo de propagación de las señales de transmitidas por el satélite**. Sin embargo no es posible sincronizar exactamente los relojes del satélite y el receptor; las distancias medidas no serán distancias verdaderas, sino las denominadas **"Pseudodistancia"** ya que éstas contienen el error de dispersión del reloj del receptor. A fin de obtener una fija bidimensional (2-D) sobre la superficie terrestre al menos deben ser determinadas tres pseudodistancias ; el microprocesador del receptor puede resolver tres ecuaciones de distancias para eliminar los efectos del error de dispersión del reloj del receptor. Similarmente para obtener una fija tridimensional (3-D) serian necesarias cuatro pseudodistancias.

Cada satélite transmite los datos en dos frecuencias en la banda L; L_1= 1575,42 MHz y L_2= 1227,60 MHz. Ambas frecuencias son múltiplos de la frecuencia base del reloj 10,23 MHz. El receptor de dos canales podrá utilizar dos frecuencias para corregir los efectos de la refracción ionosférica. Los datos son codificados en las frecuencias L_1 y L_2 por la modulación de un pseudoruido aleatorio (SRA).

El GPS proporciona dos niveles de capacidad posicional; Servicio Posicional de Precisión (SPP) y Servicio Posicional Normal (SPN). El SPP es derivado del **código de precisión (P)** mientras que el SPN es derivado del **código captación amplia (C/A)**. El código P es transmitido en las frecuencias L_1 y L_2 a diferencia de que el código C/A es transmitido solamente en la frecuencia L_1.

Se estima que el código P que es utilizado fundamentalmente para usos militares, proporciona una exactitud aproximada de 10 m.

La investigación de los métodos para mejorar su exactitud tiene su inicio en el desarrollo del GPS diferencial (DGPS).

Para la comprensión de este nuevo Sistema que se va imponiendo en el mundo, es necesario remitirse a los tres segmentos que lo componen y describirlos por separados.

El sistema consta de: segmento espacial, segmento de control y segmento usuario.

Segmento espacial

Como se hizo referencia en la información general este sistema está compuesto por 24 satélites, 21de ellos activos y 3 de reserva en órbita, listos para entrar en funcionamiento, además de otros 7 de reserva en tierra. La constelación del NAVSTAR se divide en 6 órbitas inclinadas a 55 grados respecto al Ecuador, con un total de 4 satélites en cada una de ellas.

Los satélites tienen un período orbital de 11 horas y 55 minutos. Y son situados a una altura de 20.200 Km. Cada satélite pasará sobre un mismo punto de la superficie terrestre cada día estelar y la altura de la órbita ha sido seleccionada de forma tal que el período de rotación es exactamente igual, con una diferencia de 2 minutos a la mitad del día, lo que permite prescindir de una red global de seguimiento y dirección, por cuanto cada satélite pasa sobre un mismo punto de la tierra con un desfasaje de 4 minutos, se garantiza la observación del satélite con ayuda de pocas estaciones de rastreo, por lo menos una vez al día, lo que eleva significativamente la supervivencia del sistema.

Por otra parte los satélites, que orbitan alrededor de la Tierra, lo hacen siguiendo un algoritmo matemático bastante simple: las fuerzas aéreas que se inyectan sobre las órbitas de cada satélite son conocidas con anterioridad, por lo que algunos receptores disponen en su alrededor de un“almanaque” con la posición de los satélites en cada instante. No obstante para mayor exactitud, las estaciones monitoras calculan dos veces al día, (paso cada 12 horas), los denominados errores de efemérides, producidos fundamentalmente por fenómenos tales como la atracción gravitacional de la Luna y el Sol y la presión de la radiación solar (viento solar como también se le conoce).

Las características de esta constelación permitirá hacer visible de 4 a 7 satélites observándose una continuidad en la posición durante las 24 horas y en cualquier condición del tiempo.

Los satélites contienen en su interior osciladores de muy alta estabilidad y esto los convierte en una escala de tiempo sumamente exacta y accesible, y es el elemento determinante en la exactitud de trabajo del sistema. Estos generadores que en la actualidad son de cesio, no son más que relojes atómicos que están situados en números de 4 en los satélites, con el objetivo de garantizar que al menos uno funcione correctamente.

Los generadores de cesio permiten el trabajo del sistema durante varios días sin corrección, no obstante se experimenta sobre generadores de cuáseres de hidrógeno que debe aumentar esta autonomía hasta varias semanas.

El sistema mantiene su funcionamiento de esta manera, aún cuando las estaciones terrenas que los dirigen, fueran destruidas por el enemigo.

La exactitud garantizada con los generadores de cesio, aseguran una estabilidad del orden de los 10^{-14} al día o sea aproximadamente 1 seg. en 3 000 00 años.

Para la alimentación de los satélites se despliegan paneles solares de un área de $7{,}25^2$ que cargan las baterías y proporcionan la energía necesaria para el funcionamiento del sistema. Se ha calculado una

baterías y proporcionan la energía necesaria para el funcionamiento del sistema. Se ha calculado una potencia remanente después de 7 años y medio de 700 w.

Los satélites llevan a cabo algunas funciones básicas importantes relacionadas con los mensajes que transmiten y reciben.

Estas funciones son:

- Recibir información del segmento de control.

- Mantener en gran presición en la medida del tiempo gracias a los osciladores atómicos de abordo.

- Transmitir información a los usuarios mediante varias señales.

a) Momento en que se transmiten las señales.

b) Ubicación de los satélites, órbitas, datos de efemérides.

2. Estructura de las señales enviadas por los satélites

Los satélites de la constelación NAVSTAR envían unas señales de las cuales se obtienen toda la información necesaria para sus diferentes aplicaciones. Dichos satélites llevan a bordo un oscilador muy estable que genera una frecuencia de 10,23 MHz de las que se derivan las restantes señales y frecuencias utilizadas. Estas señales son las siguientes.

Portadoras

Sobre estas dos portadoras se modula en fase la señal conocida como código P. Esta es una secuencia muy larga de bits (2 354 695 276 500) con un período de 266 días, 9 horas y 55,5 segundos y una frecuencia de 10,23 MHz a la que corresponde una longitud de onda de 30 m aproximadamente. Este código solo puede ser utilizado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, ya que mediante la técnica llamada **Anti - spoofing** (AS - accíón para desinformar al enemigo) es transformado en el código Y. Esta técnica impide la utilización del código P (preciso) a los usuarios no autorizados, así como que lo protege de posibles perturbaciones.

Con este código se puede obtener la mayor exactitud en el posicionamiento absoluto en tiempo real que permite el GPS.

Mensaje de navegación

También sobre ambas portadoras se transmite el llamado mensaje de navegación estructurado en bloques, que en términos generales contienen:

Bloque 1: Con una duración de 6 seg. y 300 bit, almacena los parámetros de corrección del reloj, estado de salud del satélite, así como uno de los coeficientes de un modelo para la corrección del retardo ionosférico.

Bloque 2 y 3: Con 12 seg de duración contienen en 600 bit, las efemérides de los satélites (parámetros que nos permiten obtener las coordenadas de los satélites en el sistema de referencia WGS - 84).

Bloque 5: En 300 bit contiene el almanaque de datos de un satélite, así como su estado de operatividad y correcciones al reloj.

Código C/A: Sobre la portadora L_1 modula en fase y rotada 90° con respecto al código P se transmite el código C/A que consiste en una secuencia de 1023 bit con una frecuencia de 1,023 MHz, un período de 1 milisegundo y una longitud de onda de 300 metros. Este se usa también para conseguir un posicionamiento en tiempo real y poder ser utilizado por todo el mundo, si bien el Departamento de Estado de los EEUU se reserva el derecho de perturbarlo cuando lo estime necesario.

El sistema también contiene las frecuencias siguientes:

- Enlace descendente banda S 2227,50 MHz

- Enlace ascendente banda S 1783,74 MHz

Uno u otro enlace se utilizan para renovar desde 4 estaciones terrestres, las posiciones precalculadas registrada en la memoria de los satélites, bastando los datos registrados para un período de 14 días.

- Enlace descendente L_3 1381,05 MHz.

Para transmitir las señales de la segunda carga útil de los satélites de navegación, a saber, el sistema de detección de explosiones nucleares, en que se utilizan sensores de luz visible, rayos x y detectores de impulsos electromagnéticos.

- Enlace transversal UHF:

La banda militar ajustable, hace pensar en una futura posibilidad de transmisión de datos para fines militares.

Cada satélite transmite en su código permitiendo seguir su trayectoria individualmente.

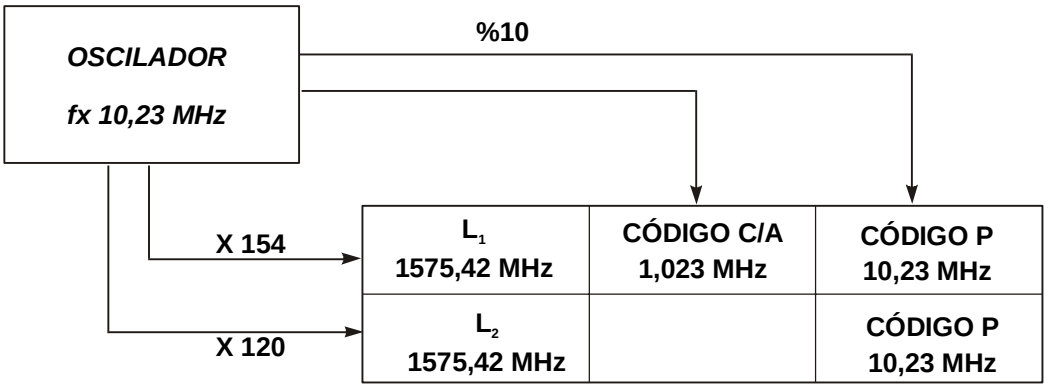


Fig. 289. Estructura de las señales transmitidas por el satélite.

Los satélites por tanto, proporcionan dos servicios importantes.

SPS: Servicio de Posicionamiento Estandar.

PPS: Servicio de Posicionamiento Exacto.

El acceso al SPS a través del código C/A permite exactitudes de hasta 25 m en el 95% de las veces.

Este servicio se le proporciona a usuarios civiles.

Otras exactitudes mostradas, es el parámetro de velocidad de movimiento del objetivo de hasta 0,1 m/s. Esto se logra a través de la medición de la velocidad de cambio de las pseudodistancias medidas.Los receptores FASE III propiedad de la Rockwell proporcionan exactitudes de 7-10.5 m.

Segmento de control

En la actualidad está formado por 4 estaciones de rastreo y seguimiento ubicadas en:

1. Hawai
2. Kwajalein
3. Ascensión
4. Diego García

Y una Estación Central (Master Control Station - MCS) en Colorado Spring, EEUU, por razones de seguridad.

Las estaciones de rastreo realizan un seguimiento permanente de los satélites de la constelación NAVSTAR determinando su error y haciendo el cálculo de las efemérides para un período posterior. Esta información se inyecta desde la Estación Mestra a los receptores colocados en los satélites. De la misma manera las estaciones de rastreo realizan esa misma función cada hora, si bien son válido para 12 horas.

La estación de Control tiene la finalidad adicional de iniciar las maniobras para reemplazar un satélite F/S por otro.

Segmento usuario

Este segmento queda constituido por todos los equipos permanentes y ocasionales, utilizados para la recepción de las señales emitidas por los satélites y empleados para el posicionamiento estático y cinemático o para la determinación exacta del tiempo.

Básicamente todos los receptores están integrados por una antena con preamplificador para captar las señales de los satélites, un receptor con elementos físicos y lógicos necesarios para el control, seguimiento, registro, almacenamiento, visualización de datos etc. Un oscilador muy estable de cuarzo, si bien tal estabilidad está fijada en el orden de los nanosegundo es muy inferior a la de los satélites.

Las señales provenientes del sistema satélitario tocan a las puertas de todos los usuarios, pero solo un número reducido de éstos, tienen acceso al código preciso. Entre estos últimos están las Fuerzas Armadas de los EEUU, las Fuerzas de la OTAN y Fuerzas Australianas, así como algunas organizaciones civiles como la Defence Maping Agency o National Geodesic Survey.

Dentro del segmento usuario hay gran cantidad de receptores respondiendo precisamente a las aplicaciones del sistema.

Atendiendo al tipo de señales que pueden recibir se pueden clasificar en:

- Receptores de una sola frecuencia (normalmente L_1)

- Receptores de 2 frecuencias: reciben las señales L_1 y L_2.

A su vez cada uno de ellos atendiendo a la información que obtienen de las señales, se pueden clasificar en:

- Receptores capaces de descodificar los códigos

a) Sólo el código C/A (captación amplia)

b) Ambos códigos P y C/A.

- Receptores capaces de medir las fases de una o varias señales.

- Receptores capaces de decodificar el código C/A y medir las fases de las portadas.

- Receptores capaces de medir las fases de las portadoras y decodificar ambos códigos C/A y P.

Los receptores actuales pueden o no tener capacidad de acoplarse a computadoras y otros periféricos como impresoras, cartas electrónicas, girocompáses, correderas, receptores de Loran-C, así como tener la función no solo del posicionamiento, sino de medir las profundidades marinas si tienen acoplado un vibrador.

Debido a la existencia de regiones, donde el GPS se comporta con poca exactitud en la determinación de la posición, los fabricantes combinan los sistemas de navegación, es así que podrán observarse receptores de GPS combinados con LORAN C.

Los receptores que miden pseuodistancias se emplean generalmente en la navegación marítima, aérea y terrestre, así como otros trabajos geodésicos que no requieran altas precisiones.

Los receptores que miden las fases de las portadoras de las señales del satélite generalmente son utilizados en trabajos de alta presición que requieran exactitudes del orden de 1 m o menos.

Ubicacion de las Estaciones de Control

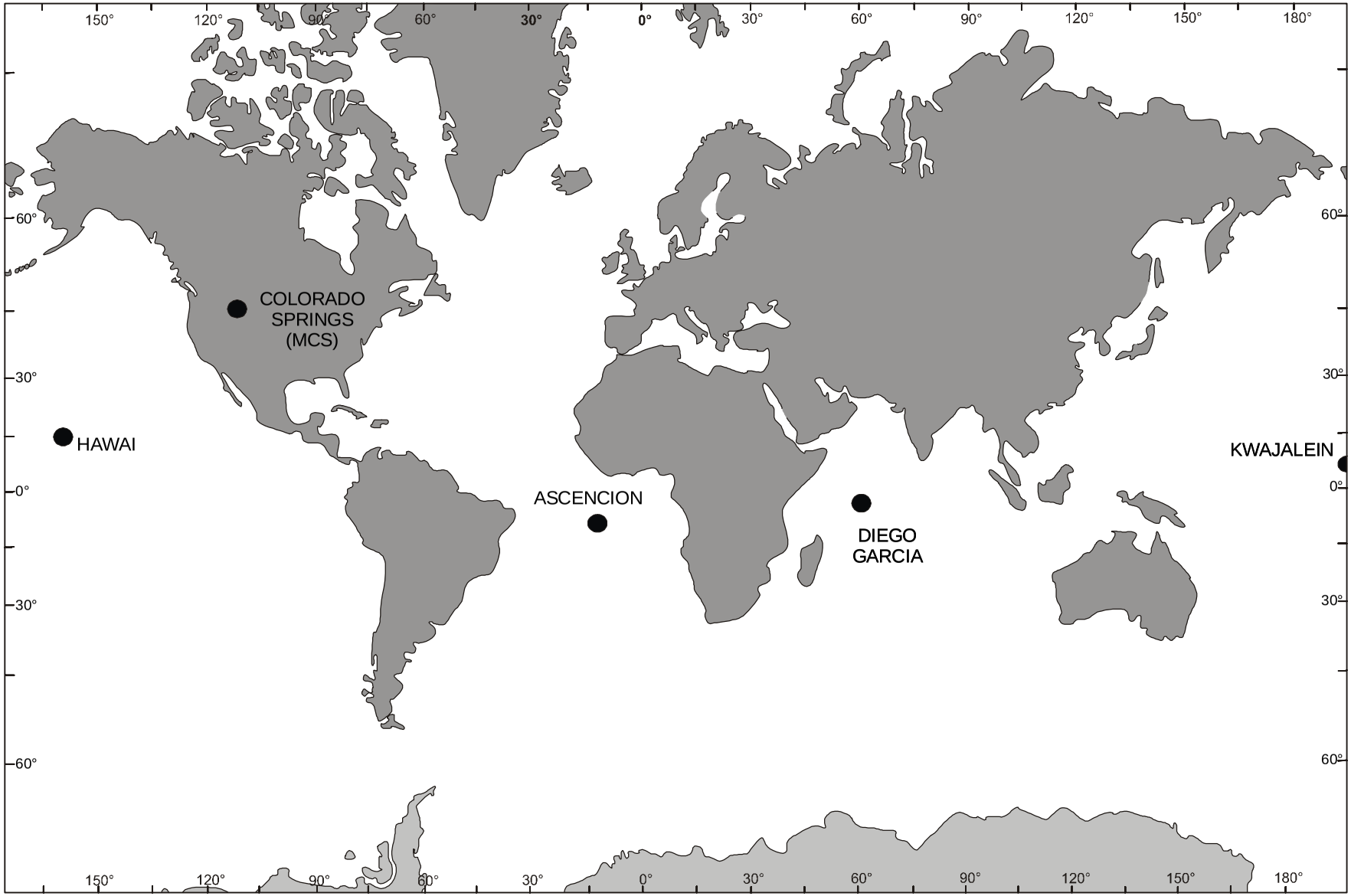


Fig. 290.

Sistema de referencia utilizados por el GPS

El sistema de referencia utilizados por el GPS es el World Geodesic System 84 (WGS 84) definido de la siguiente forma.

- Centro de masa de la Tierra.

- Eje z: paralelo a la dirección del origen convencional internacional (CIO), es decir la posición del polo medio en 1903.

- Eje x: intersección del meridiano de referencia y el plano del ecuador astronómico medio.

- Eje y: situado en el plano del ecuador astronómico medio, forma con los otros ejes un sistema coordenado rectangular.

Los parámetros de este elipside son:

a) Semieje mayor = 6 378 137 metros.

a) Semieje menor = 6 356 752,3142 metros

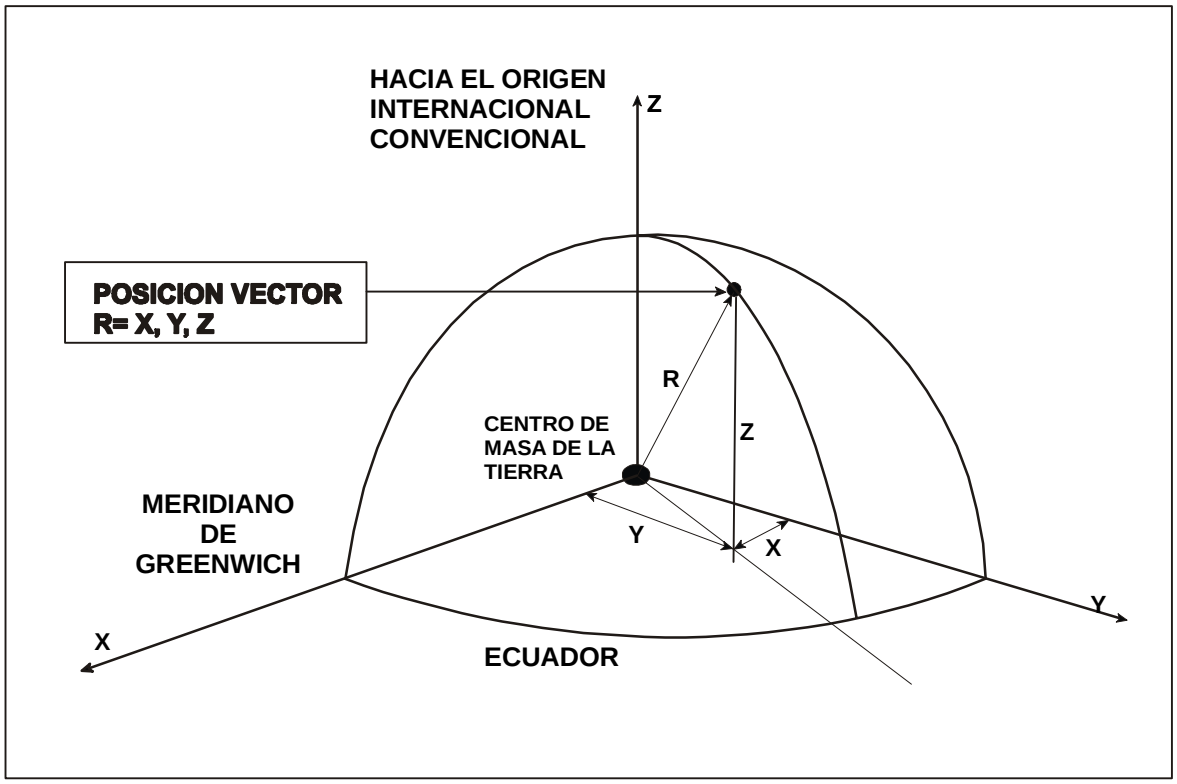


Fig.291 Sistema de referencia utilizado en los satélites (GPS)

Independientemente a este sistema de referencia utilizado a nivel mundial, para un mayor exactitud puede utilizarse el sistema geodésico local de la zona por donde se navegue.

3. Posicionamiento

Para la obtención de la posición, el receptor de GPS realiza la determinación de la distancia que lo separa de varios satélites, con este fin el receptor mide el tiempo que demora la señal al viajar desde los satélites hasta su posición. Una vez medidos estos intervalos de tiempo se multiplican por la velocidad de la luz en el espacio obteniendose la distancia hasta el satélite.

Ahora bien, la esencia del asunto radica en que el receptor genera su propio código pseudoaleatorio idéntico y al mismo tiempo, que el código emitido por el satélite, por lo que la tarea del receptor se reduce a hacer coincidir el código generado con el recibido y medir la diferencia de tiempo entre ambos.

Esto es perfectamente posible si los relojes de los satélites y del receptor coinciden en tiempo, pero debido precisamente a la diferencia muy pequeña que existen entre ambos, es que las distancias que se miden no son exactas y por esta causa se le llamó pseudodistancias.

t_1

Fig. 292. Forma de las señales transmitida por el satélite y la generada por el receptor

El cálculo de la distancia se efectuara por la siguiente fórmula:

$$P_1 = C\ dT \qquad (211)$$

donde: C -es la velocidad de la señal

P_1 -pseudodistancia del receptor al satélite

dT -retardo detectado en el receptor $(t_a - t_1)$

t_a = tiempo de llegada de la onda al receptor.

= tiempo de salida de la onda del satélite.

Para comprobar y responder a la exactitud de trabajo de los relojes del satélite y del receptor, a ambos se le introducen correcciones constantemente, de esta manera la distancia entre ellas se van acercando al valor real y se calcula por:

$$P_1 = C\left[\left(t_a - dt_a\right) - \left(t_i - dt_i\right)\right] \qquad (212)$$

donde: dt_a y dt_1 son las correcciones a los relojes

Es evidente que: $t_i = t_a - D/C$

$$P_1 = D + C(dt_i - dt_a). \qquad (213)$$

Siendo D = distancia real entre el receptor y el satélite.

Sabiendo que la señal del satélite atraviesa dos capas de la atmósfera que son la ionofera y la troposfera y que ambas generan un retraso de la señal en su propagación, entonces habrá que adaptar nuevamente la fórmula, quedando como:

$$P_1 = D + C(dt_i - dt_a) + d_{ion} - d_{tro}$$

Donde d_{ion} y d_{tro} son los retardos (expresados en metros) producidos durante la propagación de la señal.

Por otra parte:

$$D = \left[(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2\right]^{1/2} \qquad (214)$$

Siendo:

(x_1, y_1, z_1): coordenadas del satélite.

(x,y,z): coordenadas del receptor.

Tenemos:

$$\left[(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2\right]^{1/2} - C.dt = P_i - Cdt_i - d_{ion} - d_{trop} \qquad (215)$$

Donde:

$$K_1 = P_1 - Cdt_1 - d_{ion} - d_{tro}.$$

En la ecuación anterior son conocidas (x_i, y_i, z_i) mediantes las efemérides.

P_1 = dato observado

dt_1 = mediante el mensaje de navegación.

d_{ion}, d_{tro} pueden ser calculados por los datos meteorológicos y por los datos del mensaje de navegación. Por tanto tenemos 4 incógnitas (las 3 coordenadas del receptor y el estado del reloj del mismo). Si el receptor recibe las señales de 4 satélites, podemos plantear un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas, que una vez resuelto nos proporciona el valor de los mismos.

El sistema que se debe resolver sería el siguiente:

$$\begin{aligned}
&\left[(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2\right]^{1/2} - Cdt_a = k_1 \\
&\left[(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2\right]^{1/2} - Cdt_a = k_2 \\
&\left[(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2\right]^{1/2} - Cdt_a = k_3 \\
&\left[(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_1 - z)^2\right]^{1/2} - Cdt_a = k_4
\end{aligned} \qquad (216)$$

Para poder resolver este sistema lo primero que deberá hacerse es linealizarlo y para ello necesitamos conocer las coordenadas aproximadas del punto A. Sean estas $x_a^{'}$, $y_a^{'}$, $z_a^{'}$. El sistema una vez linealizado queda como sigue:

$$\begin{aligned}
&\left(x_1 - x'_a/D'_1\right)dx + \left(y_1 - y'_a/D'_1\right)dy + \left(z_1 - z'_a/D'_1\right)dz + Cdt_a = D'_1 - k_1 \\
&\left(x_2 - x'_a/D'_1\right)dx + \left(y_2 - y'_a/D'_1\right)dy + \left(z_2 - z'_a/D'_1\right)dz + Cdt_a = D'_2 - k_2 \\
&\left(x_3 - x'_a/D'_1\right)dx + \left(y_3 - y'_a/D'_1\right)dy + \left(z_3 - z'_a/D'_1\right)dz + Cdt_a = D'_3 - k_3 \\
&\left(x_4 - x'_a/D'_1\right)dx + \left(y_4 - y'_a/D'_1\right)dy + \left(z_4 - z'_a/D'_1\right)dz + Cdt_a = D'_4 - k_4
\end{aligned} \qquad (217)$$

Donde D' son las distancias calculadas con las coordenadas de los satélites y las aproximada del recptor y d_{x1} d_{y1} d_{z1} son las correcciones que deben introducirse para obtener las coordenada definitivas del receptor.

Puesto de forma matricial este sistema quedaría:

$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 1 \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 1 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 1 \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ cdt_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D'_1 - k_1 \\ D'_2 - k_2 \\ D'_3 - k_3 \\ D'_4 - k_4 \end{bmatrix} \qquad (218)$$

Ax = R donde $X = A^{-1}. R$

Como hemos visto, la esencia del posicionamiento por el GPS radica en la medición simultánea de las distancia que separan al receptor de los satélites, para ello es necesario además conocer las posiciones de cada uno de los satélites. Los satélites del GPS giran a gran distancia de la Tierra y sus órbitas son muy estables y conocidas. Dentro del mensaje que transmiten los satélites aparece esta información que permite corregir al receptor las efemérides de los mismos, que guardará en su memoria y conocer las posiciones de cada uno de ellos en el momento que realizan las misiones.

Si realizamos la mdeición a un satélite, nuestro receptor se hallará sobre la superficie de una esfera con centro en el satélite y radio igual a la distancia a éste. Una segunda observación proporcionará otra esfera que se cortará con la primera en una circunferencia sobre la cual se encontrará nuestro equipo. Si se realiza una tercera medición se formará otra esfera que se intercepta con las dos primeras en dos puntos, en uno de los cuales se encontraría la posición del buque teóricamente.

Para evitar estas situaciones que son producidas en lo fundamental por fuentes de errores que estudiaremos más adelante, llevando el peso de las impresiciones el reloj receptor, la lógica de los receptores desecha aquellas distancias a los satélites que traducidas al tiempo de emisión-recepción, no sean coherentes al menos, tres de las recibidas de otros satélites, Es así que para llevar a cabo las mediciones tridimensionales (latitud, longitud y altura) son necesarias 4 mediciones al satélite, empleándose las ecuaciones anteriores.

Generalmente en el buque no se utiliza el posicionamiento tridimensional, a los receptores se le introduce el dato de la altura de la antena (radio de la Tierra más la altura de la antena) constituyendo propiamente las coordenadas de la 4ta medición, que al ser introducidas manualmente, simplifica los cálculos.

1. La triangulación desde el satélite sobre la base del sistema

2. Para la triangulación el GPS mide las distancias utilizando el tiempo de propagación de un mensaje de radio

3. El GPS necesita relojes muy precisos para medir el tiempo de viaje de la señal

4. Una vez conocida la distancia a un satélite se necesita saber donde se encuentra éste en el espacio

5. La señal del GPS se atrasa conforme atraviesa a la ionosfera y troposfera.

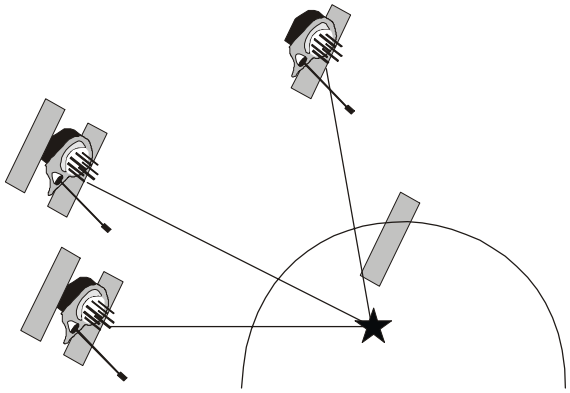


Fig. 293 Como funciona el GPS

4. Elementos de presición

Todos los errores considerados en su conjunto, introducen el concepto de incertidumbre, lo cual lleva al planteamiento del error cuadrático medio (ECM) que nos definirá la exactitud del sistema.

La exactitud del sistema depende de:

a) Presición con que se determina la matriz A: esta matriz está formada por los cosenos directores de las rectas que unen al receptor con cada satélite, y por tanto depende de:

- Presición en la determinación de las coordenadas del satélite.

- Presición en las coordenadas aproximadas del receptor.

- Geometría de los satélites.

b) Presición con que se determina la matriz B, la cual depende de:

- Presición en la determinación de las coordenadas de los satélites.

- Presición en la determinación de las coordenadas aproximadas del receptor.

- Presición en la medida de la pseudodistancia.

- Presición en la medida del estado del reloj del satélite.

- Presición en la medida del retardo por propagación ionosférica y troposférica.

La geometría de los satélites (Fig. 299a y 299b) juegan un papel importante en la exactitud del posicionamiento, de forma tal que pudiera verse como factor independiente del resto de la que hemos mencionado. Así pues podemos agrupar los factores de impresición de ambas matrices en un solo conjunto, que será influenciado por la geometría satelital.

Características que debe cumplir un receptor para obtener la máxima presición en el posicionamiento

De todas las causas enumeradas anteriormente, unas depende de la propia constelación NAVSTAR, como son la exactitud en las efemérides y en el estado del satélite **y en el estado del satélite.** Y otras dependen del recpetor.

Se obtendrá una mayor presición si el receptor cumple con las siguientes características.

- Posibilidad de descodificar el código P y por tanto poder recibir las dos portadoras L_1 y L_2. Esto proporciona una mayor presición en la determinación del retardo por la propagación ionosférica, así como una mayor presición en la medida de la pseudodistancia.

- Posibilidad de utilización de datos atmosféricos de superficies tomados en el momento. Esto proporciona una mayor presición en la determinación del retardo debido a la propagación ionosférica.

- Posibilidades de poder discriminar cuando hay más de cuatro satélites, aquellos que tienen una geometría más favorable.

- En cuanto a la presición de las coordenadas aproximadas del receptor, es suficiente conocerlas con una exactitud hasta de 100 km.

7.18 Sistema Global de Navegación por satélite (GLONASS)

1. Información general

El Sistema de Navegación Global por Satélite (**GLO**bal **NA**vigation **S**atellite **S**ystem – GLONASS) es similar al GPS en cuanto a sus objetivos y principios. Está destinado para prestar servicio de posicionamiento las 24 horas y en cualquier condición de tiempo. Es muy exacto y es capaz de proporcionar información de velocidad y tiempo a cualquier usuario equipado con el receptor adecuado.

El sistema entró plenamente en servicio en enero de 1996 y consta de 24 satélite en tres planos orbitales a 19 100 kms. de altura, correspondiendo a un período orbital de 11 horas 15 minutos. (Fig. 249). La inclinación de la órbita es de 64,8° a diferencia de los 55° del GPS, esto tiene un impacto significativo en su funcionamiento en altas latitudes. Cada satélite GLONASS continuamente transmite su posición exacta, así como la información de la posición de toda la constelación pero con menos exactitud.

El segmento usuario está compuesto del equipamiento necesario para seguir la trayectoria de los sa télites GLONASS y e l desvío de la posición, velocidad, hora del día y mediciones del satélite. El segmento de control del GLONASS es similar en su propósito y funcionamiento a la contraparte GPS. El Centro de Coordinación Científica de Información Típico (CCCT) de las fuerzas especiales rusas provee la información y métodos científicos para incrementar la eficiencia de las aplicaciones del GLONASS.

Cada satélite GLONASS utiliza dos frecuencias portadoras en la banda L, que se diferencia de la estru tura del GPS y son diferentes para cada satélites. EL rango de labanda L_1 desde 1602,5625 MHz

hasta1615,5 MHz con saltos 0,5625, mientras que el rango de la banda L_2 desde 1246,4375 MHz hasta 1256,5 MHz con saltos de 0,4375 MHz (Por tanto para cada una de las bandas L_1 y L_2 son generados 24 canales de frecuencia). Cada una de estas señales es modulada bien por la señal de 5,11 MHz precisión (P) y/o con una señal de 0,511 MHz precisión C/A. Las señales binarias se forman mediante un código P o un código C/A que es módulo 2 agregado a la información de 50 badios/seg. (en la L_1 solamente). Las señales P y C/A por tanto son del módulo 2 agregado a la L_1 en fase de cuadratura (solamente P esta presente en L_2).

El código P es una secuencia pseudoaleatoria con una período de un segundo, mientras que el código C/A es una secuencia pseudoaleatoria con un período de un milisegundo. Contrariamente al GPS donde todos los códigos son únicos a un satélite especifico, se utiliza un código GLONASS sencillo para todos los satélites. Los receptores GLONASS duplican los códigos P y/o C/A y la transmisión del tiempo se determina al medir la desviación que se debe aplicar al código generado localmente para sincronizarlo con el código recibido del satélite.

En un empeño por reducir el ancho de la banda astronómica de radio, los operadores de GLONASS han formulado un plan de frecuencias del 13 a 21 será que retirados tan pronto como sea posible por la aplicación de una configuración opuesta, en la cual dos satélites en el mismo plano y separado por 180° transmite en la misma frecuencia. Desde 1998 hasta el 2005 no serán utilizados canales superior al 13, este canal se utilizará lo menos posible, Después del 2005, la banda será desplazada desde o hasta +12, -7 y +6.

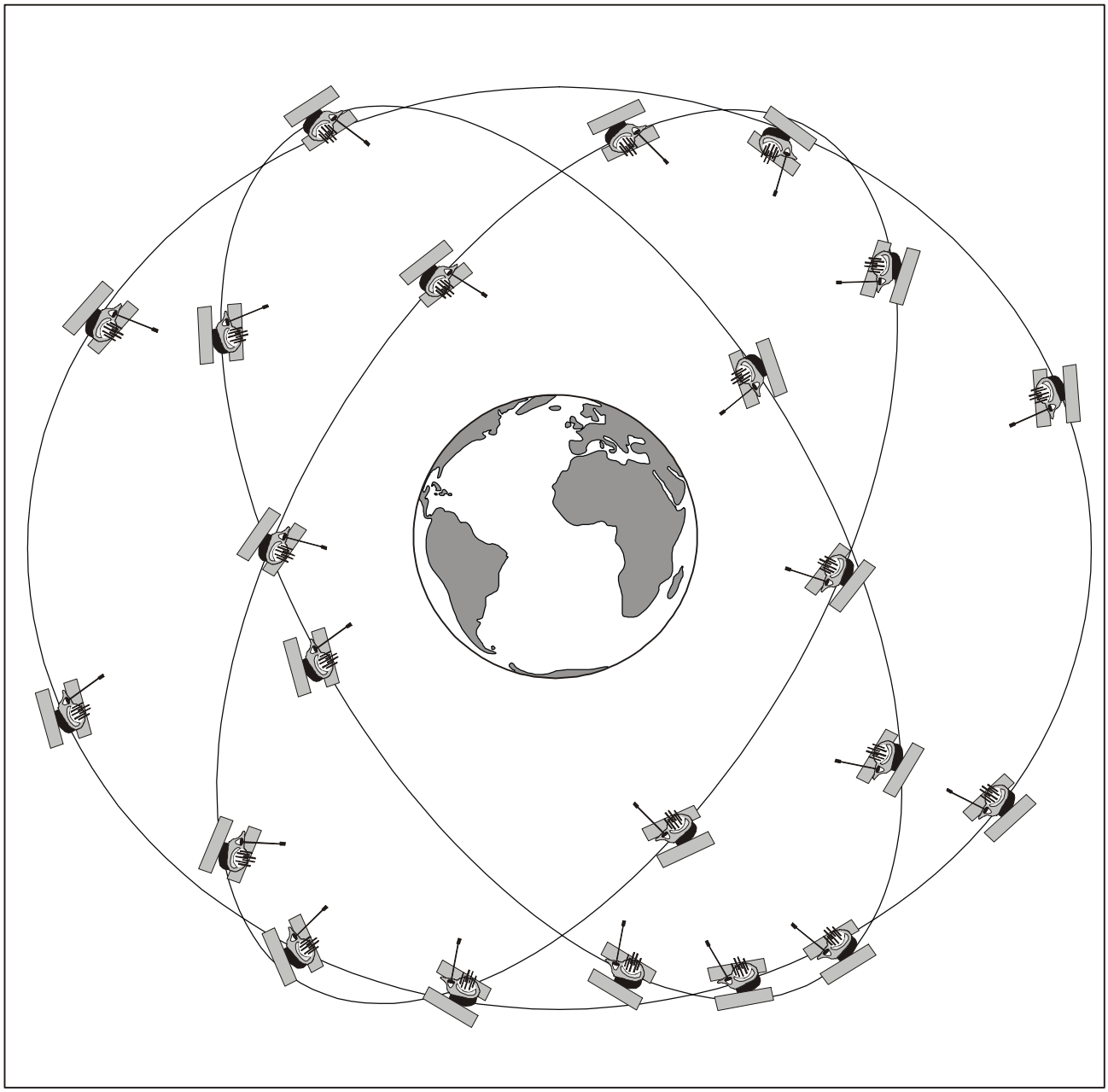


Fig. 294 Diagrama representativo del funcionamiento completo de los satélite del sistema GLONASS los cuales eventualmente están distribuidos en 3 planos obitales

7.19 Sistemas de Navegación por satélites GPS y GLONASS. Utilización integrada del GPS y GLONASS

Específicamente, como se mensionó anteriormente la constelación GLONASS consta de 3 planos orbitales frente a la constelación GPS que tiene 6 planos orbitales, siendo diferente también la inclinación de las mismos respecto al ecuador, lo que permite ofrecer distintas configuraciones disponibles como una función de la latitud, siendo más preciso el sistema GLONASS en altas latitudes mientras que el GPS lo es en latitudes medias. Este efecto se hace más pronunciado en la medida que el ángulo de ocultamiento aumenta.

Un receptor capaz de operar tanto con el GPS como con el GLONASS pudiera ofrecer lo mejor de ambos, como un sistema que compensa las limitaciones del otro en latitudes especificas. La disponibilidad adicional de los satélites GLONASS, pudiera no solo aumentar el número de estaciones visibles, que es lo que ocurre en cuaquier posición, sino que en altas latitudes ofrecearán satélites a mayor altura que los proporcionados por el Sistema GPS solamente.

Además de que el código P del GLONASS no está usualmente codificado, está disponible en dos frecuencias y prové a los usuarios civiles una exactitud comparable al código P del GPS (código codificado P). La medición de la fase de la portadora utilizada en ambos sistemas debe proporcionar un mejor funcionamiento debido al fácil acceso en la medición de la doble frecuencia en el GLONASS.

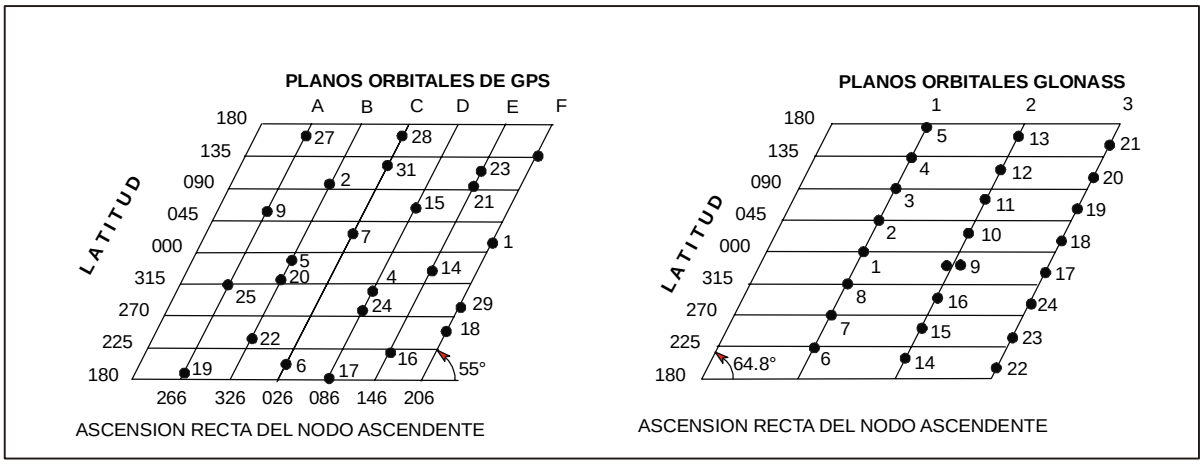


Fig. 295 Planos orbitales de los sistemas GPS/GLONASS

2. Operación combinada del GPS/GLONASS

Una rápida obtención del tiempo puede ser alcanzada en el Cold Start Mode ya que una mayor cantidad de satélites están visibles en una posición y en un tiempo dado, de este modo aumenta la probabilidad de determinación de la posición. La mayor cobertura en un medio ambiental obstruido es una de las principales ventajas que nos proporciona la combinación de los dos sistemas para su aplicación, donde es esencial que la trayectoria sea continua aun cuando esté situado entre edificios, arboles o montañas, la constelación incrementada mejorará considerablemente la capacidad operacional. La exactitud horizontal del Servicio de Posicionamiento Estándar (SPE) del GPS es de 33 metros. Para el GLONASS la experiencia ha demostrado una medición exacta del orden de los 8 metros. El mejor software editado relacionado con la operación combinada del GPS/GLONASS lo hace mediante la sincronización. Específicamente en una configuración sólo compuesto por GPS o GLONASS, todas las mediciones incluyen un error en el reloj del receptor bien sea respecto al tiempo del GPS o al del GLONASS, o sea, cualquier sistema que esté siendo utilizado. Como este error es común en todas las mediciones solamente afectará la hora y no la posición o velocidad estimada.

En el caso de operación combinada algunas mediciones incluirá un error en el reloj del receptor GPS, mientras otras incluirá un error en el reloj del receptor GLONASS. Las rerefencias de tiempo del GPS y GLONASS tienen que ser conocidos a través de exactitudes de posiciones aceptables para ser logradas.

El tiempo en el GPS está relacionado al UTC del Observatorio Naval de los Estados Unidos (USNO), mientras el GLONASS utiliza el UTC (SU - Soviet Union) (esto también es conocido como UTC (RF- Russian Federation).

La diferencia entre el sistema de tiempo del GLONASS y UTC (SU) es alrededor de 20 segundos, mientras que el UTC(SU) ha sido desviado del UTC en 7 segundos aproximadamente. El sistema de tiempo del GPS es mantenido dentro de los 20 nanosegundo ($2x10^{-8}$ segundo) respecto al UTC.

Las autoridades rusas deben comenzar a transmitir la diferencia de la desviación del tiempo entre los dos sistemas como una parte del mensaje de navegación del GLONASS. Considerando una recomendación del Comité Consultivo por la Definición del Segundo, las autoridades rusas deben también dirigir el sistema de tiempo del GLONASS lo más proximo al UTC.

El modo de operación combinado también es afectado por los diferentes elipsoides utilizados por los sistemas (GPS y GLONASS) cada uno emplea un sistema de referencia cartesiano geocéntrico diferente. El GPS utiliza el sistema WGS 84 mientras el GLONASS utiliza el sistema PZ 90 (puede ser referido al sistema de referencia cartesiano soviético 1990 (SGS 90 - Soviet Geocentric Co-ordinate System 1990) .La mayor dificultad en la evaluación de cualquier diferencia entre estas dos estructuras de coordenadas ha sido la falta de un conocimiento detallado del PZ 90.

Reportes de grupos de trabajo del Instituto de Navegación de los Estados Unidos respecto a la posibilidad de intercambio entre los sistemas GPS y GLONASS han sugerido, como un estimado, que la diferencia entre las coordenadas exactas de la posición PZ 90 en la superficie terrestre sea menor de 15 metros con un promedio medio de alrededor de 5 metros. A fin de que el modo combinado de operación pueda ser efectivo, la relación entre estos dos elipsoides debe ser claramente definido.

Exactitud total (Resultante) e integridad del sistema

La exactitud resultante del sistema conjunto dependerá del efecto combinado del mejoramiento de la Dilución Geométrica de la Posición (DGP) sobre cualquier sistema independiente, conjugado con la disminución de la exactitud reducida de la mediciones del GPS frente a la mediciones del GLONASS, así como el error residual en la estimación de la diferencia entre los tiempos de referencia.

La integridad es un gran obstáculo para la aceptación difundida del GPS (o GLONASS). En el caso de funcionamiento independiente de uno de los dos sistema , éste puede ser comprobado comparando una solución determinada, utilizando varias de las combinaciones posibles para arribar a una solución. Por ejemplo, en el caso de cinco satélites hay cinco combinaciones de cuatro satélites. Si un satélite proporciona “incorrectas” mediciones, una de las cinco soluciones será correcta mientras que las otras cuatro serán incorrectas, señalando de este modo al satélite mal seleccionado. Pero esta forma de interpretarlo requiere muchas soluciones de cálculo, de ahí la necesidad de incrementar la carga computacional en el procesador del receptor.

Una forma de interpretación alternativa sería procesar todo a la vista. Esto, con una combinación de pruebas residuales situaría al satélite incorrecto, necesitando para ello al menos cinco y preferiblemente más satélites a la vista en cualquier hora dada.

La implementación combinada del GPS/GLONASS, con esta constelación duplicada, proveerá una mayor capacidad de integridad.

3. Funcionamiento y funcionabilidad de los receptores integrados GPS/GLONASS

Los 8 canales de la frecuencia dual del código P del receptor GLONASS y los 12 canales de una sola frecuencia del código C/A del receptor GPS/GLONASS pueden ser utilizados en un modo combinado. Las mediciones de las distancias de cuatro satélites del GLONASS se realiza en la portadora filtrada de

una frecuencia del código P mientras que la medición de las pseudodistancias de siete satélites se realiza en la portadora filtrada de una frecuencia del código C/A. Los receptores integrados GPS/ GLONASS pueden ser también utilizados en el modo diferencial por ambos códigos y para la medición de la fase de la portadora.

Excepto para la medición diferencial de líneas bases cortas, el retardo ionosférico es un factor importante en el surgimiento de los errores residuales en los equipos. Las mediciones en la frecuencia dual disponible permite la medición del retardo ionosférico para todos los satélites del GPS a la vista. Esta información es entonces utilizada para obtener buenos estimados del retardo ionosférico por los satélites (para lo cual solamente están usualmente disponible la medición de una frecuencia). La transferencia de tiempo en los receptores es implementando acorde al estándar establecido por el Buró Internacional de Medidas (BIM) del Comité Consultativo para la Definición del Segundo (CCDS). Un ajuste cuadrático mínimo es aplicado a los 15 segundos en la medición de la pseudodistancia tomada cada segundo.

Varias compañías comerciales están fabricando en la actualidad receptores compatibles disponibles que reciben y procesan señales de 14 satélites navegables o más de cualquier sistema de navegación (satélite), ejemplo: GLONASS, GPS, NAVSTAR o satélite de ambos sistemas simultáneamente. Estas instrucciones mostrarán visualmente también las coordenadas de su posición en uno de los datums horizontal seleccionado por ejemplo: PZ 90, WGS 84, NAD 83, etc.

Sistemas Satelitarios de Base Ampliada (Satellite Based Aumentation Sistems - SBAS)

Los SBAS son sistemas que se superponen al funconamieto normal del GPS y GLONASS - Sistema Global de Navegación por Satélite, utilizando una serie de satélites estacionarios que ofrecen a los usuarios una mayor confiabilidad a través de una mejorada exactitud, acequibilidad, integridad y continuidad. Aunque estas mejoras están siendo originadas o dictadas por regulaciones aeronáuticas, en la práctica todos los usuarios, sean marítimos, terrestres, ferrocarrill o investigaciones se beneficiarán.

Las tres mayores componentes del SBAS son el EGNOS (The **E**uropean **G**eoestationary **N**avigation **O**verlay **S**ervice- Servicio Europeo Geoestacionario de Navegación Superpuesto), WAAS (The **A**merican **W**ide **A**rea **A**ugmentation **S**istem- Sistema Americano de Área Ampliada) y el MSAS (The Japaneses **M**ulti - funcional **T**ransport **SAT**ellite - Satélite Transporte Japones Multinacional) (MTSAT). La señal transmitida por SBAS será totalmente compatible con las señales del GPS /GLONASS, lo cual significa que la presencia de las señales del SBAS no distorsionará la señal del GPS/GLONASS en cualquier dirección.

El programa de implementación del SBAS deben culminar con la Capacidad Operativa Avanzada (COA) durante el período 2003 -2005.

El siguiente esquema ilustra como se interrelaciona el actual y los futuros sistemas de posicionamiento satelitarios propuestos.

La primera contribución de la Unión Europea al GNSS -1 incluirá la señal respodedora-repetidora de la portadora en tres satélites geoestacionarios y una red de estaciones terrenas (aproximadamente 30 estaciones de monitoreo de la integridad y determinación de la distancia (RIMS -Rangin and Integrity Monitoring Stations), cuatro centros de control maestro y seis estaciones de enlace. Junto a ellas se proveerán un servicio de ampliación regional para las señales del GPS y GLONASS sobre Europa conocido como EGNOS. La red terrestre del EGNOS proporcionará los elementos principales para dos servicios de navegación adicionales además del régimen básico de medición de la distancia, denominado monitoreo integral y correcciones diferenciales en un área ampliada.

El servicio de integidad permitirá un rango de error estimado para cada señal de navegación, de modo que el usuario esté habilitado conocerlos dentro de 10 segundos, si un señal de navegación está fuera de parámetro,

Las correcciones diferenciales en el área ampliada permitirá a los usuarios europeos determinar su posición dentro de los 5 metros comparado con los 33 metros aproximadamente en el presente. Los usuarios requerirán un receptor EGNOS, que es más sofisticado que el receptor de navegación por satélite corriente. La señal deberá ser decodificada para dar una mayor exactitud de la posición en comparación con la de los sistemas GPS o GLONASS y proveerá una estimación exacta de los errores. El EGNOS estará en pleno funcionamiento en el 2004 y cuando sea completado, servirá como el principal componente regional, del que se espera en convertirse un sistema compacto de navegación automática de cobertura mundial.

La contribución de Europa a la segunda fase de la evolución del GNSS o sea el GNSS-2 podría remediar muchas de las preocupaciones relativas a la dependencia de otros sistemas de terceros paises tales tales como el GPS y GLONASS. Durante 1999 la Comisión Europea recomendó que Europa debería desarrollar una nueva constelación de satélites de navegación denominada Galileo. La constelación nominal Galileo consta de 27 satélites terrestres de óbita media en tres planos orbitales, con 9 satélites en cada uno de ellos eventualmente espacedos dentro de una órbita circular.

La constelación Galileo será totalmente compaible con el GPS pero independiente de éste. Tambien proporcionará a todos los usuarios una exactud de unos pocos metros, la cual es superior a la del servicio de posicionamiento estandar GPS. Además, Galileo realizará los requerimientos de seguridad de aplicación crítica garantizando el servicio de garantía.

El desarrollo de Galileo y la fase validación que acaba de comenzar durará aproximadamente hasta el 2005, cuando los primeros satélites de la constelación estén listos para su lanzamiento. Se espera que el sistema esté completamente funcionando en el 2008.

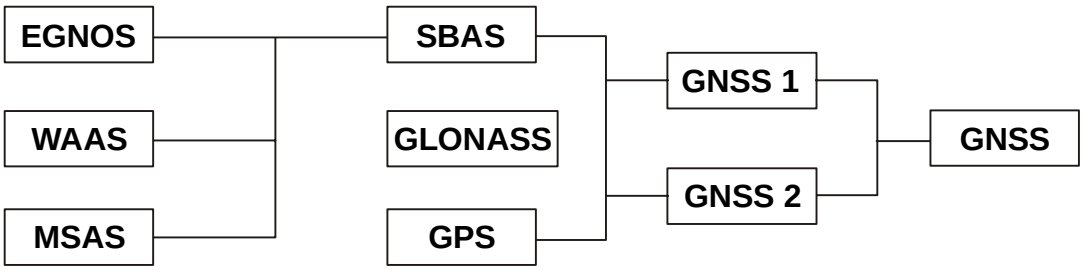


Fig. 296 Interrelación entre los sistemas actuales y futuros de posicionamiento satelitarios propuestos.

7.20 Fuentes de errores del sistema GPS

El sistema fue diseñado, desde su concepción para que cualquier fuente de error habitual en otros métodos que emplean satélites, fueran obviados. Pero tan perfecto y robusto que pueda parecer el sistema, le son inherentes algunas fuentes de errores muy difíciles de eliminar.

Los errores obtenidos en la posición geográfica calculada pueden ser, el resultado de una o varias fuentes combinadas y que como resultado de esto, ocasionará una disminución de la exactitud de la posición determinada. Las mayores fuentes de errores se mostrarán a continuación.

1. Errores atmosféricos e ionosférico: Pueden ser causados cuando la trayectoria de la señal del satélite respecto al receptor pasa a través de la ionosfera y la troposfera. La ionosfera es aquella parte de la atmósfera caracterizada por la alta densidad de iones, comienza en los 70 – 80 Km. sobre la superficie terrestre. La troposfera es la parte más baja de la atmósfera, extendiéndose desde el nivel del terreno hasta una altura de 9 Km. en los polos y 16 Km. en altura en el ecuador aproximadamente y contiene la mayor cantidad de masa de aire y casi todo el vapor de agua. Debido a que esta región experimenta cambios complejos y transitorios en la presión, temperatura, densidad y humedad debido a la interacción del sistema atmosférico.

El retardo de la trayectoria de la señal a través de la atmósfera se puede predecir utilizando modelos matemáticos complejos y resulta que la calidad de estos modelos a menudo se verifican colocando un receptor GPS distante de otro. Los retardos atmosféricos a través de la troposfera no puede ser predeterminada con cualquier grado de exactitud absoluta ya que estas condiciones dinámicas son por su naturaleza variable, no obstante calculando las velocidades relativas de dos señales diferentes obtenidas del satélite, los errores inducido por la atmósfera pueden ser minimizados en cierta magnitud. La amplitud de los errores de la ionosfera pueden ser aproximadamente de 5 metros mientras que las condiciones de la troposfera puede considerar la amplitud del error hasta 1 metro.

2. Errores por las trayectorias múltiples (reflexión múltiple): Muy similar al efecto ghosting algunas veces visto en la recepción de las señales de televisión, son causados por las señales reflejadas de las superficies cercana al receptor. La señal en lugar de seguir una trayectoria recta hacia la antena del receptor es reflejada por varios obstáculos locales, de ese modo aumenta la duración del tiempo de la señal del satélite al receptor. La "reflexión retardada" o las señales de trayectorias múltiples no solo confunde los cálculos en el receptor sino que produce una onda de interferencia con la señal directa y por tanto produce un resultado confuso o ruido (imagen falsa). Las fuentes de las señales de trayectorias múltiples pueden ser los edificios, superestructuras de buques, farallones, arboles. vehículos en movimiento, etc. Todos con ángulos de incidencia de la señal que se recibe por encima de la antena. Si la trayectorias de las señales múltiples no son reflejadas por el receptor puede ser generado un resultado errático, el cual influirá sobre la exactitud de la posición calculada. Sin embargo el error debido a las trayectorias múltiples a veces se dificulta detectarlo incluso utilizando un receptor de calidad, con las técnicas de la señal de refracción compleja, puede minimizarse el problema.

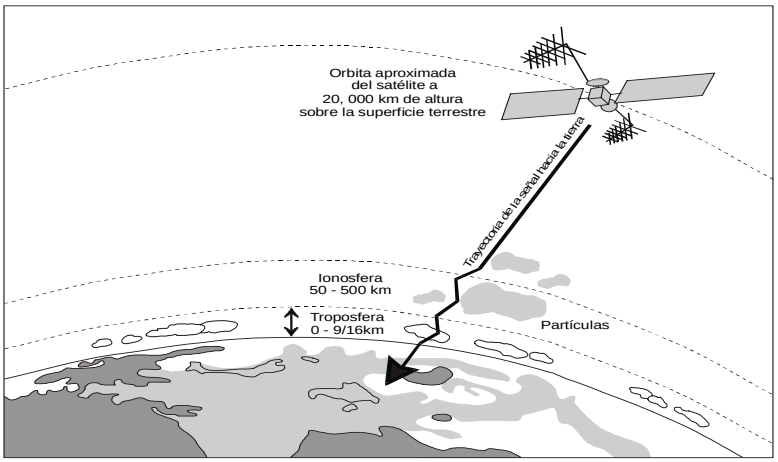


Fig. 297 Errores en la trayecoria de las señales transmitidas por el satélite

3. Errores de polarización del reloj del satélite y del receptor*:* Uno de los factores más importante que intervienen en la exactitud del sistema está dado en la capacidad que tenga éste para medir las diferencias de tiempo con que se propaga la señal del satélite al receptor con exactitud. Esta función se efectua en el trabajo que realican los relojes de ambos dependiendo de su eficiencia. Los errores de polarización del satélite son causados por pequeñas discrepancias en la exactitud dentro de los relojes atómicos utilizados en los satélites. Aunque estos relojes son muy precisos, éstos no son perfectos y a pesar de ser corregidos para errores significativos, pequeños discrepancias pueden trasladarse directamente a la señal a través de los errores en la medición del tiempo, esto puede afectar la posición calculada final en 1– 5 metros.

4. Errores de posición o de efemérides del satélite: La posición exacta de cada satélite orbitando en la constelación del sistema es constantemente monitoriada, pero pequeños errores en su posición, o efemérides pueden tener lugar. Tales errores pueden ocurrir entre los periodos específicos de monitoreo y dan lugar a pequeñas inexactitudes en la posición calculada indicándole errores de 2 – 5 metros.

5. Geometría de los satélites: La distribución de los satélites que es seguida por sus trayectorias a través del receptor GPS produce un error en su posición denominado “DILUSION GEOMETRICA DE LA POSICION”. No obstante al mayor espaciamiento de los satélites producen un pequeño error en la posición. Si los satélites se encuentran a baja altura estos producirán una peor posición vertical lo cual puede afectar la determinación de la latitud.

Si el receptor selecciona los satélites que están ampliamente espaciados , la intersección de la posición será muy diferente cortándose casi en ángulo recto. Un receptor de buena calidad tiene una estructura tal que tiene la habilidad para determinar que combinación de satélites visibles dará los mejores resultados de cálculo.

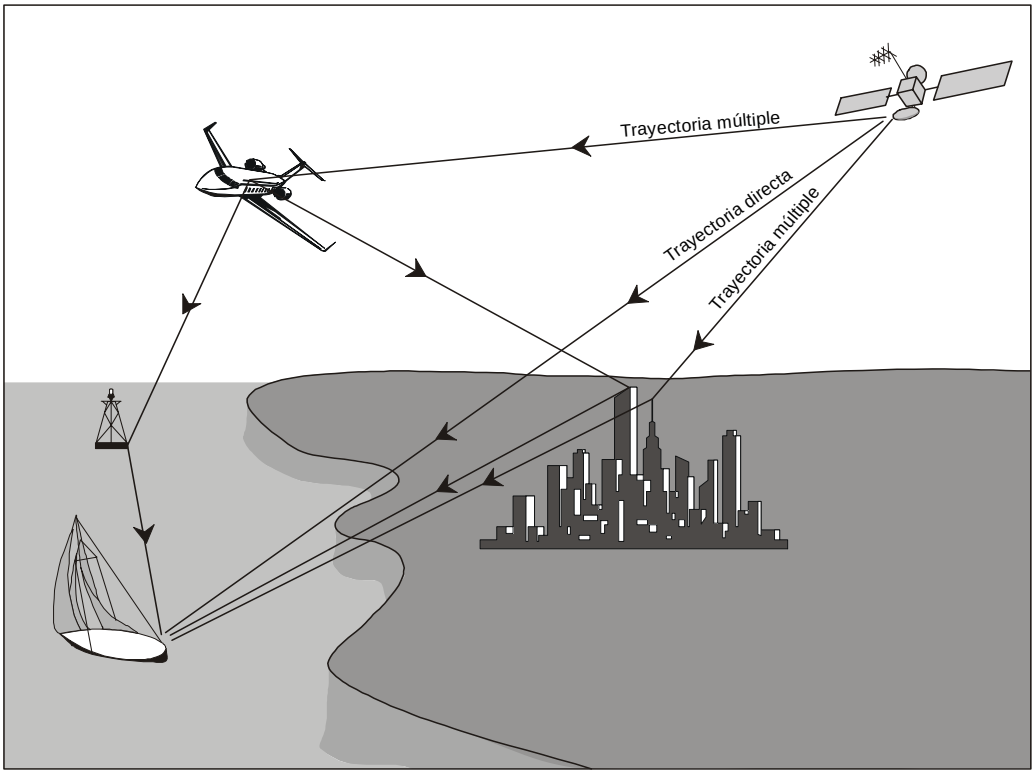
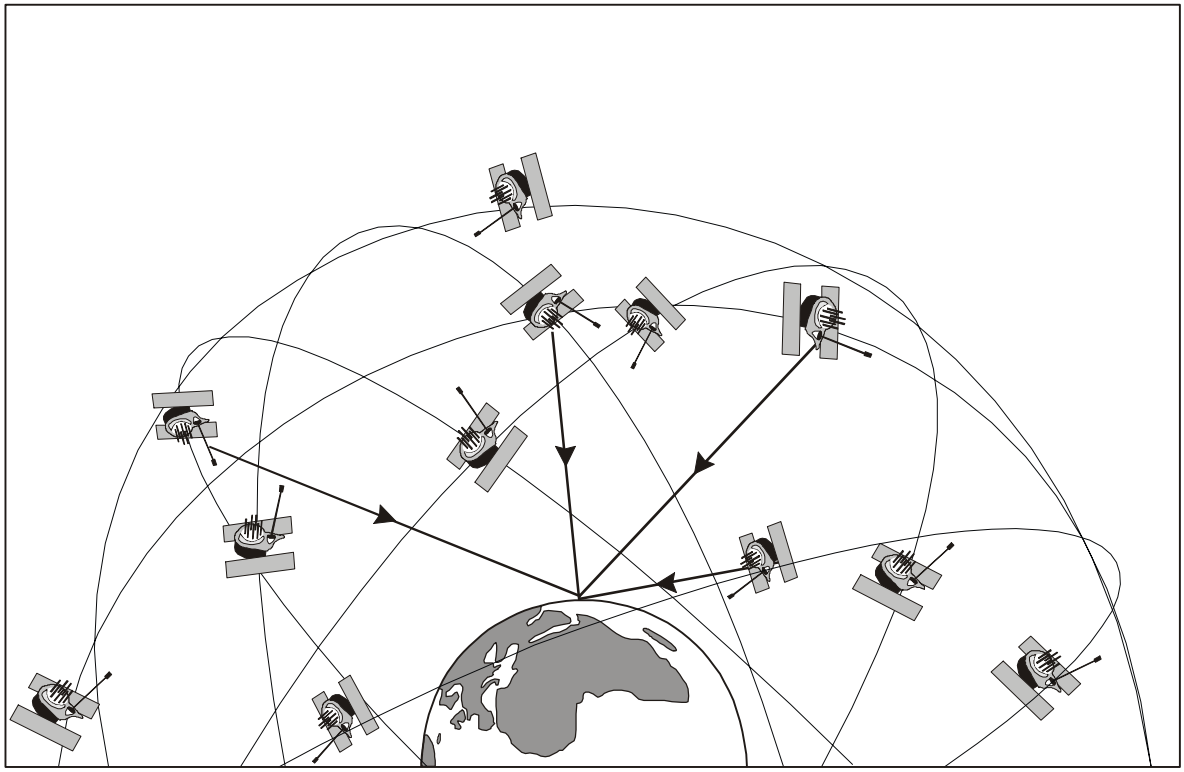


Fig. 298 Trayectoria múltiple de la señales transmitida por el satélite

a)



b)

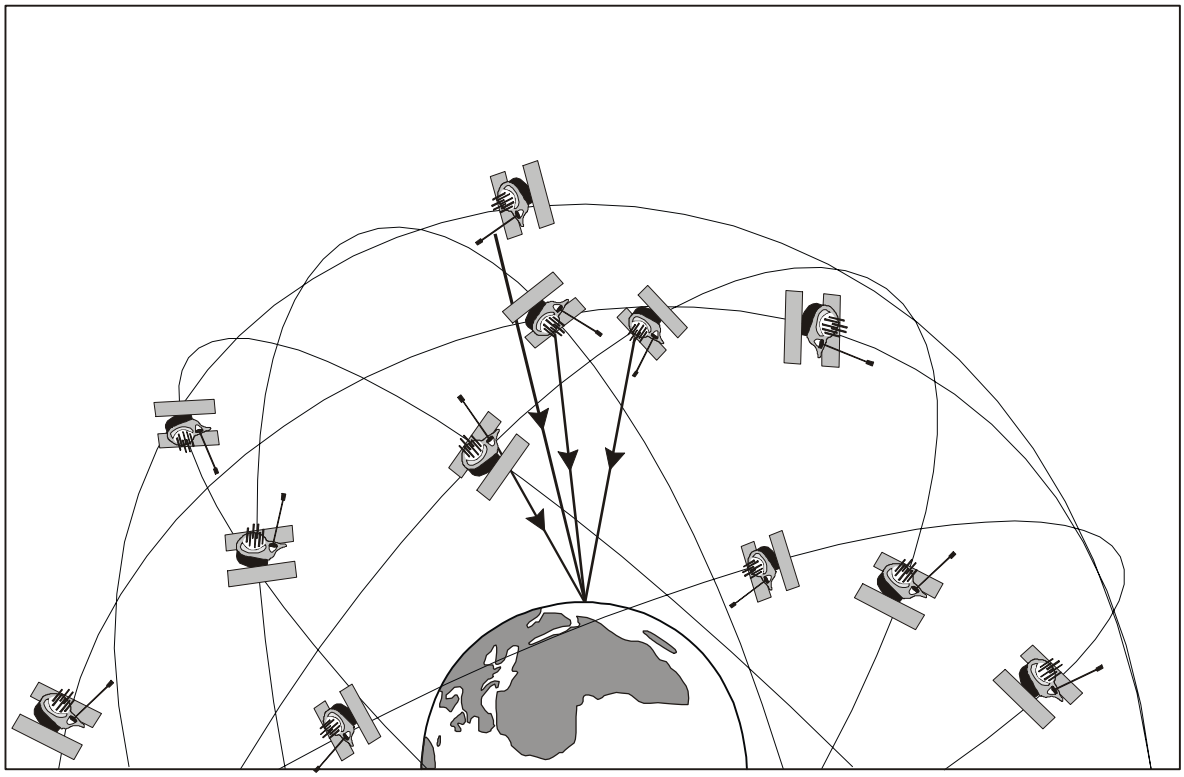


Fig. 299 Geometría favorable (a) y desfavorable (b) de los satélites

6. Impresición en la altura de la antena*:* En todos los receptores, unos de los datos importantes a introducir es la altura de la antena. Con esto se logra un cálculo más preciso de las distancia desde el receptor al satélite y se evitan errores en el posicionamiento. En todos los casos el error es pequeño.

7. Disponibilidad selectiva*:* La Disponibilidad Selectiva (DS - Selective Availabilit - SA) es la introducción deliberada de un error ya sea alterando la precisión en la medición de los satélites o la posición de éstos en el espacio, a través de un software a bordo, reduciendo de esta forma tanto la exactitud de la posición como en la medición del tiempo (hora) de los usuarios civiles.

La SA fué activada el 4 de julio de 1991 y eliminada a las 14:00 horas (Hora Estandar del Este de Australia) el 2 de mayo del año 2000. Con esta decisión de terminar con la disponibilidad selectiva es posible obtener la posición en el plano horizontal, con una exactitud aproximada de 33 metros en el 95% de las veces y con el GPS diferencial (DGPS), se obtiene una exactitud típica de ± 5-10 metros.

Con la SA desconectada, la mayor fuente de los errores acumulativos son debidos a los efectos de la ionosfera en la medición de la pseudodistancia, las cuales si no son corregidas pueden distorcionar en un receptor de satélite simple la medición hasta 50 metros en el zenit y 150 metros en el horizonte. El GPS diferencial (DGPS) puede eliminar casi todos los errores

Resumen de las fuentes de errores del Sistema GPS.

Errores típicos, en metros (por cada satélite). Tabla 7.5

FUENTES DE ERRORES	GPS	GPS Diferencial (DGPS)
Reloj del satélite	1,5	0
Errores orbitales	2,5	0
Ionosfera	5,0	0,4
Troposfera	0,5	0,2
Ruido del receptor	0,3	0,3
Señal fantasma	0,6	0,6
Disponibilidad selectiva	0	0
Exactitud promedio de la posición		
Horizontal	20	1,3
Vertical	48	2,0
3 Dimensión	52	2,8

Uso incorrecto del sistema de referencia.

El uso geodésico utilizado por el GPS es el WGS – 84 visto con anterioridad. Sin embargo, los receptores permiten el uso de sistemas geodésicos locales, estrechamente ligados a la zona de navegación por la que navegue el buque, lo que permitirá una mayor exactitud en la posición. El uso incorrecto de estos sistemas puede generar errores incalculables en el posicionamiento.

GPS DIFERENCIAL (DGPS)

1.Los servicios del GPS diferencial (DGPS) se han desarrollado en respuesta a las limitaciones inherentes e impuestas al GPS. A pesar del alto grado de exactitud disponible del Servicio de Posicionamiento de Precisión, incluso esto puede no ser bastante exacto como para hacer frente a los **restrictivos** requisitos de la navegación en los puertos y sus accesos.

2. El principio fundamental del DGPS es la comparación de la posición de un punto fijo, al que se cita como estación de referencia (Fig.300), con las posiciones obtenidas por un receptor del GPS en este mismo punto. Las diferencias observadas se pueden considerar como un desplazamiento de las coordenadas geográficas de 2 o 3 dimensiones (posición diferencial) ocomo una serie de correcciones a los datos de la distancia del satélite (pseudodistancias diferencial). Existen otros métodos que proporcionan correcciones como: correcciones del reloj del satélite y efemérides o correcciones de pseudodistancias para un lugar especifico con los valores adicionales para corregir la posición de los usuarios con respecto al lugar especifico. La técnica diferencial de posición tiene una limitada aplicación ya que es necesario que el observador móvil utilice los mismos satélites observados en la estación de referencia. La técnica de pseudodistancias incluye los cálculos de una sola corrección de la distancia de cada satélite observado en la estación de referencia pero no exige necesariamente que el observador móvil utilice los mismos satélites. Las correcciones de las pseudodistancias calculadas en la estación de referencia que no ser observen en el móvil serán ignoradas.

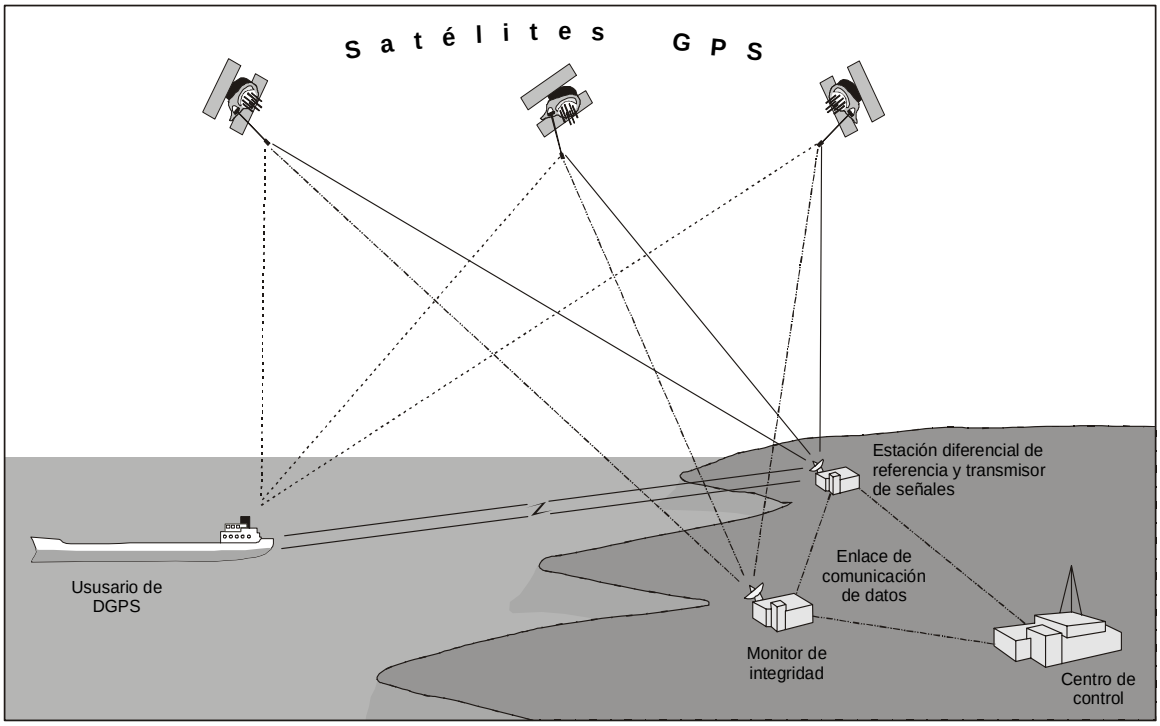


Fig. 300 Elementos del sistema GPS

3. Las investigaciones sobre las formas de transmitir las correcciones de pseudodistancias al usuario, concluyeron en que los radiofaros marítimos de frecuencias medias (FM) que operan en la banda de 285 – 325 kHz eran el método terrestre más adecuado para el envío de las correcciones antes mencionadas. El formato americano de mensajes de corrección, conocido como RTCM SC 104, se ha convertido en el estándar industrial para codificar las correcciones DGPS. El mensaje de correcciones se emite desde los radiofaros aplicando la modulación GID con el tono de Cambio Mínimo (MSK). El Servicio de Guardacostas de EE.UU han creado un documento estándar de emisiones que describe la estructura y formato de la señal de emisión.

4. Para hacer uso de las correcciones DGPS, los usuarios deben tener un receptor MSK/Radiofaro y un receptor GPS capaz de incorporar los datos de corrección DGPS en formato RTCM SC 104.

5. Varias empresas comerciales proporcionan un servicio DGPS, pero codifican la señal al formato

RTCM, por lo que es necesario un receptor especial o un decodificador para poder cálcular las posiciones con mayor exactitud.

6. En esta sección hay una tabla que contiene los datos de los radiofaros utilizados que transmiten señales de DGPS (área del Caribe, Costa del Golfo, y este de los Estados Unidos).

7. También se han creado sistemas DGPS que usan satélites geoestacionarios. Una red de estaciones de referencia suministra las correcciones de la pseudodistancias, que se transmiten a los satélites para que emitan a los usuarios. La cobertura de las emisiones satélitarias es mucho mayor que la de los radiofaros MF y el alcance del sistema solo se ve limitado por la distancia hasta la estación de referencia que convalida las correcciones derivadas.

8. En la figura 301 se muestra la cobertura que abarca los radiofaros que se encuentran en el área del Caribe, Costa de México y Este de los EE. UU.

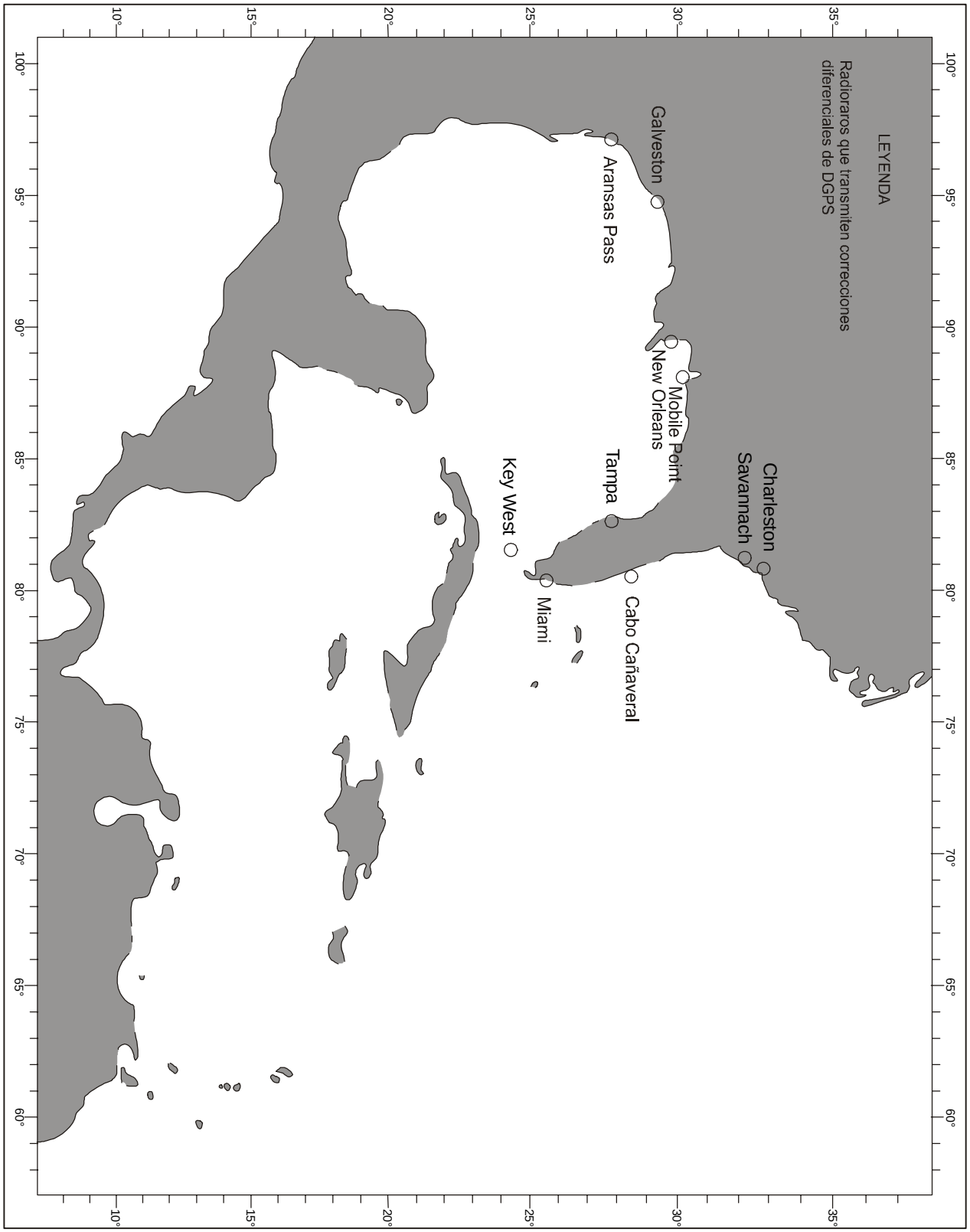


Fig. 301 Relación de radiofaros de área del Caribe que transmiten correcciones diferenciales

7.21 Cartas Electrónicas

En todos los países del mundo es una función del Estado garantizar la navegación segura por sus costas, lo que incluye el mantenimiento del sistema de señales marítimas, la confección y actualización de cartas de navegación confiables y la emisión de publicaciones náuticas, entre otras.

Existe un interés en la industria marítima, y en el público en general, acerca de la necesidad de aumentar la seguridad en la navegación. Los grandes derrames de hidrocarburos, productos de accidentes provocados por tanqueros en Norteamérica y Europa, ha despertado la conciencia pública acerca de la necesidad de nuevas tecnologías y sistemas de navegación capaces de reducir la probabilidad de ocurrencia de tales eventos. También desde el punto de vista económico los beneficios pueden ser notables si se tienen en cuenta que la introducción de estos sistemas permiten eliminar costosas paradas impuestas por las condiciones del tiempo.

La carta electrónica (CE) ha surgido como una nueva ayuda a la navegación marítima a su seguridad y comercio. Mas que una simple representación de gráficos, los sistemas de cartas eléctrónicas (Electronic Charts System. ECS) combinan tanto datos textuales como geográficos en una cómoda y conveniente herramienta. Como una ayuda a la toma de decisiones de forma automatizada, es capaz de determinar la posición del buque con relación a tierra, objetos cartográfiados, ayuda a la navegación y peligros ocultos a la vista.

El amplio uso de las técnicas de radionavegación particularmente el Loran-C, y el GPS (Sistema de Posicionamiento Global) han permitido que la utilización de estos medios sea accesible y de fácil explotación, siendo común que hasta las lanchas de recreo tengan receptores a bordo. El empleo del GPS y el GPS diferencial (DGPS), permite a los usuarios de cartas electrónica un grado de presición y confiabilidad en las posiciones nunca antes alcanzado.

1. ¿Por qué Cartas Electrónicas?

Los grandes desastres ambientales y ecológicos ocurridos en los últimos años por accidentes marítimos en los que se produjeron grandes vertimientos de petróleo al mar, los cuantiosos recursos que se pierden cada año tanto en buques como en cargamentos y vidas humanas han puesto sobre el tapete la urgente necesidad de aumentar la seguridad en la navegación. Y las cartas electrónicas responden a ese objetivo. No son un capricho de la modernidad.

Una Carta Electrónica, en su forma más elemental, es la reproducción digital de su similar en papel. Ambas son iguales por su contenido, pero por tratarse de una imagen «fotográfica» no pueden hacerse cambios en la información en ella contenida, aunque puede ser objeto de actualizaciones por métodos que después veremos. A tal tipo de carta electrónica «fotográfica» se le llama **Carta Náutica Raster (RNC).**

En una carta *Raster* usted puede ver y leer toda la información, pero la imagen no es interactiva, lo que significa, entre otras cosas, que si es empleada en un sistema de navegación computadorizado éste no podrá detectar automáticamente un peligro u otra condición dada en la imagen de esta carta.

Ya tenemos una carta náutica electrónica en el monitor de nuestra computadora, ¿y para qué nos sirve?... pues sólo para ver su contenido. Algo nos falta... y, en efecto, necesitamos un sistema que nos permita hacer sobre esta carta electrónica al menos lo mismo que hacemos sobre una carta de papel, o sea, ploteo de posiciones, trazado de rumbos, medición de ángulos, distancias,

marcaciones y planificación de travesías... ¡pues claro, nos faltaba un Sistema de Carta Electrónica. Los componentes de un sistema de carta electrónica (ECS) son:

- Hardware de computación
- Software especializado
- Sensores (girocompás,GPS,Radar ARPA, corredera, anemómetro, etc.)
- Carta Náutica Electrónica

Instalemos en nuestra computadora uno de estos sistemas y luego carguemos la carta electrónica que abarca parcial o totalmente la zona de navegación a la escala apropiada. Podemos a resolver sobre la RNC las tareas elementales de navegación. Vea en la Fig. 302 un ejemplo de pantalla típica de un ECS mostrando la misma carta en dos escalas distintas.

Pero seguramente Ud, navegante, se preguntará: ¿si la combinación RNC/ECS sólo permite hacer lo mismo que con una carta de papel, en tonces, ¿dónde radica su efecto positivo sobre la seguridad en la navegación?...

Veamos: un ECS permite resolver las tareas habituales de navegación con mayor rapidez y seguridad. Pero, ¿y si le incorporamos las indicaciones de un receptor GPS o, mejor aún, DGPS?... ¡entonces tendríamos un trazador indicando sobre nuestra carta electrónica la posición dinámica del buque en tiempo real, o sea, en ese propio momento!

De esta forma las posibilidades de la alianza ECS / RNC / DGPS permite:

♦ Visualización de la posición del buque sobre la RNC continuamente

Resolver las tareas habituales de navegación con mayor seguridad y rapidez

♦ Indicación continua del rumbo y velocidad efectivos

♦ Establecer alarmas por aproximación a un waypoint, por salida o entrada a zonas de interés delimitadas por el navegante, por desviación de la derrota planificada, etc.

♦ Pasar rápidamente de una carta a otra de escala diferente manteniendo en todo momento la indicación de la posición.

♦ Ver en pantalla la derrota planificada y la real simultáneamente o por separado

♦ Mantener un registro de la derrota protegido de alteraciones intencionales.

IIndicar instantáneamente las coordenadas geográficas del cursor sobre la pantalla así como el rumbo, distancia y tiempo para arribar a ese punto desde la posición actual del buque a velocidad efectiva

♦Tiempo para arribar al próximo waypoint y el estimado tiempo de arribo (ETA) al mismo.

♦ Exactitud de la posición, número de satélites observados e identificador de la estación DGPS si está recibiendo esta señal.

♦ Cálculo auxiliar de distancia entre dos puntos por loxodrómica o por círculo máximo.

♦ Información opcional del derrotero, mareas, señales marítimas, etc. y otras de índole diversa.

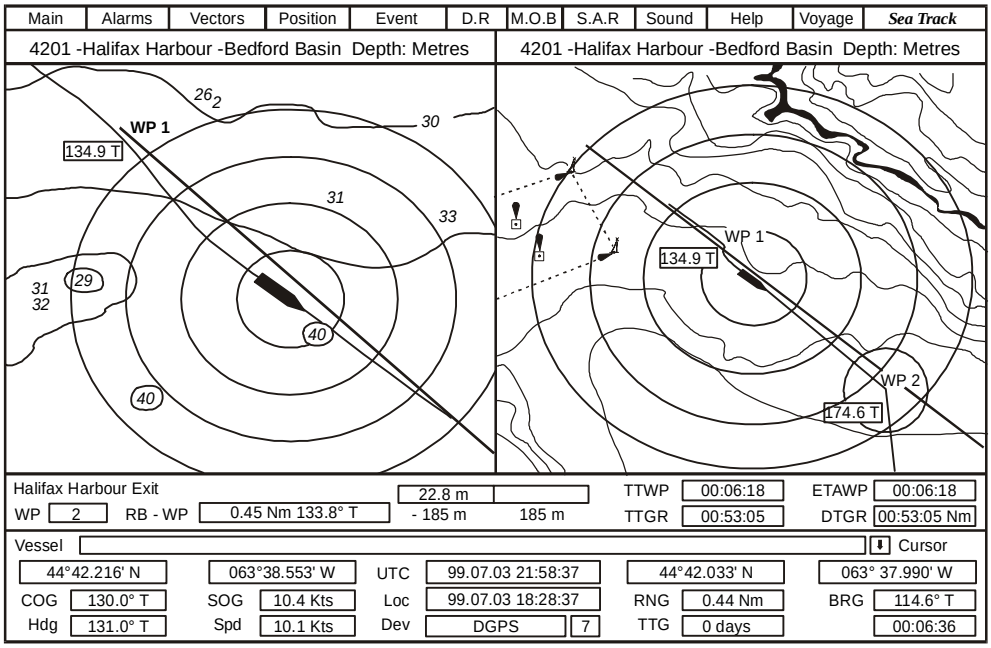


Fig. 302 Carta electrónica típica en dos escalas distintas

¡Seguramente muchos navegantes estarían satisfechos con mucho menos de lo apuntado! Y todo sobre una carta Raster, una carta «no inteligente».

¿Qué inconvenientes poseen estas cartas?; en primer lugar que no son interactivas, dado que el ECS no puede hacerles «preguntas inteligentes» o «lógicas» (observe que las tareas planteadas anteriormente no se refieren a un dato concreto de la carta); así, por ejemplo, no puede fijarse una alarma al cruzar una determinada isobata de seguridad; en segundo lugar, su carácter «fotográfico» hace que ocupen mucho espacio en memoria, ya que en ellas se almacenan incluso las áreas que no contienen información, y lo hacen punto por punto o, propiamente, pixel por pixel.

Sin embargo, la producción de cartas Raster es relativamente sencilla y de bajo costo, lo que ha provocado una veloz carrera por el dominio del mercado.

Además, los navegantes en general están habituados al aspecto de las tradicionales cartas de papel, por lo que el trabajo con las cartas *Raster* es de fácil asimilación y aceptación.

Sin embargo, la utilización de un ECS no exime de lo estipulado en la regla V-20 del *Convenio para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS'74)* que dice: *«A bordo del buque deberá haber, debidamente actualizado, cartas náuticas, derroteros, libros de faros, avisos a los navegantes, tablas de mareas y cualquier otra publicación náutica necesaria para el viaje proyectado»*. De manera que un ECS en funciones a bordo de un buque, a pesar de todas sus ventajas, es considerado **sólo como una ayuda a la navegación** que no sustituye a la obligatoria carta de papel.

Las cartas *Raster* pueden ser utilizadas en sistemas que sólo trabajan con ese formato, o en otros que pueden emplear indistintamente cartas *Raster* o *Vectoriales*.

La práctica parece indicar que la esfera de aplicación de los ECS es la de embarcaciones de pequeño y mediano porte, donde no se realizan largas travesías y la frecuencia de la actualización de la carta no compromete decisivamente la seguridad en la navegación.

En enero de 1999 el Buró Hidrográfico Internacional publicó la primera edición de las *Especificaciones de Producto para Cartas Raster de Navegación* (S-61), en las que se establecen los requisitos que deben cumplir las RNC, en un esfuerzo por normalizar su producción, de modo tal que sean confiables para su uso en los sistemas conocidos por las siglas ECDIS **(Electronic Chart Display Information System/ Sistema de Visualización de Información de Carta Electrónica)** cuyas características veremos más adelante.

Por otro lado, el *Grupo de Coordinación para ECDIS*, de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) y la Organización Marítima Internacional (OMI) ha estado elaborando recomendaciones relativas a las *Normas de funcionamiento para los Sistemas de Visualización de Cartas Raster* (RCDS) durante 1998. Este grupo también ha elaborado un *Proyecto de Guía para los Sistemas de Cartas Electrónicas*(ECS), estas últimas con el fin de ayudar a los productores en su diseño y a los usuarios en su empleo. Véanse en éste y otros esfuerzos por normalizar el ámbito de la cartografía electrónica el interés de la comunidad internacional por garantizar la calidad de los datos y la seguridad en la navegación.

No lo dude, sin normas esta poderosa técnica podría convertirse en un peligro para la comunidad marítima.

Recordemos: un ECS a bordo no sustituye a la obligatoria carta de papel y, en general, se desarrollan sobre cartas *Raster*, aunque también pueden contener elementos vectoriales.

Pero no se preocupe, ahora aclararemos en qué consiste el carácter vectorial de una carta náutica electrónica.

2. Cartas Raster Vs. Cartas Vectoriales

Bien, no se trata precisamente de un encuentro deportivo, pero no deja de ser un encuentro entre rivales con sobradas razones para vencer uno al otro, según los criterios de los seguidores de cada bando.

Ya vimos las ventajas y desventajas de las cartas *Raster*, veamos entonces en qué consisten las llamadas cartas *Vectoriales*.

En una carta *Vectorial* sus distintos elementos, tales como la línea de costa, profundidades, isobatas, señalización marítima, etc., son categorizados por sus atributos particulares (tipo, color, forma, ubicación, etc.) y caracterizados por vectores. Detengámonos en este aspecto; recordemos que en una carta Raster toda la imagen se almacena en memoria, punto por punto, incluyendo las zonas carentes de información. Pues bien, al vectorizar los elementos de una carta electrónica los datos son almacenados en forma de vectores y corresponden únicamente a aquéllos que contienen información útil, de modo que las áreas en blanco no son guardadas en memoria.

Y esto constituye la primera ventaja de una carta *Vectorial* sobre una carta *Raster*: *El significativo ahorro de memoria que representa*.

Por otra parte, en una carta *Vectorial* la información se dispone en forma de «capas». Para una mejor comprensión de esto imaginemos que tomamos varias hojas de plástico transparente y que en una de ellas están trazadas las isobatas mientras que en las otras se encuentran, respectivamente, las profundidades, las líneas de costa de determinado tipo, las señales marítimas, etc.

Superponiendo estas hojas unas sobre otras dispondríamos de la totalidad de la información contenida en ellas. Entonces pudiéramos suprimir la información correspondiente a una de las hojas -digamos las isobatas - retirando la hoja correspondiente.

En realidad las posibilidades son mucho mayores y complejas, pero en la práctica significan que en una carta Vectorial la información que se visualiza en pantalla es seleccionada a voluntad del navegante, quien sólo mantiene aquélla que le es de utilidad según sus necesidades y criterio. ¡Cuántas veces la densidad de información de la carta en una zona determinada ha «dificultado» el trabajo del navegante!.No obstante, es oportuno aclarar que existe un nivel básico de información de la carta que es inamovible y que es aquél que garantiza un nivel elemental de seguridad en la navegación.

Esta, que es otra ventaja de las cartas Vectoriales respecto a las cartas *Raster*, significa una nueva actitud al enfrentar el empleo de estas cartas, ¿por qué?, pues porque esta forma de presentación de la carta la hace distinta a la que se observa en las convencionales cartas de papel y sus versiones Raster.

La práctica indica que los navegantes más apegados a las «convencionalidades» del oficio necesitan más tiempo para sentirse «a gusto» trabajando sobre cartas Vectoriales que otros más proclives a la asimilación de nuevas tecnologías. Se trata de lograr la familiaridad requerida en el menor tiempo posible y eso depende, en lo fundamental, de la práctica y la disposición del navegante.

La principal ventaja de las cartas *Vectoriales* en cuanto a la disposición de la información en «capas» no sólo radica en la supresión voluntaria de determinada información a visualizar en pantalla... hay algo mucho más decisivo e importante... es el principio de lo que se ha dado en llamar *«Base de Datos Espacial Inteligente»*.

Tal como planteamos anteriormente, una carta *Raster* «no es inteligente» porque el sistema que permite su utilización no puede interactuar con ella de forma «inteligente» o «lógica»; pero cuando se emplea una carta *Vectorial*, el Sistema de Carta Electrónica es capaz de diferenciar unos elementos de otros y de relacionarse con ellos de forma activa.

Pongamos algunos ejemplos:

Su buque se acerca directamente a la costa durante una recalada a puerto. En la carta se observan algunas zonas de arrecifes situados entre la isobata de los 100m y la costa. Situemos entonces una alarma que se active cuando el trazador de la posición intersecte dicha isobata de seguridad, o bien cuando el sector de seguridad, que en forma de abanico explora en la dirección del rumbo, haga contacto con ella. Al escoger dicha isobata, ésta cambiará su color respecto a las otras. Si el sondador acústico está o no conectado al sistema ello no impedirá que la alarma se active al ser intersectada por el trazador de la posición o al entrar en contacto con el sector de seguridad porque... ¡el ECS «sabe» diferenciar la isobata escogida entre todas las demás!

Su buque se acerca a la costa y Ud. desea que se active una alarma cuando la distancia de seguridad sea de 5 millas. Pues bien, situamos la alarma según este parámetro, la que se activará a la distancia indicada ¡porque el ECS «sabrá» apreciarla aún si el Radar no estuviera conectado al sistema!

El calado aéreo de su buque es de 50m y Ud. se dispone a cruzar bajo un puente cuya distancia vertical desde su **parte inferio**r hasta el **nivel del agua** (*clearance*) es de 45m. Dado que este valor se encuentra entre los datos vectoriales de la carta y que el calado aéreo del buque, entre otros datos, ha sido introducido previamente en el sistema, la alarma se activará al entrar en contacto el sector de seguridad con el puente, alertando sobre un *peligro por obstrucción*.

Estos ejemplos bastan para apreciar el carácter interactivo de las cartas vectoriales con su Sistema. Obsérvese que en los ejemplos, a diferencia de las tareas que pueden ser resueltas con un ECS sobre una carta *Raster*, las tareas planteadas se basan en datos concretos de la carta.

De hecho hay un factor económico y de tiempo -a veces impuesto por el imperativo del mercado- que pone en desventaja a las cartas Vectoriales respecto a las cartas *Raster*: Su producción es costosa y requiere de mucho más tiempo de elaboración que su similar *Raster*. De modo que los productores se han lanzado en una carrera por dominar el mercado *Raster* y han comenzado la producción de cartas *Vectoriales* de las principales zonas de navegación comercial del mundo con vistas a un futuro mediato y a largo plazo.

Ya Ud. sabe qué es una carta *Raster* y en qué consiste una carta *Vectorial*, al menos en esencia, y si en el desempeño de sus funciones ha utilizado cartas náuticas de papel editadas por distintas entidades hidrográficas, sabe que existen diferencias en cuanto a simbología, colores, unidades de medición, etc., a pesar de los esfuerzos de la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) por normalizar la producción de tales cartas, aunque en los últimos años se han alcanzado logros muy alentadores en esta dirección. Podemos imaginar entonces el peligroso caos que resultaría si a tiempo no se establecen normas para la producción de las Cartas Náuticas Electrónicas y de los sistemas correspondientes, tarea que ha sido acometida de conjunto por la OHI y por la Organización Marítima Internacional (OMI).

3. ECS o ECDIS: ése es el asunto ¿Cuándo ECS y cuándo ECDIS?

En capítulos anteriores vimos en qué consiste un sistema de carta electrónica (ECS) y cómo las normas vigentes regulan su producción. Pero, como ya sabemos, un ECS no es reconocido oficialmente como sustituto de la carta de papel establecida en la Regla V-20 del SOLAS'74. Era necesario continuar la búsqueda por el mismo camino aprovechando la experiencia desarrollada en la creación de los ECS. Y así, paso a paso, se fue gestando una categoría superior de estos sistemas: **ECDIS**

Atendiendo a la necesidad de establecer normas rigurosas y obligatorias que garanticen el cumplimiento de determinados parámetros en la producción de ECDIS, la OMI y la OHI se han dedicado mancomunadamente a la creación de normas y mecanismos de control de esta actividad. Ya han sido aprobadas por la OMI las Normas para ECDIS, las que, al ser cumplidas, hacen que el sistema producido sea considerado como equivalente a las cartas de navegación actualizadas prescritas en SOLAS'74.

Por su parte la OHI ha elaborado normas técnicas y especificaciones relativas al formato que debe tener la base de datos digital -no olvide que se trata de cartas electrónicas-, así como qué debe contener ECDIS y qué debe mostrar en pantalla.

La publicación especial *S-52* de la OHI incluye las indicaciones para el contenido y visualización de ECDIS y abarca aspectos relativos al proceso de actualización, especificaciones sobre color y símbolos, así como un glosario de términos relacionados con ECDIS.

En otra publicación especial de la OHI, *S-57*, aparece la Norma para la Transferencia de la Base de datos Hidrográfica Digital, ahora en su versión 3, ya que aunque la versión anterior fue adecuada para que pudiera describir todos los elementos de una carta, no era suficiente para dar un soporte completo a ECDIS, por lo que en esta nueva versión se han incorporado nuevas características al catálogo de objetos que pueden ser visualizados en una carta náutica electrónica y la estructura correspondiente para su actualización. La versión final de estas normas se espera que se mantenga de forma estable durante cuatro años.

A solicitud de la OMI la *Comisión Electrotécnica Internacional* (IEC) se ha dedicado a identificar y describir las especificaciones relativas a las pruebas y controles a que debe ser sometido el equipamiento de ECDIS para garantizar que cumpla lo normado por la OMI y por la OHI. Estas normas IEC serán la base para determinar si un ECDIS es capaz de obtener la aprobación o no de la OMI.

Si repasamos todo lo apuntado, veremos que la actividad de producción de cartas náuticas electrónicas y de ECDIS está siendo rigurosamente controlada por ambas organizaciones internacionales, lo que da la garantía y seguridad de tales sistemas una vez aprobados.

Volvamos a la pregunta inicial: *¿Cuándo ECS y Cuándo ECDIS?*, pues bien, la respuesta es la siguiente: si un sistema de carta electrónica cumple a cabalidad las normas OMI/OHI, se trata de un ECDIS con todas las de la ley, o, en caso contrario, sólo es considerado como un ECS cuya misión es la de servir como una valiosa ayuda a la navegación, pero que no sustituye a la carta de papel, siendo por tanto obligatorio su uso como se establece en SOLAS´74.

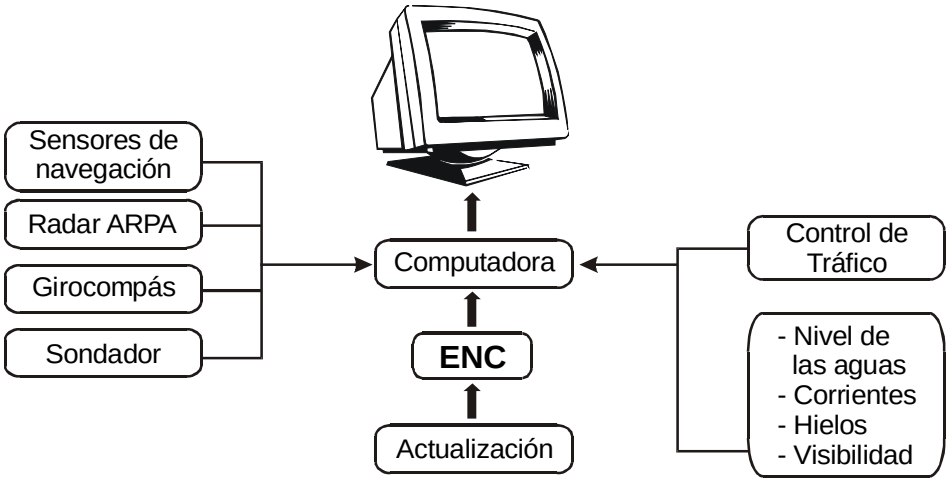


Fig. 303 Componentes del ECDIS

4. Componentes de ECDIS

Pero, concretamente, ¿cómo opera ECDIS?

Observe detenidamente la figura 303. Por la izquierda verá cuáles son los principales sensores que pueden ser acoplados al sistema -aunque puede haber otros- mientras que por la derecha aparecen diversas entradas de información opcionales entre las que se encuentra la comunicación interactiva con los Servicios de Control de Tráfico de la zona de navegación.

Hagamos un ejercicio de imaginación: el puente de nuestro buque cuenta con un sistema ECDIS capaz de recibir señales DGPS y que, además, puede recibir indicaciones de los siguientes equipos: sondador, girocompás, Radar ARPA *(Automated Radar Piloting Aid*) y anemómetro.

Adicionalmente puede recibir y ofrecer información inmediata sobre el estado del tiempo en la zona de navegación así como sobre las mareas y las corrientes de marea, datos útiles del derrotero, etc. Nuestro sistema ECDIS dispone, entre otras muchas, de las cartas 1:5000 del puerto, la 1:10 000 del puerto y sus accesos y la 1:150 000 para la navegación costera.

Para la salida del puerto utilizaremos la pantalla dividida verticalmente al medio para visualizar de forma simultánea la carta 1:5000 en una de esas mitades y la 1:10 000 en la otra.

En ambas mitades aparecerá la posición del buque en cada momento, representada por una imagen del buque a escala (ver el aspecto de esta opción en la Fig.302). El error probable en las posiciones no será superior a los 5m, dada la utilización de DGPS.

En las ventanas de información aparecerán las coordenadas geográficas de la posición, la hora, posición geográfica del cursor en cada momento (se desplaza a voluntad mediante el *«mouse»*), el rumbo y velocidad efectivos, la dirección y velocidad del viento reinante (por el anemómetro, la profundidad (por el sondador) y el rumbo aguja giro (por el girocompás).

Si existiera un nutrido tráfico de buques podemos superponer la imagen del Radar ARPA sobre la carta electrónica, de modo que pueda emplearse simultáneamente como ayuda a la navegación y en la ejecución de maniobras para evitar abordajes.

Una vez realizada la salida del puerto se despliega la carta 1:10 000 a toda pantalla, en la que veremos la derrota seguida desde el interior del puerto hasta ese momento. Constantemente ECDIS ha estado grabando toda la información en un dispositivo que no permite su alteración posterior, lo que garantiza la reconstrucción de la derrota seguida.

Durante la salida del puerto el Servicio de Control de Tráfico ha estado informando en la pantalla de ECDIS las posiciones de los buques cercanos, datos que recibe a través de «transponders» instalados en cada uno de ellos y que de forma automática transmiten su identificación, hora, posición rumbo y velocidad al *Centro del Servicio de Control de Tráfico* (VTS) del área,

Dado que ECDIS emplea cartas vectoriales podemos «marcar» la isobata de los 100m y situar una alarma que se activará si es cruzada por nuestro buque en algún momento (de forma ndependiente a la alarma del sondador). También «marcamos» una zona de arrecifes coralinos exteriores y situamos una alarma si la distancia mínima a ella es menor de 3 millas. La alarma se activará a esa distancia aún si el Radar estuviera desconectado: ¡ECDIS «sabe» cuál es la distancia a un objeto marcado en la carta, tanto si está en superficie como sumergido!

Sobrepasadas las proximidades del puerto de salida se instala la carta 1:150 000 para realizar la navegación costera.

Próximo nuestro buque al puerto de destino se instalará progresivamente las cartas de escalas superiores hasta completar la entrada al mismo.

Supongamos entonces que se ha restringido el tráfico a causa de una brusca reducción de la visibilidad por una densa niebla, ¡aún en tales condiciones podremos entrar a puerto e incluso atracar mediante ECDIS si la escala de la carta ofrece el detalle suficiente! Y ésa es precisamente la nueva exigencia que ECDIS plantea a las entidades hidrográficas: realizar sondeos mucho más detallados y precisos que nunca antes, así como producir cartas náuticas electrónicas a escalas de 1:1000 o superiores como soporte a un sistema que ofrece una alta precisión de acuerdo a los sensores de navegación que emplea.*¡Todo eso es ECDIS!*

5. Exigencias de ECDIS a la Hidrografía

Los métodos convencionales utilizados en los sondeos y levantamientos hidrográficos resultan insuficientes para el despliegue total de las posibilidades de ECDIS.

Si hace unos años no tenía mucha importancia la densidad del dato de profundidad en una carta de puerto, hoy en día, empleando ECDIS, necesariamente debe tener una profusa distribución de datos batimétricos porque el sistema permite la realización de maniobras portuarias con una precisión de 3 a 5m gracias al sistema de posicionamiento DGPS.

Tal como ya dijimos en otra parte de este capítulo, ahora nos interesa la profundidad que hay aquí y unos

pocos metros más allá en direcciones determinadas. De ahí que las oficinas hidrográficas mundiales se hayan visto súbitamente ante el reto de realizar cartas de grandes escalas nunca antes producidas, para lo cual los datos hidrográficos existentes son insuficientes y deben ser renovados mediante nuevos levantamientos, ¿con qué técnicas? Pues con sondas de haces múltiples, con la ayuda de la aviación, de satélites artificiales y sofisticados equipos de teledetección. Y el procesamiento automatizado de toda esta información requiere de un soporte técnico y económico que no todas las naciones pueden asumir.

Se aspira a que ECDIS sea operativo en cualquier lugar del mundo, y eso requiere de una base mundial de datos hidrográficos con un ordenamiento muy bien estructurado para que la información fluya entre las oficinas hidrográficas y llegue a los buques a tiempo y con el nivel de actualización requerido. En la Fig.304 puede verse la organización de este sistema.

La solución ya ha sido emprendida: crear Centros Regionales de Cartas Electrónicas que se encarguen de recibir, procesar y distribuir todos los datos que puedan afectar sus cartas. No es difícil imaginar el enorme volumen de información que debe ser procesado en cada uno de estos centros para garantizar que las cartas náuticas electrónicas estén actualizadas con una confiabilidad y celeridad que jamás había sido soñada por navegante alguno. Y todo navegante sabe muy bien lo tedioso que resulta la actualización manual de las cartas náuticas de papel.

6. Sistemas de Actualización de las Cartas Electrónicas

La actualización de una carta electrónica puede realizarse adquiriendo una nueva edición de ésta o introduciéndole los cambios que la han afectado desde su edición anterior. En dependencia del productor de la carta electrónica puede seguirse uno u otro camino. En el primero de ellos usted obtiene una nueva versión de la carta mediante un disco compacto (CD), por un precio menor al de la edición anterior a través de un convenio. En el segundo la actualización se realiza por medio de un CD que contiene las correcciones a realizar. En el segundo método sólo se actualizan las celdas en las que hay cambios, lo que representa una considerable economía de espacio en las bases de datos de las oficinas hidrográficas.

El Reino Unido brinda la actualización de sus cartas Raster a través de un sistema llamado ARCS (*Admiralty Raster Chart Service*) por medio de un CD que contiene las actualizaciones que afectan determinadas cartas, con fecha de cierre en la semana anterior. Este CD se introduce en la computadora, en la que previamente se han cargado las cartas a actualizar, y las correcciones son hechas de forma automática por sustitución de celdas. Otro método consiste en insertar las correcciones mediante el teclado a través de una opción del propio sistema de carta electrónica (Fig. 304).

Tanto la Organización Marítima Internacional (OMI) como la Organización Hidrográfica Internacional (OHI) han establecido las normas para la actualización de las cartas electrónicas.

Se han realizado algunas pruebas de actualización de cartas electrónicas, con resultados positivos, vía INMARSAT-C (*) mediante teléfonos celulares ubicados en tierra.

En el proyecto de pruebas de ECDIS en el Mar Báltico y en el del Norte (*Proyecto BANET*) se realizaron pruebas en las que la información para la actualización fue suministrada por los servicios hidrográficos de dos países conectados a través de un modem al *Centro de Distribución de Datos BANET* situado en Hamburgo. La actualización se realizó por el método de celdas, por lo que el primer paso en el proceso de actualización consistió en crear nuevas versiones de cada celda en las que se requerían cambios

por medio de un software especial instalado en las entidades que producían la actualización, lo que permitió comparar el archivo de celdas existente y el de la nueva versión de éstas al concluir la actualización, de manera que los destinados a la actualización sólo incluyen aquellas celdas que han sufrido cambios, por lo que son pequeños.

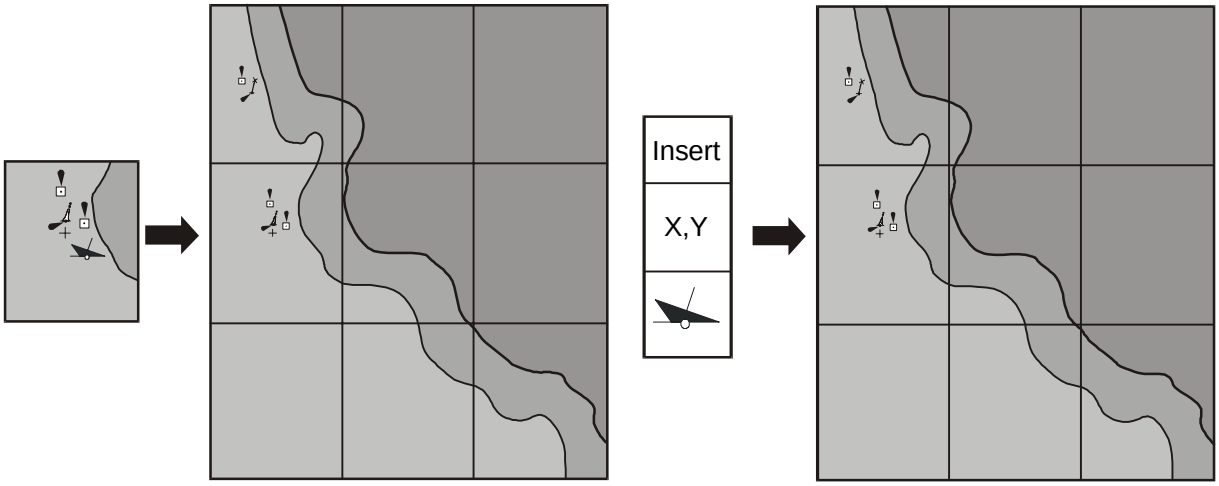


Fig. 304 Actualización de la ENC por sustitución de celdas o por inserción

Se ha previsto que la entidad productora de la actualización compruebe los datos mediante el mismo software empleado por el ECDIS de a bordo, antes de enviarlo al *Módulo de Información BANET*, cuya función es la de servir de enlace entre el productor de la actualización y el usuario vía módem.

¿Cómo funciona todo el sistema?: Usted pulsa una tecla determinada en su equipo ECDIS y éste establece comunicación automáticamente con el módulo de información situado en tierra y allí busca toda nueva información que afecte a su base de datos y la actualiza. Las actualizaciones se almacenan de forma independiente a la ENC e incluyen la fecha, hora y fuente de origen. Todo el proceso resulta invisible para usted, ya que el funcionamiento de ECDIS no se altera en modo alguno, aunque si usted lo desea puede obtener los datos de las actualizaciones realizadas destacándose en la ENC los objetos modificados. El sistema permite el trabajo independiente de la entidad emisora de actualizaciones respecto a su ECDIS, ya que usted puede actualizar su ENC en cualquier momento seleccionando la zona de su interés. Otro esfuerzo europeo reciente es conocido como *Proyecto Echo* y se basa en principios análogos a los ya expuestos.

***INMARSAT** - Organización establecida por la Convención de la Organización Interncional de Telecomunicaciones Marítimas por Satélites (**IN**ternational **M**ovile **SAT**ellite Organization) adoptado el 3 de septiembre de 1976.

Como hemos visto, la actualización de ECDIS resulta muy sencilla en el buque, pero la infraestructura informativa y de equipamiento que supone requiere de una estrecha cooperación internacional regida por la OMI y la OHI.

El sistema puede llevar a cabo las tareas inherentes a un ECS, entre otras:

- Visualizar en tiempo real la posición del buque obtenida de un receptor GPS con posibilidades de recibir señales DGPS.

7. Un reto a enfrentar

Es indudable que la introducción de las Cartas Náuticas Electrónicas significa un reto para las compañías Navieras Nacionales. La primera fase de ese desafío al futuro pasa obligatoriamente por la del conocimiento, saber en qué consisten estos sistemas y sus posibilidades en lo concerniente al aumento de la seguridad en la navegación y en la correspondiente protección del medio ambiente al reducir la posibilidad de los accidentes marítimos.

El equipamiento ECDIS no resulta caro si se le compara con los beneficios que aporta, tanto en términos de seguridad en la navegación, como en eficiencia en la explotación del buque, al poder operar en condiciones bajo las cuales anteriormente debía mantenerse en espera de la mejoría de las condiciones del tiempo para realizar la entrada o salida del puerto.

CAPÍTULO VIII

GENERALIDADES DE LA EXACTITUD DE LA NAVEGACIÓN DEL BUQUE.

Capítulo VIII

GENERALIDADES DE LA EXACTITUD DE LA NAVEGACIÓN DEL BUQUE.

ERRORES CASUALES Y VALORACIÓN DE LA EXACTITUD DE LAS MEDICIONES Y CÁLCULOS.

8.1 Tipos de observaciones (mediciones) en la práctica de navegación.

En la consideración de la derrota del buque, se realizan una serie de observaciones, mediciones, cálculos y construcciones gráficas, cuyo objetivo es la obtención de las coordenadas de la posición del buque en cualquier momento.

Todas las mediciones (observaciones) se dividen en los siguientes tipos:

- Directas o indirectas en dependencia del método de observación.

- Necesarias o excedentes en dependencia de la cantidad de mediciones del mismo parámetro.

- Mediciones de igual y desigual exactitud en dependencia de la calidad de los equipos e instrumentos con la ayuda de los cuales se realizaron las mediciones, de las condiciones de las mediciones así como la experiencia, preparación y entrenamiento del observador.

En las observaciones directas el observador directamente determina el parámetro de navegación (por ejemplo, marcación, ángulo, distancia, etc.). En las mediciones indirectas, el parámetro buscado no se mide directamente; se miden otras magnitudes relacionadas a éste y por ella se calcula el parámetro buscado. Por ejemplo, inicialmente se mide el ángulo vertical entre la base y la cúpula del objeto de referencia y luego de acuerdo a esta magnitud, se calcula la distancia hasta el objeto, al medir dos marcaciones entre dos puntos notables se puede calcular el ángulo horizontal entre ellos.

Las mediciones cuya cantidad son las mínimas posibles y que permiten determinar la posición buscada, se llaman **necesarias.**

Las observaciones realizadas por encima de lo necesario se llaman **excedentes**. Por ejemplo para la determinación de la posición del buque son necesarias dos marcaciones o dos distancias, la tercera distancia o la tercera marcación serán excedentes.

Las mediciones excedentes no son innecesarias, sino que son indispensables para elevar la exactitud en los resultados de las mediciones y para la detección de los fallos y grandes errores en las mediciones y cálculos. Por ejemplo cuando se determina la posición del buque por dos marcaciones, es imposible determinar los errores en la medición de las marcaciones y en la identificación de los objetos de referencia, ya que dos marcaciones en cualquier caso, se cortan sólo en un punto. Con la medición de la tercera marcación, los errores pueden ser detectados rápidamente, puesto que en este caso tres marcaciones no se cortan en un punto, sino que forman un triángulo de error que señala la presencia de errores en las mediciones.

Si las mediciones se realizan con el mismo equipo e instrumento en igualdad de condiciones y por un mismo observador, entonces éstas serán de igual exactitud.

Las mediciones con desigual exactitud son aquellas que se realizan con equipos e instrumentos de

diferentes exactitudes, o en diferentes condiciones, o por métodos diferentes, o por observaciones de diferente calificación. Así por ejemplo, las distancias medidas por el radar y por el telémetro, son de desigual exactitud porque las mismas no poseen la misma precisión.

8.2. Causas que originan los errores. Clasificación de los errores.

Las principales causas de los errores en las mediciones son:

- Los errores de los equipos e instrumentos con cuya ayuda se realizan las mediciones;

- Las imprecisiones del método en las mediciones;

- Influencia del medio circundante, o las condiciones en que fueron realizadas las mediciones (visibilidad, viento, oleaje, etc.)

- Las posibilidades limitadas de los órganos sensoriales y de persepción del observador.

En la realización de cualquier medición para determinar la posición del buque es necesario tratar de obtener los resultados más exactos posible. Para ello es necesario:

- Realizar una comprobación minuciosa de los equipos e instrumentos antes de efectuar las observaciones; utilizar aquellos equipos e instrumentos que garanticen una mayor exactitud en las mediciones.

- De acuerdo a las posibilidades realizar no una, sino varias mediciones de la misma magnitud, y para la solución sucesiva de la tarea dada, utilizar el valor medio, ya que éste es más exacto que el de un sólo valor de la magnitud medida.

- Adquirir el hábito necesario en la realización de las mediciones con distintos equipos e instrumentos mediante el entrenamiento sistemático en distintas condiciones. Mantener los hábitos adquiridos al nivel necesario.

A pesar del cumplimiento estricto de las condiciones señaladas los resultados de las mediciones inevitablemente, contendrán errores. Observando determinada metodología no se eliminan las influencias de unas u otras causas en la exactitud de las mediciones, sino que solo se pueden disminuir.

Los errores contenidos en cualquier medición pueden actuar de diferente forma. Algunos distorsionan los resultados de las mediciones de acuerdo a determinada ley en un mismo sentido y magnitud, otros errores en cada medición realizada poseen diferentes magnitudes y signos.

De acuerdo a lo antes expuesto todos los errores en las mediciones se dividen en sistemáticos y casuales.

Se llaman **errores sistemáticos** a aquellos errores que poseen igual valor y signos en varias mediciones de una misma magnitud que se realizaron sucesivamente y en iguales condiciones, o a aquellos errores que varían regularmente en función de la variación de las condiciones de observación.

Errores casuales se le denominan a los errores pequeños que poseen diferentes valores y signo para varias mediciones realizadas sucesivamente, con un mismo equipo y en iguales condiciones. Los errores casuales aparecen en cualquier medición. Su surgimiento está relacionado con la imperfección de los equipos de medición e instrumentos, por la influencia de las condiciones externas de observación, la

imperfección de los órganos sensitivos y percepción del observador y en valor absoluto otros factores.

Los errores que superan en valor absoluto los límites permisibles de exactitud para un método determinado de medición se llaman **equivocaciones**. Estos surgen como resultado del descuido, distracción y negligencia del observador. Las equivocaciones se pueden detectar solo por mediciones repetidas.

8.3. Propiedades de los errores casuales.

Sobre la base del análisis de múltiples mediciones y las experiencias prácticas realizadas se han deducido las siguientes propiedades comunes de los errores casuales:

1. En una serie considerablemente grande de mediciones; con más frecuencia se encuentran errores pequeños que errores grandes, o lo que es igual, la probabilidad de aparición de grandes errores es menor que la probabilidad de aparición de errores pequeños.

2. La probabilidad de aparición de determinado error casual positivo ($+\Delta$) es igual a la probabilidad de aparición de un error igual pero con signo negativo ($-\Delta$), es decir, los errores iguales en magnitud pero de signo contrario tienen la misma probabilidad de aparición.

3. En determinadas condiciones de observación los errores, en valor absoluto, no pueden superar determinado límite. Los errores que superan este límite deben considerarse como equivocaciones y las observaciones con tales errores deben ser despreciadas en los cálculos.

Las propiedades enumeradas de los errores casuales surgen con mayor fuerza, cuanto mayor sea el número de observaciones contenidas en una serie.

De la segunda propiedad de los errores casuales se desprenden dos consecuencias fundamentales:

Consecuencia 1. Ante una cantidad limitada de mediciones, el valor aritmético medio de todos los errores casuales tienden a cero.

Supongamos que realizamos n mediciones de determinada magnitud.

Cada medición contendrá un error casual:

$$\Delta = x - a \qquad (219)$$

donde a - valor verdadero de la magnitud medida,
x - resultado de la medición.

Simbolicemos todos los errores casuales que surgieron durante las mediciones por Δ_1, Δ_2, Δ_3..., Δ_n. Entonces el valor aritmético medio de toda la serie de medición será determinado de la expresión:

$$\frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + ... + \Delta_n}{n} = \frac{\sum \Delta_i}{n} \qquad (220)$$

De acuerdo a la segunda propiedad de los errores casuales en cualquier serie de errores, para un error Δ con signo “+” existe un error Δ con signo “-“ de igual magnitud. Cuanto mayor sean las mediciones de esta magnitud, mayor será la justificación de esta correspondencia.

Por consiguiente, si el número de mediciones es infinitamente grande, el error aritmético medio de todas las mediciones debe tender a cero, es decir

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\sum \Delta_i}{n} = 0 \qquad (221)$$

Consecuencia 2. El valor aritmético medio de la magnitud medida se aproxima al valor verdadero a medida que se aumenta la cantidad de mediciones.

Simbolicemos los resultados de las mediciones de determinada magnitud, cuyo valor verdadero es igual a <u>a</u>, por x_1, x_2, x_3, ..., x_n. Entonces cuando las mediciones sean <u>n</u> errores casuales.

$$\begin{aligned} &\Delta_1 = x_1 - a; \\ &\Delta_2 = x_2 - a; \\ &\Delta_3 = x_3 - a; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ &\Delta_n = x_n - a. \end{aligned} \qquad (222)$$

Sumemos la igualdad (222) y la suma dividámosla entre la cantidad de mediciones n:

$$\frac{\sum \Delta}{n} = \frac{\sum x}{n} - a. \qquad (223)$$

En la igualdad (223) $\frac{\sum x}{n}$ es el valor aritmético medio de la magnitud medida, el cual lo representaremos por a_0.

Entonces obtenemos (224)

Anteriormente se planteó que cuando $n \to \infty \frac{\sum \Delta}{n} = 0$. Por consiguiente, $n \to \infty$, cuando la igualdad $a_0 - a = 0$, es decir el valor aritmético medio de la magnitud medida se aproxima a su valor real.

En la práctica de navegación los valores reales de las magnitudes medidas prácticamente se conocen. Por eso en un número definido de mediciones n se toma como valor real el valor aritmético medio de la magnitud medida:

$$a_0 = \frac{\sum x}{n} \qquad (225)$$

Cuanto mayor sea el número de mediciones n, tanto menos se diferenciará el valor aritmético medio del valor real de las mediciones.

8.4 Conceptos sobre las leyes de distribución de los errores casuales.

La posibilidad de surgimiento de cualquier magnitud casual o acontecimiento casual se llama **probabilidad**.
En la teoría de las probabilidades se utilizan los conceptos de probabilidades matemáticas y estáticas.

La probabilidad matemática P de surgimiento de una magnitud casual es igual a la relación entre número n de casos que posibilitan su surgimiento y el número (N) de todos los casos con igual probabilidad:

$$P = \frac{n}{N} \qquad (226)$$

La probabilidad estadística P' se obtiene en la práctica. Ella es igual a la relación entre el número n' real de aparición de la magnitud casual y el número N' de los experimentos realizados.

$$P' = \frac{n'}{N'} \qquad (227)$$

Cuando el número de experimentos crece infinitamente, la probabilidad estadística se aproxima a la matemática.

La probabilidad se expresa por un número positivo de 0 a 1.

Si la probabilidad es igual a la unidad, el surgimiento de la magnitud casual es auténtica, o sea ella irremediablemente debe surgir, si la probabilidad es igual a cero, entonces el surgimiento de la magnitud dada es imposible.

Los errores casuales se someten a determinadas leyes matemáticas, que se llaman **leyes de la distribución de los errores casuales**.

Las leyes de la distribución representan la expresión matemática de las propiedades de los errores casuales y se utilizan para el cálculo y comparación de las probabilidades de su surgimiento.

Entre la magnitud del error casual y la probabilidad de su surgimiento existe una dependencia total. Sobre la base de la primera propiedad de los errores casuales se puede afirmar que con el aumento del error Δ la probabilidad de su surgimiento disminuye y viceversa: cuando menor sea la magnitud del error mayor será la probabilidad de su aparición.

Esto se puede expresar de otra forma: cuanto menor sea en magnitud el error, mayor será el número de mediciones que lo contienen en la serie dada de mediciones, y, viceversa, cuando mayor en magnitud sea el error casual, menor será el número contenido en la serie de mediciones que lo contienen.
Además si distribuimos los errores en límites relativamente pequeños de $\Delta_i - \frac{d\Delta}{2}$ hasta $\Delta_i + \frac{d\Delta}{2}$ y y considerar que todos los errores en este intervalo en su valor numérico son iguales a Δ_i, entonces la cantidad n de estos errores en el intervalo $d\Delta$ será mayor, cuanto mayor sea el propio intervalo (Fig. 305).

Por consiguiente la cantidad de errores en el intervalo $d\Delta$ depende del valor numérico de los errores Δ_i y de la magnitud del intervalo $d\Delta$, es decir:

$$n_i = \varphi(\Delta_i)d\Delta \qquad (228)$$

Simbolicemos el número de todos los errores casuales posibles en la serie de mediciones dada por N.

Dividiendo entre N la igualdad (228) obtenemos:

$$\frac{n_i}{N} = \frac{\varphi(\Delta_i)d\Delta}{N}. \qquad (229)$$

Comparando las fórmulas 226 y 229 se deduce que Δ_i es la probabilidad de surgimiento del error casual $d\Delta$, es decir,

$$dP(\Delta_i) = \frac{n_i}{N} = \frac{\varphi(\Delta_i)d\Delta}{N}, \qquad (230)$$

donde N es una constante para la serie de mediciones dada.

Simbolicemos $\frac{\varphi(\Delta_i)}{N} = f(\Delta_i)$, entonces obtenemos:

$$dP(\Delta_i) = f(\Delta_i)d\Delta. \qquad (231)$$

De esta forma, para todos los casos, la probabilidad de surgimiento del error es una función de su magnitud y es proporcional al intervalo $d\Delta$.

Ya que el error casual puede tomar infinitos valores, es decir que es una magnitud variable, entonces la probabilidad de surgimiento de determinado valor del error, dado de antemano es igual a cero.

Por eso en términos generales se puede hablar solo sobre la probabilidad de surgimiento del error en determinados límites establecidos, por ejemplo sobre la probabilidad de aparición del error en los límites de α a β, de 0 a Δ_i, de $-\Delta$ a $+\Delta$.

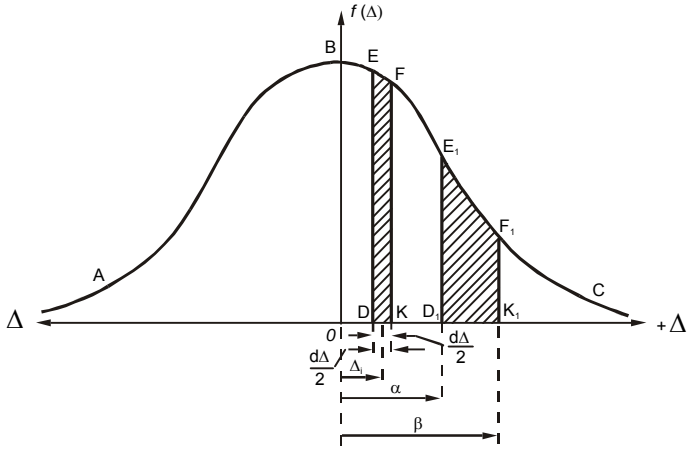


Fig. 305. Grafico de distribución de los errores casuales

En este caso la probabilidad de que el error se encuentre en los límites de α a β, se expresa por el integral

$$P = \int_{\alpha}^{\beta} f(\Delta)d\Delta \qquad (232)$$

La ley de distribución de los errores casuales se puede representar por el gráfico de la figura 305.

La curva ABC se llama **curva de distribución de los errores**. En el gráfico se observa que la probabilidad de surgimiento del error Δ_i en el intervalo $d\Delta$ es igual al área DEFK y la probabilidad de surgimiento del error en los límites de α a β es igual al área $D_1E_1F_1K_1$.

Debido a que las ramas de la curva de forma asintótica se aproximan al eje de las abscisas, la probabilidad de surgimiento del error casual, que se encuentra en los límites de - ∞ hasta + ∞, será igual a la unidad:

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} f(\Delta)d\Delta = 1. \qquad (233)$$

Existe infinidad de leyes de distribución de los errores casuales, sin embargo su esencia se encierra en la expresión de la dependencia entre los límites de los errores y su probabilidad. Las leyes que más propagación obtuvo para los errores casuales son la ley de igual probabilidad y la ley de la distribución normal.

1. Ley de la igual probabilidad.

La ley de la igual probabilidad se manifiesta en aquellos casos, cuando el surgimiento de determinados valores de los errores casuales tienen igual probabilidad. Por ejemplo, después de anotar la lectura de la marcación 33,0°, se puede considerar que con igual probabilidad la marcación pudo tomar cualquier valor en el entorno de 32,5° a 33,5°, bajo la condición que las lecturas se aproximan hasta un grado entero.

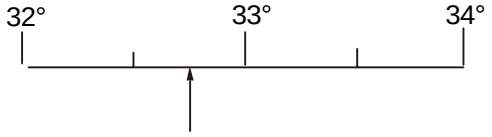


Fig. 306. Ilustración de la ley de igual probabilidad.

Por consiguiente, en nuestro ejemplo todos los errores que puede contener la marcación, se encuentran en los límites de - 0,5° hasta + 0,5°.

La aparición de cualquier error en estos límites, tienen igual probabilidad y fuera de estos límites es igual a cero.

Supongamos que Δ_1 y Δ_2 son los límites, dentro de los cuales cualquier valor Δ tiene igual probabilidad. La probabilidad del error casual Δ en estos límites es igual a:

$$P(\Delta) = \int_{\Delta 1}^{\Delta 2} f(\Delta)d\Delta. \qquad (234)$$

Pero debido a que cualquier valor de Δ en estos límites tiene igual probabilidad, la magnitud f (Δ), que determina en este caso la ley de distribución de la probabilidad, debe ser constante:

$$P(\Delta) = \int_{\Delta 1}^{\Delta 2} Cd\Delta. \qquad (235)$$

Si Δ_1 y Δ_2 representan los valores límites del error casual Δ, entonces todos sus posibles valores se distribuyen en estos límites. Por consiguiente, la probabilidad de que se produzca el error será igual a la unidad: P (Δ) = 1.

$$\int_{\Delta 1}^{\Delta 2} Cd\Delta = 1;$$

Entonces (236)

$$f(\Delta) = C = \frac{1}{\Delta_2 - \Delta_1}$$

La fórmula $f(\Delta) = \frac{1}{\Delta_2 - \Delta_1}$ representa la expresión matemática de la ley de la igual probabilidad.

Mayor interés presenta aquel caso, cuando los límites Δ_1 y Δ_2 son iguales entre sí en valor absoluto y de signos contrarios, o sea Δ_1 = - l, Δ_2 = + l

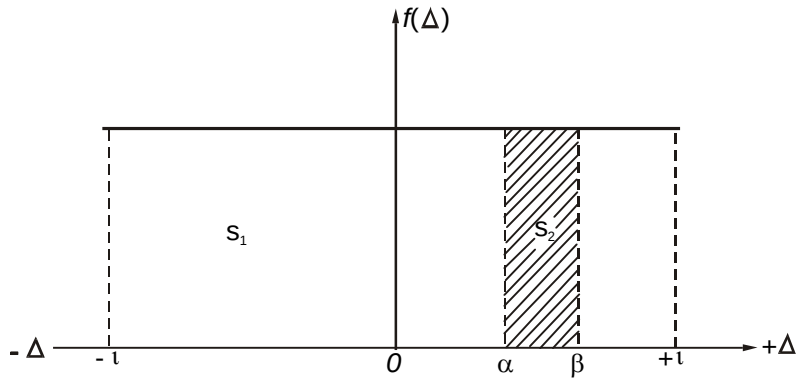


Fig. 307. Grafico de la ley de igual probabilidad.

Entonces la expresión matemática de la ley de igual probabilidad será:

$$P(\Delta) = \int_{-1}^{+1} f(\Delta) d\Delta = 1; \qquad (237)$$

$$f(\Delta) = \frac{1}{2l}. \qquad (238)$$

En este caso la probabilidad del error casual en los límites de α a β se determina por la fórmula:

$$P = \frac{1}{2l} \int_{\alpha}^{\beta} d\Delta = \frac{\beta - \alpha}{2l}. \qquad (239)$$

En el gráfico de la ley de igual probabilidad (Fig. 307) el área S_1 es la probabilidad de que el error casual Δ se encuentra en los límites de - l a + l y es igual a 1. El área S_2 es la probabilidad de que el error Δ se encuentre en los límites de α a β.

La ley de igual probabilidad se manifiesta en los errores de lectura por las escalas de los equipos cuando estos se aproximan a valores enteros de las divisiones y en los errores de aproximación al tomar los valores tabulares de diferentes magnitudes.

2. Ley de la distribución normal.

La ley de la distribución normal de los errores casuales (ley de Gauss) sirve como base a toda la teoría de los errores casuales y a la teoría de la exactitud de las mediciones. Esta ley fue obtenida experimentalmente a fines del siglo XVIII y fue matemáticamente formulado por Gauss.

La esencia de la ley de la distribución normal se encierra en lo siguiente:

Supongamos que Δ_i es el valor numérico de los errores verdaderos que se encuentran en el intervalo $d\Delta$. La probabilidad del error igual a Δ_i se determina de la expresión.

$$dP(\Delta_i) = f(\Delta_i) d\Delta \qquad (240)$$

La función f (Δ_i) posee las siguientes cualidades:

1. Esta función es par, es decir f ($+\Delta_i$) = f ($-\Delta_i$), ya que de acuerdo a la segunda propiedad de los errores casuales el número de los errores positivos es igual al número de los errores negativos.

2. La función f(Δ_i) es una función decreciente, es decir, ante el aumento de Δ_i la función f (Δ_i) disminuye, ya que de acuerdo a la primera propiedad de los errores casuales los errores numéricamente grandes son menos probables que los errores numéricamente pequeños.
Después de la transformación compleja de la fórmula 240 la forma de la función f (Δ) se determina de la siguiente expresión:

$$f(\Delta)= \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2\Delta^2}. \qquad (241)$$

Por lo tanto la probabilidad de surgimiento del error Δ en determinados límites, de acuerdo a la ley de la distribución normal, se determina por las siguientes fórmulas:

$$dP_{(\Delta)}=\frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2\Delta^2} d\Delta. \qquad (242)$$

$$P_{(\Delta)}=\frac{h}{\sqrt{\pi}} \int_{-\Delta}^{+\Delta} e^{-h^2\Delta^2} d\Delta, \qquad (243)$$

o en términos generales

$$P_{(\alpha<\Delta<\beta)}=\int_{\alpha}^{\beta} f(\Delta_i)d\Delta= \frac{h}{\sqrt{\pi}}\int_{\alpha}^{\beta} e^{-h^2\Delta^2} d\Delta. \qquad (244)$$

Las fórmulas 241 y 243 son las expresiones matemáticas de la ley de la distribución normal de los errores casuales o la ley de Gauss.

Gráficamente la ley de la distribución normal de los errores casuales se representa por una curva simétrica con relación al eje 0Y, que de forma asintótica se acerca a ambas direcciones del eje de las abscisas (Fig. 308). Esta curva se denomina de diferentes formas: **curva normal de las probabilidades, campana de Euler, curva de los errores, etc.**

El análisis de la ecuación 241 muestra que al variar la magnitud del error Δ la función f (Δ) varía constantemente.

Por consiguiente la probabilidad de surgimiento de errores en los límites Δ_1 y Δ_2 será variable, ya que f(Δ_i) $\neq$ f(Δ_2). Esto se ve claramente en la curva de distribución de errores. Así la probabilidad de surgimiento del error Δ_1 en el intervalo $d\Delta_1$será numéricamente igual al área S_1 y la probabilidad de surgimiento del error (Δ_2) en el intervalo $d\Delta_2$ será igual al área S_2, pero $S_1 \neq S_2$ aún cuando $d\Delta_1=d\Delta_2$

En determinado intervalo infinitamente pequeño de Δ hasta $\Delta+d\Delta$ la probabilidad de aparición de errores, numéricamente iguales a Δ , será una magnitud constante y proporcional al valor de la función f (Δ) .

Analizando la curva de errores se puede llegar a las siguientes conclusiones:

1.Los errores positivos y negativos poseen la misma probabilidad. Esta conclusión se demuestra porque la curva es simétrica con relación al eje de las ordenadas y, por consiguiente al área, limitada por la curva, es dividida por el eje de las ordenadas en dos partes iguales.

2.Los errores positivos y negativos de una misma magnitud absoluta poseen la misma probabilidad. Esta deducción es, también consecuencia de la simetría de la curva.

3.Los errores pequeños en valor absoluto son más probables que los errores grandes. Es evidente que cuando $d\Delta_1 = d\Delta_2$ las áreas S_1 y S_2, que expresan los valores numéricos de las probabilidades de los errores Δ_1 y Δ_2, no son iguales, por lo que $S_1 > S_2$.

4. A medida que crece el valor de los errores casuales su probabilidad disminuye y tiende a cero. Esta deducción se debe a que la curva se aproxima asintóticamente al eje de las abscisas.

5. Teóricamente no se excluye la probabilidad de aparición de errores infinitamente grandes. Esto se deduce al plantearse que la probabilidad tiende a cero cuando $\Delta = \infty$.
La magnitud h incluida en la ecuación 241 se llama medida de exactitud. Esta magnitud es constante para la serie de mediciones dada.

Tomando en la ecuación 241 el valor $\Delta = 0$, obtenemos la altura de la campana de Euler:

$$f(0) = \frac{h}{\sqrt{\pi}}$$

Cuanto mayor sea la magnitud h, mayor será la pendiente de la curva de los errores, y esto significa que en la serie dada las mediciones poseen menores errores, es decir están realizadas por métodos más exactos.

Por consiguiente la medida de exactitud h caracteriza el método de medición.

A la ley de la distribución normal de los errores casuales se someten aquellos errores casuales, que se determinan por un número grande de factores, donde ninguno de éstos es predominante. Tales errores casuales se encuentran con más frecuencia en la práctica de navegación.

8.5. Error cuadrático medio de una medición aislada.

En la práctica de navegación se utiliza ampliamente el error cuadrático medio ± (m) para la caracterización numérica de los errores casuales.

El cuadrado del error cuadrático medio es igual al valor aritmético medio de los cuadrados de los errores verdaderos de la serie de mediciones dada:

$$m^2 = \frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \ldots + \Delta_n^2}{n} \qquad (245)$$

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n}}. \qquad (246)$$

El error cuadrático medio está relacionado en una total dependencia con la medida de exactitud h.

Utilizando la fórmula 241 de la ley de distribución normal de los errores casuales, determinaremos la relación del error cuadrático medio (m) con la medida de exactitud h.

Supongamos que fue realizado n mediciones de cierta magnitud, cuyos valores verdaderos los representamos por a y los valores medidos por $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$.

Como cada medición contiene errores casuales desconocidos, se obtendrán n errores verdaderos:

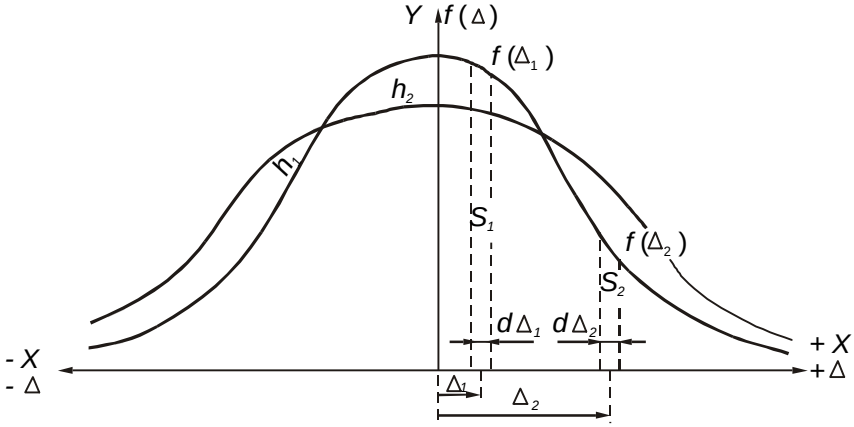


Fig. 308. Grafico de la ley de la distribución normal de los errores casuales.

$$\begin{aligned}
&\Delta_1 = x_1 - a;\\
&\Delta_2 = x_2 - a;\\
&\Delta_3 = x_3 - a;\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
&\Delta_n = x_n - a;
\end{aligned} \qquad (247)$$

La probabilidad de surgimiento de cada error casual por la Ley de la distribución normal se determina por la fórmula: $dP_{(\Delta_i)} = \frac{h}{\sqrt{\pi}} e^{-h^2\Delta^2} d\Delta.$

La probabilidad de aparición del conjunto de estos errores verdaderos Δ_1, Δ_2, ..., Δ_n, es igual al producto de las probabilidades de los errores aislados, es decir:

$$P = dP(\Delta_1)dP(\Delta_2)dP(\Delta_3).....dP(\Delta_n) \qquad (248)$$

$$P = \left(\frac{hd\Delta}{\sqrt{\pi}}\right)^n e^{-h^2(\Delta_1^2+\Delta_2^2+\Delta_3^2+...+\Delta_n^2)} = \left(\frac{hd\Delta}{\sqrt{\pi}}\right)^n e^{-h^2\Sigma\Delta^2}. \qquad (249)$$

Determinemos de esta ecuación el valor de la medida de exactitud para el cual la probabilidad de aparición conjunta de los errores Δ_1, Δ_2, Δ_3, ..., Δ_n sea máxima.

Para ello derivamos P respecto a h e igualándola a cero, hallamos el valor del argumento h correspondiente al valor máximo de la probabilidad P.

Aplicando previamente logaritmo a la ecuación 249 :

$$\ln P = n\ln\frac{hd\Delta}{\sqrt{\pi}} - h^2\Sigma\Delta^2. \qquad (250)$$

Derivando el segundo miembro de la ecuación 250 respecto a h e igualándola a cero, hallamos la incógnita h

$$n\frac{\pi d\Delta}{h\pi d\Delta} - 2h\sum\Delta^2 = 0. \qquad (251)$$

$$n - 2h\Sigma\Delta^2 = 0$$

$$\frac{1}{2h^2} = \frac{\Sigma\Delta^2}{n}$$

$$\frac{1}{h\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{\Sigma\Delta^2}{n}} \qquad (252)$$

Basándose en la fórmula 246 el segundo miembro de la fórmula 252 es igual al error cuadrático medio (m).

Entonces $\frac{1}{\sqrt{2}h} = m$

$$h = \frac{1}{m\sqrt{2}} \qquad (253)$$

La fórmula 253 muestra la relación entre la medida de exactitud **h** y el error cuadrático medio **m** de una medición aislada.

Sustituyendo en la ecuación 242 el valor de $h = \frac{1}{m\sqrt{2}}$, obtenemos la fórmula de la ley de la distribución normal expresada por el error cuadrático medio.

$$dP_{(\Delta)} = \frac{1}{m\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2m^2}} d\Delta. \qquad (254)$$

8.6. Cálculo del error cuadrático medio por mediciones directas.

1. **Cálculo del error cuadrático medio por los errores verdaderos.**

Supongamos que a es la magnitud medida n veces y los resultados son x_1, x_2, x_3, ..., x_n. Entonces los errores verdaderos se determinan como la diferencia entre los resultados de las mediciones y el valor verdadero de a:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= x_1 - a; \\ \Delta_2 &= x_2 - a; \\ \Delta_3 &= x_3 - a; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Delta_n &= x_n - a \end{aligned} \qquad (255)$$

Elevemos los errores al cuadrado, sumémoslos y dividamos la suma entre n. Como resultado obtenemos el cuadrado del error cuadrático medio como el valor medio aritmético de la suma de los cuadrados de los errores verdaderos:

$$m^2 = \frac{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \ldots + \Delta_n^2}{n}. \quad (245) \quad \text{(Ver punto 8.5).}$$

Entonces el error cuadrático medio, se determina por los errores verdaderos, mediante la fórmula:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n}} \quad (246) \quad \text{(Punto 8.5).}$$

2. Cálculo del error cuadrático medio por la desviación del valor medio aritmético.

Por lo general los valores verdaderos de las magnitudes medidas por nosotros son desconocidos. Por consiguiente son desconocidos, también, los errores (Δ_i) de tales mediciones, haciendo que la fórmula 245 sea inutilizable.

En muchos casos de la práctica de navegación como valores verdaderos de ciertas magnitudes se toma el valor medio aritmético de los resultados de las mediciones y para la valoración de la exactitud de las mediciones, en estos casos se utiliza el error cuadrático medio, calculado por la diferencia entre los resultados de las mediciones y el valor medio aritmético.

Supongamos que se realizaron n mediciones de determinada magnitud y se obtuvieron los resultados x_1, x_2, x_3,...., x_n en las mediciones.

Entonces el valor medio aritmético de la magnitud medida será:

$$a_0 = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + ... + x_n}{n} = \frac{\sum x}{n} \qquad (256)$$

Calculamos la desviación de cada medición respecto al valor medio aritmético de la magnitud medida:

$$\begin{aligned} v_1 &= x_1 - a_0; \\ v_2 &= x_2 - a_0; \\ v_3 &= x_3 - a_0; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ v_n &= x_n - a_n. \end{aligned} \qquad (257)$$

Si se conoce el valor verdadero de la magnitud medida, entonces los errores verdaderos se determinarían por las expresiones:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= x_1 - a; \\ \Delta_2 &= x_2 - a; \\ \Delta_3 &= x_3 - a; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Delta_n &= x_n - a \end{aligned} \qquad (258)$$

Encontremos la diferencia entre los errores verdaderos y las desviaciones del valor medio aritmético;

$$\begin{aligned} \Delta_1 - v_1 &= a_0 - a = \delta; \\ \Delta_2 - v_2 &= a_0 - a = \delta; \\ \Delta_3 - v_3 &= a_0 - a = \delta; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Delta_n - v_n &= a_0 - a = \delta \end{aligned} \qquad (259)$$

donde δ - error del valor aritmético medio de la magnitud medida.

Entonces:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= v_1 + \delta; \\ \Delta_2 &= v_2 + \delta; \\ \Delta_3 &= v_3 + \delta; \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \Delta_n &= v_n + \delta; \end{aligned} \qquad (260)$$

Elevemos la igualdad 260 al cuadrado y sumémosla:

$$\begin{array}{rl} & \Delta_1^2 = v_1^2 + 2v_1\delta + \delta^2; \\ & \Delta_2^2 = v_2^2 + 2v_2\delta + \delta^2; \\ + & \Delta_3^2 = v_3^2 + 2v_3\delta + \delta^2; \\ & \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ & \Delta_n^2 = v_n^2 + 2v_n\delta + \delta^2; \\ \hline & \sum \Delta^2 = \sum v^2 + 2\delta \sum v + n\delta^2 \end{array} \qquad (261)$$

Dividimos ambos miembros de la última igualdad entre n:

$$\frac{\sum \Delta^2}{n} = \frac{\sum v^2}{n} + \frac{2\delta \sum v}{n} + \delta^2 \qquad (262)$$

En la igualdad 262 el término $\frac{2\delta \sum v}{n} = 0$ ya que de acuerdo a las propiedades de los errores casuales, el valor aritmético medio de una serie grande de errores casuales tiende a cero, es decir, $\frac{\sum v}{n} = 0$.

La magnitud del error del valor aritmético medio $\delta = a_0 - a$, se encuentra próximo al valor del error cuadrático medio del valor aritmético medio de la magnitud medida.

Simbolicemos $\delta = \frac{m}{\sqrt{n}}$. Después de las transformaciones correspondientes, la igualdad 262 toma la siguiente forma:

$$m^2 = \frac{\sum v^2}{n} + \frac{m^2}{n};$$

$$m = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}} \qquad (263)$$

La fórmula 263 generalmente se utiliza en la práctica para el cálculo del error cuadrático medio de mediciones individuales en observaciones cuya exactitud es igual, cuando se desconoce el valor verdadero de la magnitud medida.

La exactitud del error cuadrático medio depende en gran medida del número n de observaciones. Con el aumento de este número de observaciones su exactitud aumenta.

3. Cálculo del error cuadrático medio por amplitud.

Se denomina amplitud a la diferencia entre el mayor y el menor de los valores en los resultados de la medición de la magnitud:

$$W = x_{max} - x_{min}. \qquad (264)$$

La amplitud W y el error cuadrático medio de una medición aislada se relacionan por la igualdad.

$$m = k_1 W \qquad (265)$$

El valor del coeficiente k_1 para diferentes números de mediciones n se toma en la tabla 8.1.

Tabla 8.1

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11
K_1	0,59	0,49	0,43	0,40	0,37	0,35	0,34	0,32	0,32

De los tres métodos estudiados anteriormente el más simple es el método de amplitud y el que más propagación encontró fue el método desviación del valor medio aritmético.

Ejemplo 1. Calcular el error cuadrático medio de la medición de la marcación si Mv = 83,4° y las marcaciones medidas son: 83,6°, 83,1°, 83,3°, 83,8°, 83,6°, 83,2°, 83,4°, 83,6°, 83,5°, 83,2°.

Solución 1. Los resultados de las mediciones y los cálculos de los cuadrados de los errores verdaderos los introducimos en la tabla siguiente.

Tabla 8.2

No de observaciones (n)	Marcaciones Medidas (x_i)	Mv(a)	Δ	Δ^2
1	83,6°	83,4°	+0,2	0,04
2	83,1°		-0,3	0,09
3	83,3°		-0,1	0,01
4	83,8°		+0,4	0,16
5	83,6°		+0,2	0,04
6	83,2°		-0,2	0,04
7	83,4°		0,0	0,00
8	83,6°		+0,2	0,04
9	83,5°		+0,1	0,01
10	83,2°		-0,2	0,04

$$\sum \Delta^2 = 0{,}47$$

2.Calculamos el error cuadrático medio en la medición de la marcación por la fórmula.

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{n}} = \sqrt{\frac{0.47}{10}} = \pm 0{,}22°$$

Ejemplo 2. Cuando el buque se encontraba anclado se realizaron 10 mediciones de distancia hasta un objeto aislado. Calcular el error cuadrático medio en la medición de distancia, si los resultados de más mediciones son iguales a: 44,0 cables, 43,5 cab., 42,5 cab., 44,0 cab., 44,5 cab., 45,0 cab., 43,0 cables, 43,5 cab., 44,5 cab. y 45,5 cab.

Solución 1. Calculamos el valor medio aritmético de la distancia hasta el objeto:

$$a = \frac{44{,}0 + 43{,}5 + 42{,}5 + 44{,}0 + 44{,}5 + 45{,}0 + 43{,}0 + 43{,}5 + 44{,}5 + 45{,}5}{10} = 44{,}0 \text{ cables}$$

2. Calculemos los cuadrados de las desviaciones del valor medio aritmético.

Tabla 8.3

No de observaciones (n)	Distancias Medidas (d)	a_o	v	v
1	44,0	44,0	0,2	0,00
2	43,5		-0,5	0,25
3	42,5		-1,5	2,25
4	44,0		0,0	0,00
5	44,5		-0,5	0,25
6	45,0		+1,0	1,00
7	43,0		-1,0	1,00
8	43,5		-0,5	0,25
9	44,5		+0,5	0,25
10	45,5		+1,5	2,25

$\sum v^2 = 7{,}50$

3. Calculamos el error cuadrático medio de una medición aislada de distancia por la fórmula:

$$m = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{7{,}50}{9}} = \pm 0{,}91 \text{cables}$$

Ejemplo 3. Utilizando los datos del ejemplo anterior, calcular el error cuadrático medio en la medición de la distancia por el método de la amplitud.

Solución 1. Calculamos la amplitud: $W = x_{max} - x_{max} = 45{,}5 - 42{,}5 = 3{,}0$

2. De la tabla 7 de acuerdo a n=10 tomamos el coeficiente k_1=0,32 y calculamos el error cuadrático medio.

$$m = k_1 W = 0{,}32 \times 3{,}0 = \pm\, 0{,}96 \text{ cables.}$$

8.7. Error cuadrático medio de una función.

Si la magnitud buscada no puede ser medida directamente, sino que se calcula por otras magnitudes con más facilidad para ser medidas, su error cuadrático medio se calcula por los errores de aquellas magnitudes utilizadas para su cálculo.

Supongamos que en términos generales, cierta magnitud Z, determinada indirectamente, es una función de varias variables independientes (argumentos), es decir:

$$Z = f\,(x, y, t, ..., s), \qquad (266)$$

donde x, y, t, **.....**, s – magnitudes medidas, para determinar la magnitud de la función buscada de la función Z.

Simbolicemos los errores casuales en la medición de los argumentos por Δx, Δy, Δt,...Δs , y el error de la magnitud calculada por ΔZ. Entonces

$$Z + \Delta Z = f(x + \Delta x,\ y + \Delta y,\ t + \Delta t...;\ s + \Delta s) \qquad (267)$$

Suponiendo que los errores en la medición de los argumentos son magnitudes pequeñas, desarrollamos el segundo miembro de la igualdad 267 en la serie de Taylor limitando la misma a las primeras potencias:

$$Z+\Delta Z=f(x,y,t...,s)+\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x+\frac{\partial f}{\partial y}\Delta y+ \qquad (268)$$
$$+\frac{\partial f}{\partial t}\Delta t+...+\frac{\partial f}{\partial s}\Delta s.$$

Restando a la igualdad 268 la igualdad la igualdad 266 obtenemos:

$$\Delta Z=\frac{\partial f}{\partial x}\Delta x+\frac{\partial f}{\partial y}\Delta y+\frac{\partial f}{\partial t}\Delta t+...+\frac{\partial f}{\partial s}\Delta s. \qquad (269)$$

Las derivadas parciales calculadas para los valores dados de los argumentos medidos serán magnitudes constantes,

Simbolicémoslas por:

$$\frac{\partial f}{\partial x}=k_1;\ \frac{\partial f}{\partial y}=k_2;\ \frac{\partial f}{\partial t}=k_3;...;\ \frac{\partial f}{\partial x}=k_k. \qquad (270)$$

Entonces

$$\Delta Z=k_1\Delta x+k_2\Delta y+k_3\Delta t+...+k_k\Delta s \qquad (271)$$

Cuando el número de mediciones cada argumento es n, obtenemos n ecuaciones de errores:

$$\begin{aligned}
&\Delta Z_1=k_1\Delta x_1+k_2\Delta y_1+k_3\Delta t_1+...k_k\Delta s_1;\\
&\Delta Z_2=k_1\Delta x_2+k_2\Delta y_2+k_3\Delta t_2+...k_k\Delta s_2;\\
&\Delta Z_3=k_1\Delta x_2+k_2\Delta y_3+k_3\Delta t_3+...k_k\Delta s_2;\\
&.....\\
&\Delta Z_n=k_1\Delta x_n+k_2\Delta y_n+k_3\Delta t_n+...k_k\Delta s_n.
\end{aligned} \qquad (272)$$

Elevemos al cuadrado cada una de las ecuaciones de errores (272), sumémoslas y dividámoslas por n. Obtenemos:

$$\frac{\sum\Delta Z^2}{n}=k_1^2\frac{\sum x^2}{n}+k_2^2\frac{\sum y^2}{n}+k_3^2\frac{\sum\Delta t^2}{n}+...+k_k^2\frac{\sum\Delta s^2}{n}+ \qquad (273)$$
$$+2k_1k_2\frac{\sum\Delta x\Delta y}{n}+...+2k_{k-1}k_k\frac{\sum\Delta t'\Delta s}{n}$$

Ya que el valor medio aritmético de una serie grande de errores tiende a cero, el témino $\frac{\sum\Delta x}{n}=0$ por lo que, también $\frac{\sum\Delta x\Delta y}{n}=0$

Entonces cada uno de los términos de la serie $2k_1k_2\frac{\Sigma\Delta x\Delta y}{n}, 2k_1k_3\frac{\Sigma\Delta x\Delta t}{n}$ y así sucesivamente, serán iguales a cero y, por consiguiente, la suma de todos los últimos términos de la ecuación (273) será igual a cero.

De la fórmula 273 es evidente que el valor medio de la suma de los cuadrados de los errores $\frac{\sum\Delta x^2}{n},\frac{\sum\Delta y^2}{n},\frac{\sum\Delta t^2}{n}$ etc., son iguales a los cuadrados de los errores cuadráticos medios. Entonces el error cuadrático medio de la magnitud Z se expresa por la fórmula:

$$m_z^2=k_1^2m_x^2+k_2^2m_y^2+k_3^2m_t^2+...+k_k^2m_s^2 \qquad (274)$$

ó $$m_z^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 m_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 m_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)^2 m_t^2 + \ldots + \left(\frac{\partial f}{\partial s}\right)^2 m_s^2. \qquad (275)$$

El cuadrado del error cuadrático medio de una función es igual a la suma de los cuadrados de los productos de las derivadas parciales de las funciones en cada argumento, por el error cuadrático medio del argumento correspondiente.

Sobre la base de la fórmula final del error cuadrático medio de la función deduzcamos las fórmulas de los errores cuadráticos medios de ciertas funciones lineales simples.

1. z=ax, donde a- número constante.

La derivada parcial será igual a $\frac{\partial z}{\partial x} = a$

Entonces

$$m_z = a m_x \qquad (276)$$

2. z= x ± y ± t ± ...± s

Derivadas parciales $\frac{\partial z}{\partial x} = 1, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = 1, \quad \frac{\partial z}{\partial t} = 1, \quad \ldots, \frac{\partial z}{\partial s} = 1.$

Entonces el error cuadrático medio de la función será:

$$m_z^2 = m_x^2 + m_y^2 + m_t^2 + \ldots + m_s^2 \qquad (277)$$

3. z=ax+by+...+ks.

Derivadas parciales: $\frac{\partial z}{\partial x} = a, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = b, \quad \ldots, \frac{\partial z}{\partial s} = k.$

Entonces

$$m_z^2 = a^2 m_x^2 + b^2 m_y^2 + \ldots k^2 m_z^2. \qquad (278)$$

Ejemplo. Cálcular el error cuadrático medio de la derrota si:

$$m_{Ra} = 0{,}5°; \; m_d = 0{,}2°; \; m_\delta = 0{,}3°; \; m_\beta = 0{,}5°.$$

Solución. La derrota del buque es igual a $R_{e\beta} = R_a + d + \delta + \beta.$

Entonces $$m_{Re} = \sqrt{m_{Ra}^2 + m_d^2 + m_\delta^2 + m_\beta^2} = \sqrt{0{,}25 + 0{,}04 + 0{,}09 + 0{,}25} = \pm 0{,}8°.$$

8.8. Error cuadrático medio del valor medio aritmético en una serie de mediciones.

Para la solución de muchas tareas de navegación no se utilizan mediciones individuales de ciertas magnitudes, sino el valor medio aritmético de una serie de mediciones.

Por eso para la caracterización de la exactitud en la medición es importante conocer no sólo el error cuadrático medio de una medición aislada, sino también, el error cuadrático medio del valor medio aritmético, el cual se utiliza directamente para la solución de la tarea dada.

El valor medio aritmético de la magnitud medida, como se conoce, se calcula por la fórmula $a_o = \frac{\Sigma x}{n}$, la

cual se puede representar en la siguiente forma:

$$a_o = \frac{1}{n}\left(x_1 + x_2 + x_3 + ... + x_n\right) \qquad (279)$$

Aquí $\frac{1}{n}$ juega el papel de coeficiente, o sea, es un factor constante. Basándose en la fórmula del error cuadrático medio de una función lineal, obtenemos:

$$m_{a0}^2 = \frac{1}{n^2}\left(m_{x1}^2 + m_{x2}^2 + m_{x3}^2 + ...m_{xn}^2\right). \qquad (280)$$

Considerando que todas las mediciones se realizaron con igual exactitud con un error cuadrático medio $m = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-1}}$, podemos escribir:

$$m = m_{x1} + m_{x2} + m_{x3} = ... = m_{xn} \qquad (281)$$

Entonces $m_{a0}^2 = \frac{nm^2}{n^2} = \frac{m^2}{n}$;

$$m_{a_0}^2 = \frac{m}{\sqrt{n}} \qquad (282)$$

El error cuadrático medio del valor medio aritmético es $\sqrt{n}$ veces más pequeño que el error cuadrático medio de una medición aislada.

El cálculo del error cuadrático medio del valor medio aritmético se realiza por la fórmula:

$$m_{a_0} = \sqrt{\frac{\Sigma v^2}{n(n-1)}}. \qquad (283)$$

Ejemplo. Utilizando los datos del ejemplo 2 (punto 8.6.), calcular el error cuadrático medio del valor medio aritmético de una distancia hasta un objeto.

Solución. Del ejemplo 2 (punto 8.6.) m = ± 0,91 cables, n=10. Entonces.

$$m_{a0}^2 = \frac{m}{\sqrt{n}} = \frac{0,91}{\sqrt{10}} = \pm 0,29 \text{cables}.$$

8.9.. Probabilidad del error cuadrático medio.

La probabilidad de aparición de cierto error verdadero en un intervalo infinitamente pequeño dΔ por la ley de la distribución normal, se expresa, como se conoce, por la fórmula 254:

$$dP_{(\Delta)} = \frac{1}{m\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2m^2}} d\Delta$$

Simbolicemos la relación entre el error verdadero y el error cuadrático medio por t, o sea:

$$\frac{\Delta}{m} = t,\ \Delta = mt,\ d\Delta = mdt. \qquad (284)$$

Determinamos la probabilidad de que el error se encuentre en los límites de Δ = 0 hasta Δ = ± mt.

Por el teorema de la suma de las probabilidades esta probabilidad se determina por la expresión:

$$P_{(t)} = \int_{-t}^{+t} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^{+t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \qquad (285)$$

Para mayor simplicidad en el empleo de la fómula, desarrollemos la función contenida en laintegral en la serie de Maclaurin, tomamos los términos necesarios de la serie y obtenemos el valor aproximado del integrando de la función.

$$e^{-\frac{t^2}{2}} = 1 - \frac{t^2}{2} + \frac{t^4}{8} - \frac{t^6}{48} + ... \qquad (286)$$

Sustituyendo la serie dada en la integral, obtenemos:

$$P_{(t)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-l}^{+l} \left(1 - \frac{t^2}{2} + \frac{t^4}{8} - \frac{t^6}{48} + ...\right) dt =$$

$$= \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{t} \left(1 - \frac{t^2}{2} + \frac{t^4}{8} - \frac{t^6}{8} + ...\right) dt; \qquad (287)$$

$$P_{(t)} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(t - \frac{t^3}{6} + \frac{t^5}{40} - \frac{t^7}{336} + ...\right). \qquad (288)$$

Tomemos $t = \frac{\Delta}{m} = 1$, es decir calculamos la probabilidad de que el error Δ en la medición se encuentren los límites del error cuadrático medio ± m.

Entonces $$P = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(1 - \frac{1}{6} + \frac{1}{40} - \frac{1}{336}\right) = 0{,}683.$$

De esta forma la probabilidad de que el error no supere el error cuadrático medio m es igual a 0,683 ó 68,3%. Esta es precisamente la probabilidad del error cuadrático medio. La última cifra se debe entender de tal forma, que si realizamos una serie de mediciones de cierta magnitud y calculamos el error cuadrático medio m, entonces el 68,3 % de los errores permitidos no superará ± m.

Tomando una serie de valores de t se puede calcular la tabla de las probabilidades P,

Tabla 8.4.

t=Δ/m	0	0,5	1	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
P	0,000	0,383	0,683	0,866	0,954	0,988	0,997	0,999

Para que sea más claro construyamos la curva de las probabilidades de los errores casuales (Fig. 308)

$$P_{(t)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^{+t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \qquad (289)$$

La curva muestra que a mayores ordenadas P_t corresponden menores valores $t = \frac{\Delta}{m}$, es decir, son más probables los errores numéricamente pequeños Δ.

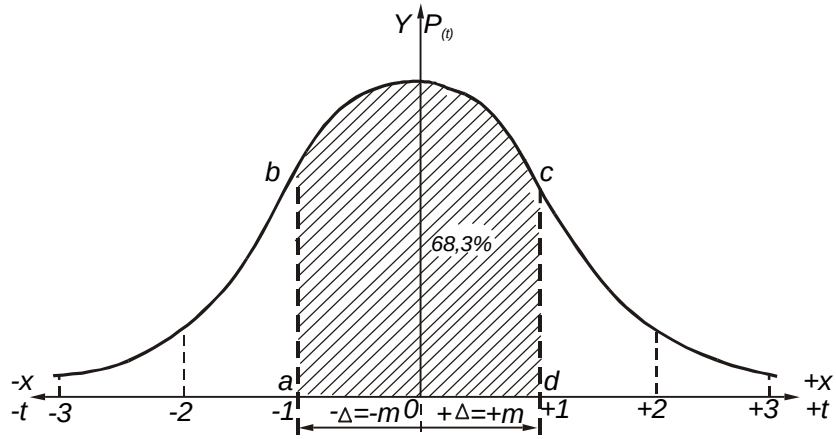


Fig. 309.Curva de probalidades de los errores casuales.

La curva es simétrica con relación al eje 0Y, lo que significa que la probabilidad del error positivo + Δ es la misma para el error negativo - Δ.
Al aumenar el error Δ, y por consiguiente la relación $t = \frac{\Delta}{m}$, las ordenadas $P_{(t)}$ disminuyen. Esto significa que los errores numéricamente grandes son menos probables que los errores pequeños y, cuando t=±3, las ordenadas prácticamente son iguales a cero, es decir, los errores son tres veces mayores que el error cuadrático medio, tienen una probabilidad pequeña.

El área abcd representa la probabilidad que el 68,3% de todos los errores reales no supere el error cuadrático medio ± m.

La probabilidad de aparición de los errores de –3m es igual a 0,997 ó 99,7%. Esto significa que el error que supera estos límites se puede esperar sólo en tres casos de 1000 mediciones.

8.10. Conceptos sobre los errores centrales y medios.

Se denomina error central o probable a aquel error, cuya probabilidad de surgimiento es igual 0,5 ó 50%.

El error central se utiliza por lo general en la artillería para la valoración de la desviación de los proyectiles por el alza y el objetivo, y, de la misma forma, para la valoración de las normas de exactitud de las mediciones con ayuda de los medios técnicos y significa que el 50% de todos los errores casuales son menores que la magnitud ρ y el 50% mayores.

La probabilidad de surgimiento del error en los límites dados en la ley de la distribución normal se expresa, como se conoce, por la fórmula

$$P_{(\Delta)} = \frac{1}{m\sqrt{2\pi}} \int_{-\Delta}^{+\Delta} e^{-\frac{\Delta^2}{2m^2}} d\Delta$$

Tomemos el error Δ igual al error central ρ , es decir $\Delta = \rho$. Entonces la magnitud de la relación del error central con el error cuadrático medio $t = \frac{\Delta}{m} = \frac{\rho}{m}$ se determina de la solución de la integral:

$$P_{(t)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-t}^{+t} e^{-\frac{t^2}{2}} dt;$$

$$P_{(t)} = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\left(t - \frac{t^3}{6} + \frac{t^5}{40} - \frac{t^7}{336}\right). \qquad (291)$$

Sustituyendo en la expresión 291 la probabilidad del error central $P_{(t)}$=0,5 ,obtenemos que:

$$t = \frac{\delta}{m} = 0{,}674$$

Por consiguiente el error central está relacionado con el error cuadrático medio por la expresión.

$$\delta = 0{,}674 \qquad (292)$$

Se denomina **error medio** a la media aritmética de los valores absolutos de los errores casuales:

$$\eta = \frac{|\Delta_1| + |\Delta_2| + |\Delta_3| + \ldots + |\Delta_n|}{n} = \frac{\sum|\Delta|}{n}. \qquad (293)$$

ó

$$\eta = \frac{|v_1| + |v_2| + |v_3| + \ldots + |v_n|}{n} = \frac{\sum|v|}{n}. \qquad (294)$$

La probabilidad del error medio es igual a 57,6%. El error medio está relacionado con el error cuadrático medio por la siguiente relación:

$$\eta = 0{,}798 \qquad (295)$$

En la actualidad el error medio no se utiliza. Para su determinación confiable es necesario tener una serie grande de errores, ya que éste refleja de forma incompleta la influencia de los errores grandes en magnitud, si la serie de mediciones no es grande.

La probabilidad y la correlación de diferentes errores se pueden representar por la siguiente tabla:

Tabla 8.5

$t = \frac{\Delta}{m}$	$P_{(t)}$	Características del error
0,674	0,500	ρ–error central (probable)
0,798	0,576	η–error medio (medio aritmético)
1,0	0,683	m–error cuadrático medio
1,5	0,866	1,5m
2,0	0,954	2,0m
2,5	0,988	3,0m
2,58	0,990	
3,0	0,997	

8.11. Cálculo del error límite en la medición y eliminación de fallos.

En una serie grande de errores de medición se pueden encontrar errores aislados, los cuales de forma visible se diferencia en magnitud de los otros.

Estos errores pueden surgir gracias al surgimiento de diferentes causas no relacionadas con el método de medición. Pero la probabilidad de surgimiento de grandes errores en la medición, como se observa en la curva de las probabilidades, es muy pequeña.

Prácticamente existe un límite de errores, fuera del cual éstos son tan poco probables, que se deben considerar como fallos.

Como ya se señaló, los errores que superan en magnitud a ± m, se pueden encontrar en tres casos de 1000 mediciones, por consiguiente su probabilidad de surgimiento es igual a 0,3%.

El error igual a ± 3m se llama **error límite en la medición**. Todos los errores que superan ± 3m se consideran como fallos, se excluyen de los resultados de las mediciones y no se elaboran.

En la práctica de navegación con frecuencia se asume el error igual a ± 2m como error límite, cuya probabilidad es igual a 95,4%, ó ± 2,58m, cuya probabilidad es igual a 99%.

Para la exclusión de los fallos inicialmente se calcula el error cuadrático medio m y luego el error límite. Todos los errores de medición que superan el error límite se eliminan como fallos y el cálculo del error cuadrático medio se realiza de nuevo.

8.12. Errores en las mediciones de desigual exactitud.

En la práctica de navegación con frecuencia se encuentran casos, cuando las mediciones de una misma magnitud se realizan con exactitud desigual (por ejemplo con diferentes equipos, por observadores de desigual calificación, en diferentes condiciones), y para elevar la exactitud del parámetro buscado, es necesario unificar estas mediciones en forma del valor medio aritmético.

Es evidente que en este caso el valor aritmético medio de los resultados de las mediciones no será el valor más probable de la magnitud medida, ya que cada medición posee su exactitud.

Para unificar las mediciones de desigual exactitud se emplea el término **“peso”.**

En términos generales el **peso caracteriza las ventajas de una medición en comparación con otras y es una magnitud inversamente proporcional al cuadrado del error cuadrático medio**. Cuanto mayor sea la exactitud en la medición mayor será su peso.

El peso se simboliza por la letra P y se calcula por la fórmula:

$$P_i = \frac{C}{m_i^2}, \qquad (296)$$

donde C – coeficiente arbitrario constante, tomado de acuerdo a la facilidad de los cálculos.

El valor más probable de la magnitud medida en este caso se determina como el valor medio de peso por la fórmula:

$$X_P = \frac{x_1P_1 + x_2P_2 + x_3P_3 + \ldots + x_nP_n}{P_1 + P_2 + P_3 + \ldots + P_n} = \frac{\sum xP}{\sum P}, \qquad (297)$$

donde x_1, x_2, x_3, **.....**, x_n – resultados de mediciones aisladas;

P1, P2, P3, ..., Pn - pesos de las correspondientes mediciones.

El error cuadrático medio del peso medio se determina por la fórmula:

$$m_{x_p} = \sqrt{\frac{\sum Pv^2}{(n-1)\sum P}}. \qquad (298)$$

Si consideramos el peso de la medición más exacta, como una magnitud igual a la unidad, entonces de la expresión $P = C/m_0^2$ determinemos $C = m_0^2$, donde m_0 - error cuadrático medio de la medición de un peso igual a la unidad.

La magnitud m0 puede ser calculada por los datos de las mediciones directas:

$$m_0 = \sqrt{\frac{\sum Pv^2}{n-1}}, \qquad (299)$$

donde v - desviación de mediciones aisladas respecto al valor del peso medio;
n - número de mediciones.

El peso de mediciones aisladas se calcula por la fórmula:

$$P = \frac{m_o^2}{m_i^2}. \qquad (300)$$

El cálculo por la fórmula 300, de la magnitud Pi, será el peso relativo de las mediciones. Entonces el error cuadrático medio del peso medio se obtiene por la fórmula:

$$m_{x_p} = \frac{m_0}{\sqrt{\sum P}} \qquad (301)$$

Ejemplo. Hacia el faro (radiofaro) fue medida una marcación con ayuda del girocompás, el radar y el radiogoniómetro. Los valores observados de la marcación correspondiente son iguales a 51,3°, 49,9° y 52,4° respectivamente.

Los errores cuadráticos medios de las mediciones de las marcaciones son: m_{GC}= ± 0,9°, m_{RAD}= ±1,3°, m_{RG}= ± 2,0°. Hallar el valor más probable de la marcación observada y su error cuadrático medio.

Solución 1. Tomamos el peso de la medición más exacta de la marcación como la medición con ayuda del girocompás igual a 1:

$$P_{GC} = \frac{C}{m_{GC}^2} = 1 \quad \text{ó}\ C = m_{gc}^2 = (0,9)^2.$$

2. Calculamos los pesos de las mediciones realizadas con el radar y el radiogoniómetro:

$$P_{RAD} = \frac{C}{m_{RAD}^2} = \frac{m_{GC}^2}{m_{RAD}^2} = \frac{(0,9)^2.}{(1,3)^2.} = 0,50;$$

$$P_{RG} = \frac{C}{m_{RG}^2} = \frac{m_{GC}^2}{m_{RG}^2} = \frac{(0,9)^2.}{(2,0)^2.} = 0,20.$$

3. Calculamos el valor más probable del peso medio de las marcaciones:

$$M_m = \frac{P_{GC}M_{GC} + P_{RAD}M_{RAD} + P_{RG}M_{RG}}{P_{GC} + P_{RAD} + P_{RG}} = \frac{51{,}3° x1 + 49{,}9° x0{,}5 + 52{,}4° x0{,}2}{1 + 0{,}5 + 0{,}2}$$

$$= \frac{51{,}3° + 24{,}95° + 10{,}48°}{1{,}7} = 51{,}0°$$

M_{GC} = 51,3°
M_{RAD} = 49,9°
M_{RG} = 52,4°

4. Calculamos el error cuadrático medio del peso de la marcación media:

$$m_{M_{pro}} = \frac{m_{GC}}{\sqrt{\sum P}} = \frac{0{,}9°}{\sqrt{1{,}7}} = \pm\ 0{,}69°.$$

8.13. Errores sistemáticos, su determinación y consideración

Se llama **errores sistemáticos** a aquellos errores que son invariables en la serie dada de mediciones o varían de acuerdo a determinada ley con la variación de las condiciones de observación.

Estos errores, que posiblemente no sean muy grandes, son capaces de aumentar y presentar grandes errores en los resultados de las mediciones finales. Como ejemplo de error sistemático variable puede ser el error en el espacio recorrido por la corredera sin considerar su corrección. Este error aumenta en proporción con el espacio recorrido.
Los errores sistemáticos pueden ser del **tipo variable progresivo, de acción unilateral, periódicos, constantes y combinados**.

Se llama **errores variables del tipo progresivo** a aquellos errores, los cuales en una serie de mediciones o bien aumentan o bien disminuyen. Por ejemplo, cuando en la carta se mide el espacio por partes, el error incuestionablemente aumentará con el aumento del número de las partes medidas.

Los errores que poseen valores absolutos variables y signo constante se llaman **errores de acción unilateral o errores repetibles**.

Ejemplo de tal error puede ser el error en las marcaciones medidas con determinado intervalo de tiempo, cuando el error del girocompás numéricamente varió.

Los errores sistemáticos que varían su valor y signo de acuerdo a determinada ley se llaman **periódicos**. Por ejemplo el error en la marcación cuando la alidada posee excentricidad.

Se llama **error constante** a aquel error que en todas las mediciones se mantiene constante en valor absoluto y signo.

En la práctica de navegación se encuentran con más frecuencia los errores combinados, en los cuales los errores sistemáticos son parte del error casual.
En la mayoría de los casos el error sistemático puede ser determinado en magnitud y signo y eliminados de los resultados de las mediciones por la vía de la introducción de las correcciones de los equipos de medición o instrumentos.

En términos generales la determinación y eliminación de los errores sistemáticos se encierra en lo siguiente:

-se seleccionan los equipos (instrumentos), con cuya ayuda se realizan las mediciones, se determi-

nan sus errores instrumentales, sobre la base de los cuales se introducen las correcciones del girocompás, la corredera, el sextante, la acosonda, el radar, etc.

-se utiliza una metodología racional en las observaciones y su elaboración. Por ejemplo, cuando se determina la posición del buque por observaciones a los opuntos de referencia, éstas se realizan de tal forma que durante la observación, las marcaciones varían poco su valor, se reducen se reducen a un punto de observación. Si tres marcaciones a causa del error constante en la corrección asumida del girocompás, forman un triángulo de error, en este caso, de acuerdo a las marcaciones, se calculan dos ángulos horizontales y mediante los cuales se obtiene la posición en la carta, libre de los errores sistemáticos.

El método más propagado para la detección de los errores sistemáticos es la utilización de líneas de posición excesivas. Por ejemplo 4 rectas de altura, 3-4 marcaciones, 3-4 distancias, etc.

Otro procedimiento es la medición del parámetro, por ejemplo la distancia, hasta dos objetos dispuestos uno frente al otro.

Además es necesario comprobar con más frecuencia la correspondencia de las correcciones asumidas para los cáculos con sus valores reales en las condiciones dadas de observación:

-es indispensable determinar la corrección del compás antes del desatraque y no menos de dos veces al dia después de encontrarse el buque navegando;

-periódicamente determinar el desvío del compás magnético y comparar sus indicaciones con la del girocompás en cada rumbo;

-periódicamente comprobar el radiodesvío;

-comprobar las correcciones del radar antes de salir a navegar o durante la navegación;

-determinar el error de índice del sextante antes de las observaciones y después de terminadas éstas, etc.

A pesar de la consideración estricta de los errores sistemáticos, no se logra eliminarlos del todo de los resultados de las observaciones.

Para valorar la exactitud de las mediciones, la influencia residual de los errores sistemáticos puede ser, con ciertas tolerancias, unido a la acción de los errores casuales bajo la condición de conmensurabilidad de los errores sistemáticos con los casuales. Después de esto la influencia del error resultante de las mediciones en la exactitud de la determinación de la posición, se valora por las fórmulas de la teoría de los errores casuales.

VALORACIÓN DE LA EXACTITUD DE DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DEL BUQUE POR DOS LÍNEAS DE POSICIÓN

8.14 Conceptos sobre la línea de posición

Para la determinación de la posición del buque se miden marcaciones, distancias, ángulos y otras magnitudes, que se denominan **parámetros de navegación**.

A cada parámetro de navegación medido le corresponde su línea isométrica, la cual posee determinada forma (Punto 6.1).

Se llama **línea isométrica al lugar geométrico de los puntos, correspondientes al valor dado del parámetro de navegación**. En la cualquier punto de la línea isométrica el valor del parámetro de navegación será idéntico, constante.

Para la mayoría de los parámetros de navegación la línea isométrica es una línea curva.

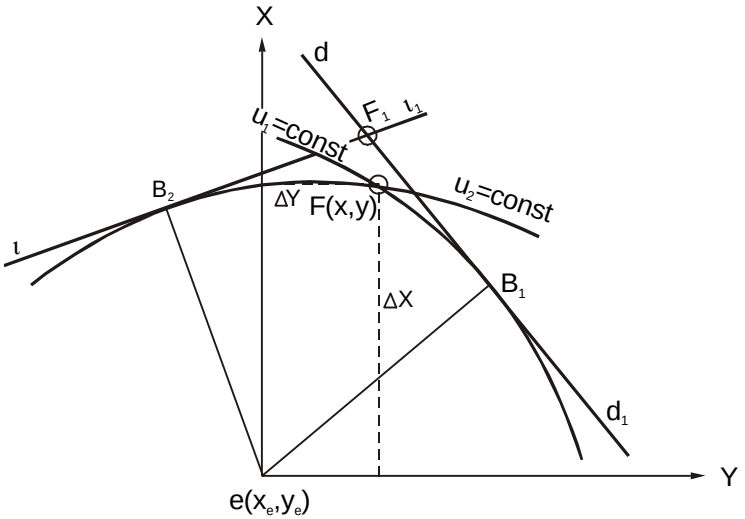


Fig. 310 Sustitución de la línea isométrica por la línea de posición

En pequeñas distancias hasta los objetos de referencia la línea isométrica puede ser construida directamente en la carta náuticas, por ejemplo, en la determinación de la posición por distancias, marcaciones, ángulos horizontales.

Ante grandes distancias, cuando los puntos notables se encuentran fuera de los límites de la carta, el ploteo de la línea isométrica puede ser muy complicado y difícil. En este caso la línea isométrica no se plotea en la carta. Los segmentos cortos de las líneas isométricas se sustituyen por líneas rectas o se trazan segmentos cortos de líneas isométricas cerca de la posición de estima. Las líneas rectas que sustituyen las líneas isométricas se llaman **líneas de posición**.
La sustitución de las líneas isométricas por las líneas de posición permite por procedimientos simples determinar la posición observada en la carta y realizar la valoración de su exactitud.

Deduzcamos la ecuación de la línea de posición y realicemos su análisis.
Supongamos que la posición de estima del buque se encuentra en el punto **e** con coordenadas rectangulares X_e y Y_e, y la posición observada en el punto F con coordenadas x y (Fig. 310).
Sustituyamos los segmentos de las líneas isométricas próximos a la posición de estima por líneas rectas. Para ello desde el punto de estima **e** tracemos las perpendiculares CB_1 y CB_2 a la línea isométrica. Por los puntos B_1 yB_2, que se llaman **puntos determinantes**, tracemos las rectas tangentes dd_1 y ll_1, que correspondientemente serán perpendiculares a la rectas CB_1 y CB_2.

Las rectas tangentes dd_1 y ll_1 a las líneas isométricas condicionalmente se llaman líneas de posición.

Ahora se debe considerar que la posición real del buque se encuentra en el punto de intersección F_1 de as líneas de posición.

Como se observa, la sustitución de las líneas isométricas por las líneas de posición introduce cierto error en la posición observada del buque.

La magnitud de este error (segmento FF_1) depende de la magnitud de la discrepancia de la posición de estima y de la curvatura de la línea isométrica.

Cuando la curvatura de la línea isométrica es pequeña se puede considerar que los puntos F y F_1 coinciden.

El parámetro de navegación medido **u** depende de las coordenadas de la posición del buque X y Y, es decir, es una función de estas coordenadas.

Por consiguiente, al valor medido del parámetro de navegación **u** corresponderá una línea isométrica, que en términos generales se expresa por la ecuación:

$$u = f(x, y) = \text{const.} \tag{302}$$

De la fig. 310 se muestra que las coordenadas observadas del buque serán:

$$\left.\begin{aligned} x &= x_c + \Delta x; \\ y &= y_c + \Delta y; \end{aligned}\right\} \tag{303}$$

donde Δx y Δy $-$incremento de las coordenadas de estima.

Por tanto la ecuación de la línea isométrica tendrá la forma:

$$u = f(x_e + \Delta x, y_e + \Delta y) \tag{304}$$

Desarrollemos la ecuación 304 en la serie de Taylor:

$$U = f(x_e + \Delta x,\ y_e + \Delta y) = f(x_e, y_e) + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_e \Delta x + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_e \Delta y + \frac{1}{1x2}\left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}\right)_e \Delta x^2 +$$

$$+ \frac{1}{1x2}\left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}\right)_e \Delta y^2 + \ldots + \frac{1}{n!}\left(\frac{\partial^n f}{\partial x^n}\right)_e \Delta x^n + \frac{1}{n!}\left(\frac{\partial^n f}{\partial x^n}\right)_e \Delta y^n. \tag{305}$$

Limitando esta serie a los tres primeros términos tenemos que:

$$u = f(x_e, y_e) + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_e \Delta x + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_e \Delta y. \tag{306}$$

En esta ecuación el témino $f(x_e , y_e)$ es igual al valor del parámetro de navegación para la posición de estima e:

$$u_e = f(x_e , y_e) \qquad (307)$$

Las derivadas parciales $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_e$ y $\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_e$ para la posición de estima dada son constantes.

Sustituyendo 307 en 306:

$$u = u_e + \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_e \Delta x + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_e \Delta y$$

$$\text{ó} \quad \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_e \Delta x + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_e \Delta y - (u - u_e) = 0 \qquad (308)$$

Se ha obtenido una ecuación de la primera potencia con relación a las coordenadas Δx y Δy del tipo Ax y By + C = 0. Esta ecuación general de la recta que tiene las coordenadas con su origen en el punto C, o sea la ecuación de la línea de posición 300 la transformamos en la forma normal, es decir en la forma:

$$\cos\tau x + \operatorname{sen}\tau x - P = 0 \qquad (309)$$

Tomemos de la fig. 310 una línea de posición (Fig. 311).

Las derivadas parciales $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_e$ y $\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_e$ caracterizan la variación de la función (parámetro de navegación) en los ejes de coordenadas X y Y con relación al origen de coordenadas – la posición de estima **e**.

La mayor variación de la función (parámetro de navegación) u será en la dirección de la normal **n**, es decir por la perpendicular eB_1 a la línea isométrica. La derivada en la normal es el gradiente de la función dada.

En términos generales se denomina **gradiente de una función a su variación en la unidad de distancia en la dirección de la normal en el sentido de los valores crecientes de la función**.

$$g = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_c^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_c^2} \qquad (310)$$

Trazando el módulo del gradiente desde el origen de coordenadas (punto e) en la dirección de la normal n, obtenemos el vector del gradiente:

$$g = \frac{\partial f}{\partial n}.$$

El vector del gradiente está dirigido por la normal (perpendicular) a la línea isométrica (línea de posición en el sentido creciente de los valores del parámetro de navegación (función u).

Se conoce que la derivada parcial de la función **u** en cualquier dirección es igual a la proyección del gradiente g de esta función en esta dirección.

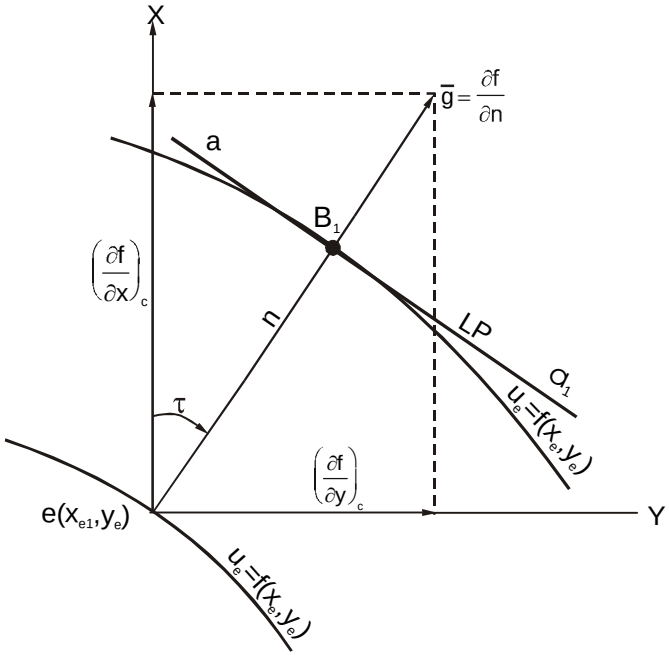


Fig. 311 Sustitución de una línea isométrica por la de línea posición

Proyectemos el gradiente g en los ejes X y Y de coordenadas. Obtenemos las derivadas $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_c$ y $\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_c$,cuyas magnitudes escalares serán iguales a:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_c = g\cos\tau; \quad \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_c = g\,\mathrm{sen}\tau \tag{311}$$

Sustituyendo el valor de las derivadas parciales en la ecuación 308 obtenemos:

$$g\cos\tau\Delta x + g\,\mathrm{sen}\tau\Delta y - (u - u_c) = 0 \tag{312}$$

Dividiendo la ecuación 312 entre el gradiente obtenemos la ecuación de una línea recta en la forma normal:

$$\cos\tau\Delta x + \mathrm{sen}\tau\Delta x - \frac{u - u_c}{g} = 0. \tag{313}$$

En la ecuación 313 el termino indepediente expresa la longitud de la normal n desde el origen de coordenadas hasta la línea recta (línea de posición):

$$n = \frac{u - u_c}{g}. \tag{314}$$

Entonces la ecuación de la línea de posición se puede escribir en la siguiente forma:

$$\cos\tau\Delta x + \mathrm{sen}\tau\Delta y - n = 0 \tag{315}$$

Las magnitudes τ y n se llaman **elementos o parámetros de la línea de posición**, los cuales determinan completamente su colocación con relación a la posición de estima **e**. La magnitud n es la longitud de la perpendicular trazada desde la posición de estima hasta la línea de posición, y el ángulo τ es la dirección de esta perpendicular con relación al eje de coordenadas X.

El análisis de la ecuación de la línea de posición muestra lo siguiente:

1. Las líneas de posición para pequeñas diferencias $u - u_e$, es decir cerca de la posición de estima, se desplazan casi paralelamente entre sí.

Si las coordenadas de estima X_e y Y_e no varían y el incremento de la función (parámetros de navegación) u no es grande, entonces en las ecuaciones de las líneas de posición, varía sólo el parámetro n y el parámetro τ queda prácticamente invariable, es decir,

$$\tan\tau = \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_e}{\left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)_e} = const \qquad (316)$$

La constancia del ángulo τ es la condición de paralelismo de las líneas de posición para distintos valores de u (Fig. 312).

Cuando la diferencia $u - u_c = 0$ la línea de posición pasa por la posición de estima en la dirección $\tau \pm 90°$.

2. La magnitud de desplazamiento paralelo de la línea de posición está en relación directa con la variación del parámetro de navegación (función u).

Tomemos dos incrementos de un mismo parámetro de navegación (función):

$$\Delta u_1 = u_1 + u_e;$$
$$\Delta u_1 = u_1 + u_e. \qquad (317)$$

.

Entonces los deplasamientos de las líneas de posición serán:

$$n_1 = \frac{u_1 - u_e}{g}; \quad n_2 = \frac{u_2 - u_e}{g}. \qquad (318)$$

La diferencia de los intersectos n_2 y n_1 se llama desplazamiento de la línea de posición y será igual a:

$$\Delta n_1 = n_2 - n_1 = \frac{u_2 - u_e}{g} - n_1 = \frac{u_1 - u_e}{g} \qquad (319)$$

ó

$$\Delta n = \frac{\Delta u}{g}$$

De esta forma, el desplazamiento de la línea de posición Δn depende del incremento del parámetro de navegación (función Δu) .

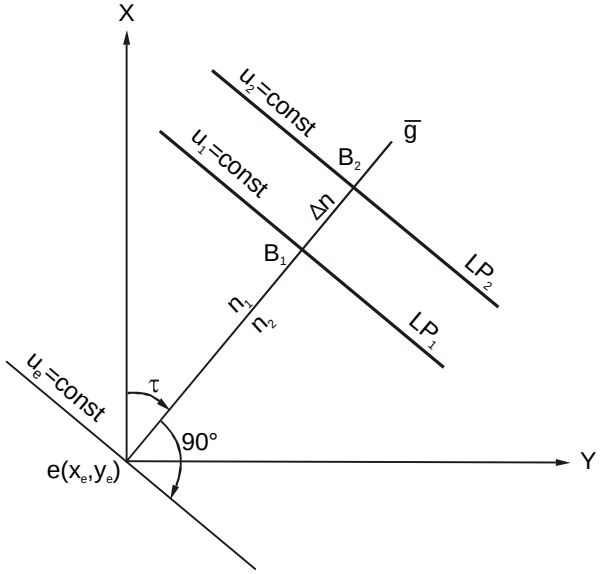


Fig. 312 Desplazamiento de la línea de posición

8.15 Gradientes de los parámetros de navegación

Para la valoración de la exactitud de la determinación de la posición es necesario conocer los gradientes de los diferentes parámetros de navegación.
El módulo (valor numérico) del gradiente es igual a:

$$g = \lim_{n \to 0} \frac{\Delta u}{\Delta n} = \frac{du}{dn} \qquad (320)$$

es decir, es igual a la derivada de la función en la dirección de la normal n. En la práctica para el cálculo del gradiente para valores bastante pequeños de Δu y Δn se utiliza la fórmula.

$$g = \frac{\Delta u}{\Delta n}. \qquad (321)$$

Los valores de los gradientes de los parámetros de navegación que se utilizan con más frecuencia se deduce con ayuda de construcciones geométricas simples. Para lo cual, la curvatura de la Tierra puede ser no considerada, sino que se resuelve la cuestión en el plano, ya que ante la determinación por los métodos de navegación las distancias hasta los objetos, como regla, son comparablemente pequeñas.

1. Gradiente de la marcación

Supongamos que desde cierto punto Bo fue medida la marcación verdadera Mv = u al punto notable M (Fig. 313).

La línea isométrica y la línea de posición en la carta coinciden en este caso, ya que la distancia D hasta el objeto es pequeña.

Demos el incremento Δu a la marcación verdadera, como resultado de lo cual la línea de posición en el punto Bo recibe el desplazamiento siguiente:

$$\Delta n = D\Delta = B_0B_1. \qquad (322)$$

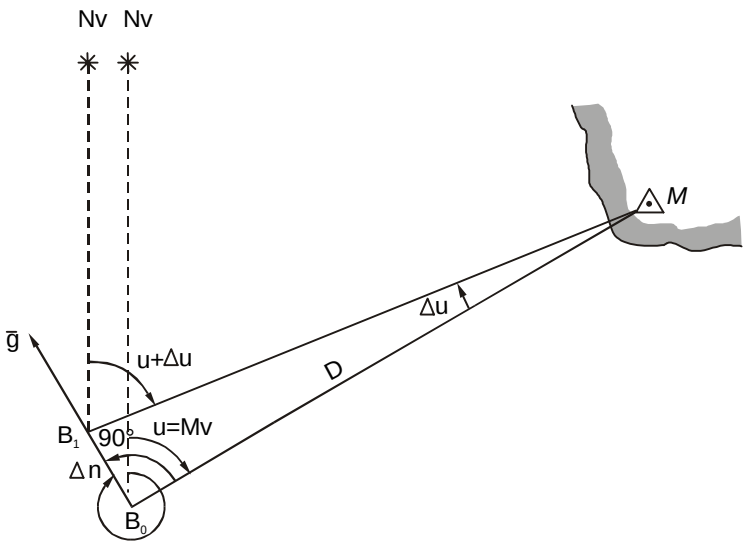


Fig. 313 Gradiente de la marcación

En la fórmula 322 la magnitud Δu se expresa en radianes. Expresando Δu en grados o en minutos, respectivamente obtenemos;

$$\Delta n = D\frac{\Delta u^\circ}{57{,}3^\circ}; \quad \Delta n = D\frac{\Delta u'}{3438'}. \qquad (323)$$

El gradiente de la función se determina como la relación $\frac{\Delta u}{\Delta n}$.

Entonces la magnitud del gradiente de la marcación se determina por la fórmula:

$$\frac{\Delta u}{\Delta n} = \frac{\Delta u}{D\Delta u} = \frac{1}{D}\left(\frac{\text{radianes}}{\text{unidades de longitud}}\right) \qquad (324)$$

ó

$$g = \frac{57{,}3^\circ}{D} = \left(\frac{\text{grados}}{\text{unidades de longitud}}\right); \qquad g = \frac{3438'}{D} = \left(\frac{\text{minutos}}{\text{unidades de longitud}}\right) \qquad (325)$$

donde D – distancia hasta el objeto.

Además de la magnitud del gradiente es necesario conocer también su dirección con relación al meridiano verdadero.

El gradiente siempre está dirigido perpendicularmente a la línea de posición en el sentido de crecimiento del parámetro de navegación. Por consiguiente la dirección del gradiente de la marcación con relación al meridiano verdadero es igual a:

$$\tau = u - 90^\circ = Mv - 90^\circ \qquad (326)$$

Ejemplo: Para determinar la posición del buque se midieron dos marcaciones a dos objetos Mv_1 = 60°, Mv_2 = 290°. Las distancias hasta los puntos notables son D_1 = 120 cables, D_2 = 185 cables respectivamente. Determinar los valores y direcciones de los gradientes de las marcaciones a estos objetos.

Solución:

$$g_1 = \frac{57{,}3°}{D_1} = \frac{57{,}3°}{120} = 0{,}48\left(\frac{grados}{cables}\right);$$

$$g_1 = \frac{57{,}3°}{D_1} = \frac{57{,}3°}{120} = 0{,}48\left(\frac{grados}{cables}\right);$$

$$\tau_1 = Mv_1 - 90° = 60° - 90° = 330°$$

$$\tau_2 = Mv_2 - 90° = 290° - 90° = 200° \rightarrow (360° + 60° = 420° - 90° = 90° = 330°)$$

2. Gradiente de la distancia

Cuando se determina la posición por distancias en la carta las líneas isométricas son circunferencias, trazadas desde las posiciones de los objetos, con radios iguales a las distancias medidas y las líneas de posición son las tangentes a estas circunferencias.

Supongamos que desde el punto Bo se midió la distancia D = u desde el buque hasta el objeto M (Fig. 314).

Tracemos la línea isométrica (circunferencia) y la línea de posición tangente a la línea isométrica en el punto Bo.

Demos el incremento $\Delta u = \Delta D$ de la distancia D. Tracemos la línea isométrica y la línea de posición correspondientes al nuevo parámetro D + Δ D. Como resultado del incremento la línea de posición se desplaza en la magnitud Δ n, igual al valor de la variación de la distancia Δ D, es decir Δ n = ΔD.

Entonces la magnitud del gradiente de la distancia será igual a:

$$g = \frac{\Delta u}{\Delta n} = \frac{\Delta D}{\Delta D} = 1\left(\frac{\text{unidades de distancia}}{\text{unidades de distancia}}\right) \qquad (327)$$

ya que $\Delta u = \Delta D$ – magnitud de la variación de la función;

$\Delta n = \Delta D$ – desplazamiento de la línea de posición.

El vector del gradiente de distancia siempre está dirigido por el radio de la circunferencia y en sentido contrario al objeto, es decir por la recta que une el punto del objeto M y el punto de determinación de la posición Bo, o sea .
$\tau = Mv \pm 180°$

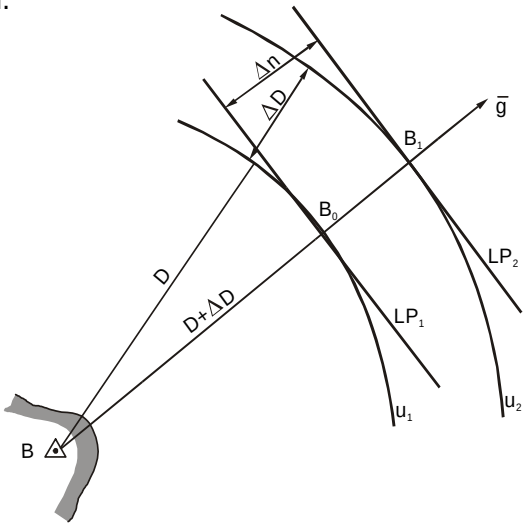


Fig. 314 Gradiente de la distancia

3. Gradiente del ángulo horizontal

La línea isométrica del ángulo horizontal α entre los objetos es una circunferencia que pasa por estos objetos y que contiene el ángulo α inscripto y la línea de posición es la tangente a la circunferencia.

Supongamos que desde el punto Bo se midió un ángulo horizontal entre los objetos A y B.

Tracemos la línea isométrica y la línea de posición correspondientes al ángulo α (Fig. 315).

El ángulo horizontal medido entre dos objetos se puede considerar como la diferencia de las marcaciones a estos objetos, es decir $\alpha = Mv_A - Mv_B$ ó $\alpha = MvI_A - MvI_B$. De acuerdo al teorema del análisis vectorial, el gradiente de la suma o la diferencia de funciones $u_1 \pm u_2$ es igual a la suma geométrica o diferencia de los gradientes de estas funciones, es decir:

$$\bar{g}(u_1 \pm u_2) = \bar{g}\,u_1 \pm \bar{g}\,u_2 \qquad (328)$$

Sobre la base de este teorema el vector del gradiente del ángulo horizontal es igual a:

$$\bar{g}_\alpha = \bar{g}_A - \bar{g}_B, \qquad (329)$$

donde $-\ \bar{g}_A, \bar{g}_B$ gradientes de dirección a los objetos A y B.

El valor numérico del gradiente g_α se determina con facilidad de por el método gráfico. Para ello es necesario calcular los gradientes de dirección $g_A = \frac{57{,}3°}{D_A}$ y $g_B = \frac{57{,}3°}{D_B}$ construirlos en el punto Bo en la escala seleccionada. Uniendo los extremos de los gradientes $\overline{g_A}$ y $\overline{g_B}$, 0btenemos en la misma escala la magnitud del gradiente de ángulo horizontal g_α.

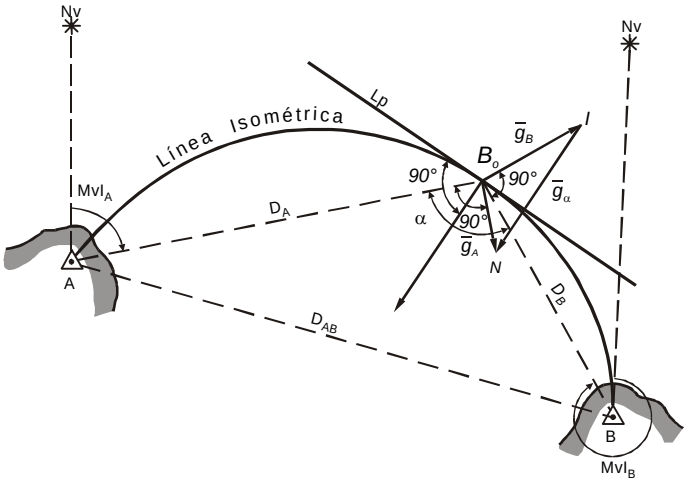


Fig. 315 Gradiente del ángulo horizontal

Si trazamos el vector del gradiente g_α desde el punto Bo vemos que este es perpendicular a la línea de posición y está dirigido hacia el interior de la circunferencia, es decir hacia el lado de incremento del ángulo horizontal α.

Para simplificar las construcciones gráficas el triángulo de gradientes BoLN generalmente se construye rotado en 90° en sentido horario (Fig. 316). Entonces el gradiente g_A estará dirigido por la línea BoA, el gradiente g_B por la línea BoB y el gradiente del ángulo horizontal g_α estará dirigido paralelamente a la línea de posición.

Tales gradientes se llaman **gradientes inversos**:

El valor del gradiente g_α se puede determinar también analíticamente.

Los triángulos BoBA y BoLN son semejantes ya que $\frac{g_A}{D_B} = \frac{g_B}{D_A}$.

De la semejanza de los triángulos tenemos que:

$$\frac{g_\alpha}{D_{AB}} = \frac{g_A}{D_B},\ pero\ g_A = \frac{57{,}3°}{D_A}.$$

Entonces $$\frac{g_\alpha}{D_{AB}} = \frac{57{,}3°}{D_A D_B},$$

ó $$g_\alpha = \frac{57{,}3° D_{AB}}{D_A D_B}\left(\frac{grados}{unidades\,de\,distancia}\right); \qquad (330)$$

$$g_\alpha = \frac{3438' D_{AB}}{D_A D_B}\left(\frac{minutos}{unidades\,de\,distancia}\right). \qquad (331)$$

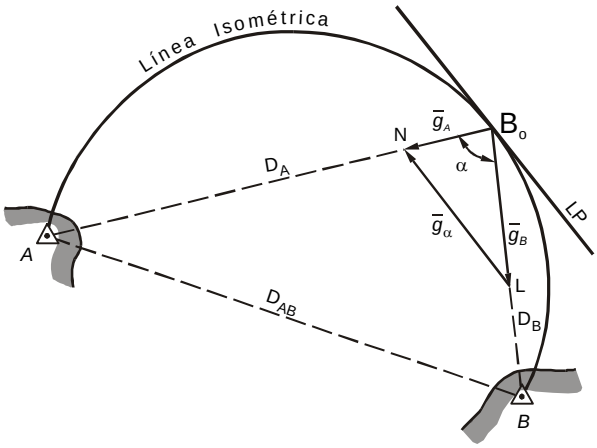


Fig. 316 Gradiente del ángulo horizontal rotado

Ejemplo. Fue medido un ángulo horizontal entre los objetos A y B. La distancia hasta estos objetos es igual a 8 y 13 millas respectivamente y la distancia entre ellos es de 7,2 millas.
Determinar los valores numéricos de los gradientes de los ángulos horizontales.

Solución.

$$g_\alpha = \frac{3438' D_{AB}}{D_A D_B} = \frac{3438' x 7{,}2}{8{,}0 x 13.0} = 23{,}8\left(\frac{minutos}{millas}\right).$$

4. Gradiente de la diferencia de distancia

La diferencia de distancia hasta dos estaciones costeras B y C se mide cuando se determina la posición del buque con ayuda de los sistemas de radionavegación por fases y por impulsos.

La línea isométrica que responde a un valor constante de la diferencia de distancia medida es una hipérbola con sus focos en las posiciones de las estaciones costeras B y C.

Supongamos que desde el punto Bo fue medida la diferencia de distancia hasta las estaciones costeras B y C: $u = D_2 - D_1$.

Las magnitudes D_2 y D_1 son las distancias desde la posición de observación Bo hasta las estaciones costeras B y C (Fig. 317).
Como la diferencia de distancias $u = D_2 - D_1$, entonces por analogía con el gradiente del ángulo horizontal, el gradiente de la diferencia de distancia es igual a la resta geométrica de los vectores de los gradientes de las distancias.

$$\overline{g_u} = \overline{g_2} - \overline{g_1}.$$

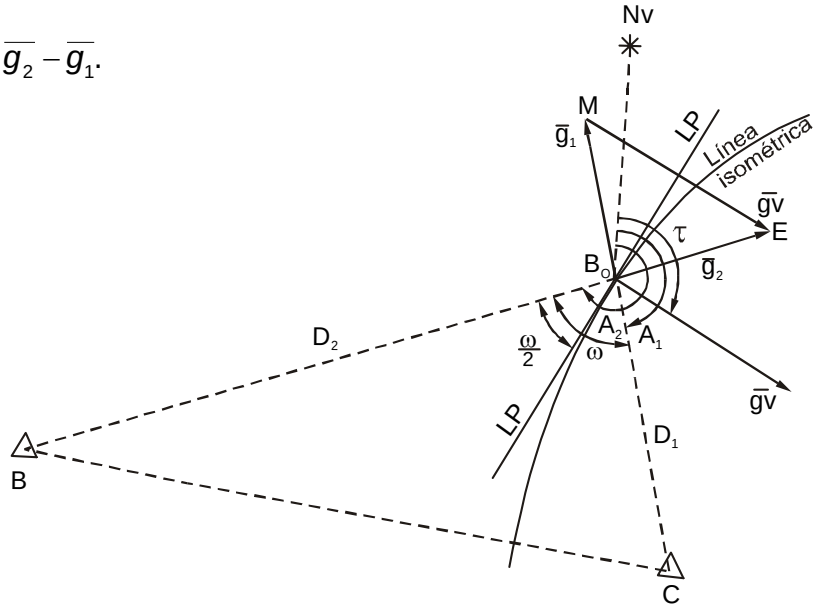


Fig.317 Gradiente de la diferencia de distancias

Los gradientes de la distancias son iguales a la unidad: $g_2 = g_1 = 1$.
Tracemos los gradientes de las distancias en la escala seleccionada desde el punto Bo en los sentidos, opuestos a las direccines de las estaciones costeras B y C. Uniendo los extremos de estos vectores obtenemos la dirección del gradiente $\overline{g}_U$ de la diferencia de distancias.

La línea de posición es la tangente a la hipérbola en el punto Bo y divide al ángulo de posición ω en dos partes iguales y, es perpendicular al gradiente $\overline{g}_U$.

El valor numérico (módulo) del gradiente $\overline{g}_U$ puede determinarse análogamente del triángulo BoME:

$$g_u = \sqrt{g_1^2 + g_2^2 - 2g_1 g_2 \cos\omega}. \qquad (332)$$

Sustituyendo en la fórmula (332) g_1= 1 y g_2= 1, obtenemos:

$$g_u=\sqrt{2(1-\cos\omega)}=\sqrt{2x2sen^2\frac{\omega}{2}}=2sen\frac{\omega}{2}; \qquad (333)$$

ó $$g_u=2sen\frac{\omega}{2}.$$

Ya que la línea de posición es la bisectriz del ángulo de posición ω, entonces su dirección con relación al meridiano verdadero es igual a la suma $\frac{A_1+A_2}{2}$ dirigido desde el punto Bo hacia la estación costera (Fig. 317).

Pero el gradiente es perpendicular a la línea de posición, entonces el gradiente de la diferencia de distancia se obtiene de la fórmula:

$$\tau=\frac{A_1+A_2}{2}\pm 90° \qquad (334)$$

El gradiente siempre se encuentra dirigido en el sentido del aumento de la función (diferencia de distancias), es decir hacia el lado más cercano de la estación costera.

8.16 Exactitud de la medición de los parámetros de navegación

La medición de los parámetros de navegación, que se llevan a cabo para determinar o controlar la posición del buque por muy meticulosa que se efectúe siempre contendrá errores. El navegante debe tomar todas las medidas que estime pertinentes para disminuir su magnitud, aunque eliminarlos completamente es casi imposible. Para valorar la exactitud de las observaciones es necesario realizar la apreciación de los resultados obtenidos al medir los parámetros de navegación. El mejor criterio de la exactitud de la medición, cálculos y construcción gráfica lo constituye el error cuadrático medio, cuya magnitud fundamentalmente depende de los siguientes factores:

- perfeccionamiento constructivo y condiciones empleadas para la medición con el instrumento o equipo.

- preparación (entrenamiento), esmero y cuidado del personal.

- condiciones existentes durante la medición (estado de la mar, del tiempo, visibilidad, etc.).

Al valorar la exactitud de las observaciones es necesario operar con el error cuadrático medio de los parámetros de navegación, obtenidos o directamente antes de determinar la posición o tomadas de observaciones anteriores, que se efectuaron con los mismos equipos o instrumentos en condiciones análogas.

Ante esto generalmente se emplean dos métodos:

1. Comparación de las magnitudes medidas del parámetro de navegación con su magnitud verdadera

Por valor verdadero de este parámetro se puede tomar el resultado de su medición con el equipo notoriamente más exacto, que aquel, cuya exactitud se valora (ejemplo, la marcación visual ante la apreciación en la toma de la radiomarcación). Los errores esperados considerados como valor verdadero del parámetro de navegación debe ser por lo menos de dos a tres veces menores a los errores de medición cuya exactitud se valora.

El error de cada medición se halla como la diferencia entre los valores medido y verdadero del parámetro de navegación:

$$\Delta_i = u_{i(med)} - u_{i(v)}$$

Donde: $U_{i(med)}$ - Valor observado (medido) del parámetro de navegación.

$U_{i(v)}$ - Valor verdadero del parámetro de navegación.

Δ_i - Error del parámetro medido.

El error cuadrático medio (m) de una medición se calcula por la fórmula:

$$m = \sqrt{\frac{\sum \Delta_i^2}{n}}$$

Este método tiene la ventaja que permite valorar la magnitud resultante (sumaria) de todo los errores, de los cuales se forma el error en la medición: los errores casuales y sistemáticos.

El inconveniente de este método es la dificultad de imposibilitar su empleo para apreciar la exactitud en la medición, efectuados durante la navegación.

2. Cálculo de los errores cuadráticos medios por ajuste interno de las mediciones

Se realiza una serie de mediciones del mismo parámetro de navegación; se determina su valor medio aritmético y se calcula la desviación de los valores medidos respecto a la media aritmética.

$$V_i = U_{i(med)} - U_{pro}$$

Donde: U_{pro} - Valor aritmético medio del parámetro de navegación

El error cuadrático medio de una medición se calcula por la fórmula:

$$m = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}}$$

Si la medición se realiza navegando y la magnitud del parámetro medido varía con el tiempo, entonces antes de calcular la media aritmética, el resultado de todas las mediciones se lleva a un mismo momento de tiempo. Esto se realiza, calculando la velocidad de variación del parámetro de navegación en el tiempo.

Si se mide la distancia hasta un objeto inmóvil, la velocidad de su variación por tiempo en cables/min. es igual a MVD (magnitud de variación de la distancia):

$$MVD = \frac{dD}{dt} = -v\cos(Mv - Rv)$$

donde V – velocidad del buque en nudos

M_v – marcación verdadera

R – rumbo verdadero

Si se mide la marcación hasta el objeto móvil entonces la velocidad de su variación en grados por minutos es igual a MVM (magnitud de la variación de la marcación):

$$MVM = \frac{dM}{dt} = 57{,}3^{\circ}\,\frac{v\,sen(Mv - Rv)}{D}.$$

Los valores de MVD y MVM pueden ser calculados por las fórmulas o determinados por las tablas 33a, b y c en la TUN. Si el parámetro de navegación medido es la diferencia de distancia hasta los objetos A y B, la velocidad de su variación en el tiempo se halla por la diferencia de las velocidades de variación de la distancia.

$$\frac{d(D_B - D_A)}{dt} = MVD_B - MVD_A.$$

Si se valora la exactitud de la medición del ángulo horizontal entre las direcciones a los objetos, la velocidad de su variación se calcula por la diferencia de la medición de las marcaciones:

$$\frac{d\alpha}{dt} = MVM_B - MVM_A.$$

La reducción de los resultados de la medición a un mismo momento del tiempo se realiza por la fórmula general:

$$U'_{i(med)} = U_{i(med)} + \frac{dU}{dt}\left(T_{med} - T_i\right)$$

donde $u'_{i(med)}$ – valor medido del parámetro de navegación, llevado al momento medio del tiempo T_{med}.

Ti– momento enésimo de la medición.

La determinación del error cuadrático medio de la medición por ajuste interno se realiza fácilmente durante la navegación: este método se emplea a su vez para valorar los errores en mediciones de altas exactitudes. Pero éste no permite tener en cuenta la influencia de los errores sistemáticos, debido a que su magnitud no varía o varía muy poco al variar la medición. Por esta razón se debe tener en cuenta que en realidad los errores en la medición pueden resultar más grandes que los que se podían suponer en el resultado de tal apreciación, por lo que se debe referir a los resultados obtenidos con cautela.

En aquellos casos, cuando los resultados de tales experimentos semejantes no existen, al valorar la exactitud de medición se puede emplear las magnitudes de los errores cuadráticos medios, teóricamente calculados para determinadas condiciones medias (equipo corregido, observador de entrenamiento medio, ausencia de fallas considerable en las observaciones). Correspondientemente con estas condiciones las magnitudes cuadráticas medias de los posibles errores de medición (errores sistemáticos y totales) están expuestos en la tabla 8.6.

MAGNITUDES POSIBLES DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO EN LA MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS DE NAVEGACIÓN

Tabla 8.6

Equipo o Instrumento	Parámetro de navegación	Errores sistemáticos		Errores casuales		Error total
		Causas	Magnitud	Causas	Magnitud	
Girocompás	Marcación ver dadera al pun to notable.	a) Error en la determinación de la corrección del compás.	0,3 – 0,5°	a) Error en el manejo de la alida-da	0,2 – 0,5°	0,6 – ,5°
		b) Inestabilidad en el meridiano	0,3 – 0,5°	b) Error en la lectura	0,2 – 0,5°	
		c) Errores instru-mentales	0,2 – 0,3°			
		Suma	0,5 – 0,8°	Suma	0,3 – 0,7°	
Compás magnético	Marcación ver-dadera al pun - to notable.	a) Error en la de clinación.	1,0°	a) Oscilac. de la rosa	0,2 – 1,0°	1,3-1,6°
		b) Error en el desvio	0,5 – 1,0°	b) Error en el manejo de la alida.	0,3°	
		c) Errores instru-mentales	0,4°	c) Error en la lectura	0,3 °	
		Suma	1,2 – 1,5°	Suma	0,5 – 1,1°	
Sextante	a) Angulo hori-zontal.	a) Errores instru-mentales	0,5’	a) Error en la coinci - dencia de las imág.	1,0 – 2,0’	1,2 – 2,0’
		b) Error en la de terminación de la corrección de índice	0,4’	b) Error en la lectura	0,1 - 0,2’	
		Suma	0,7’	Suma	1,0 – 2,0’	
	b) Angulo verti cal.	a) Errores instru-mentales	0,5’	a) Error en la coinci-dencia de las imág.	0,7’	1,0’
		b) Error en la determinación de la corrección de índice	0,4’	b) Error en la lectura	0,1 - 0,2’	
		Suma	0,7’	Suma	0,7’	

Tabla 8.6 (Continuación)

Equipo o Instrumento	Parámetro de navegación	Errores sistemáticos		Errores casuales		Error total
		Causas	Magnitud	Causas	Magnitud	
Radiogonió-metro	Marcación ver-dadera al radio faro	a) Errores en la indicación del rumbo. b) Error en el ra-diodesvio c) Errores instru-mentales.	0,5– 0,8° 1,0° 0,5°	a) Error en el estable-cimiento del mínimo b) Efecto nocturno c) Error en la lectura	0,5 – 0,7 0,3 – 1,0° 0,2°	1,5 – 2,0
		Suma	1,4°	Suma	0,6 – 1,2	
Radar de navegación	a) Marcación verdadera a un objeto puntual. .	a) Error en el rumbo b) Errores instru-mentales.	0,5 – 0,8° 0,5 – 0,8°	a) Error en la manipu-lación del visor. b) Error en la lectura	0,3 – 1,0° 0,2°	0,5 –1,0 %
	b) Distancia hasta el objeto puntual	Error de calibra-bración	0,2 cables	Error en la conducción del anillo móvil	0,5 –1,0 %	0,5 –1,0 % del límite del valor de la escala

8.17 Error cuadrático medio de la línea de posición

Los inevitables errores casuales que son admitidos en la medición de los parámetros de navegación (marcaciones, distancias, ángulos horizontales, etc.), originan errores en las líneas de posición.

Veamos cuáles serán estos errores en dependencia de los gradientes y errores de los parámetros de navegación.

Supongamos que como resultado de la medición de cierto parámetro de navegación se obtuvo una línea isométrica, la cual en términos generales se expresa por la ecuación u = f(x , y).

Sustituyamos cerca de la posición de estima un segmento pequeño de la línea isométrica por una línea recta que será la línea de posición (Fig. 318).

Supongamos que en la medición del parámetro de navegación se admitió un error casual Δu. Como resultado de esto la línea de posición se desplazó por la normal en determinada distancia Δn. La magnitud del desplazamiento de la línea de posición en dependencia del error del parámetro de navegación y del gradiente se determina de la fórmula:

$$\Delta_n = \frac{\Delta_u}{g}. \qquad (335)$$

El gradiente del parámetro de navegación **g** para el punto dado es una magnitud constante. Entonces basándose en la fórmula 276 del error cuadrático medio de la función lineal, el error cuadrático medio de la línea de posición es igual a:

$$m_n = \frac{m_u}{g}. \qquad 336$$

donde m_n – error cuadrático medio de la línea de posición;

m_u – error cuadrático medio de la medición del parámetro de navegación.

Geométricamente el error cuadrático medio se puede interpretar de la siguiente forma. Si trazamos en la carta la línea isométrica o la línea de posición, entonces en el análisis del error en la determinación de la posición se debe considerar que el buque se encuentra en una franja de ancho ± m y no exactamente en la línea trazada (Fig. 318, b).

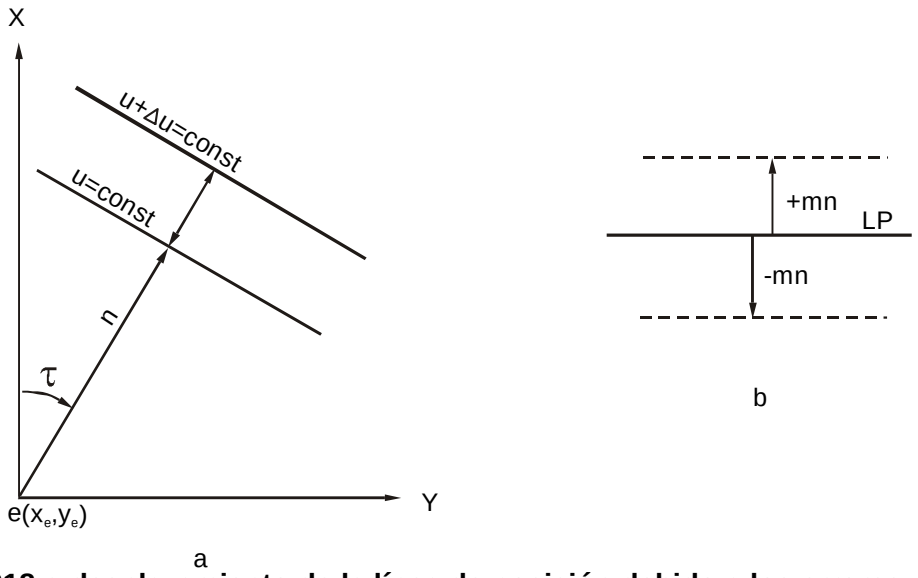


Fig.318 a-desplazamiento de la línea de posición debido a los errores casuales del parámetro de navegación; b-error cuadrático medio de la línea de posición

Ya que m_n es el error cuadrático medio, entonces la probabilidad de que el buque se encuentra en la franja ± m es igual a 68,3 %.

Ejemplo Se tomaron marcaciones a dos puntos notables con un error cuadrático medio de m° = ± 0,8°. La distancia desde el punto observado hasta los objetos es D_A = 36 cables, D_B = 120 cables.

Calcular el error cuadrático medio de la línea de posición.

Solución 1. Se calcula el valor de los gradientes de los parámetros de navegación para el punto observado:

$$g_A = \frac{57{,}3°}{D_A} = \frac{57{,}3°}{36} = 1{,}6\left(\frac{\text{grados}}{\text{cables}}\right);$$

$$g_B = \frac{57{,}3°}{D_B} = \frac{57{,}3°}{120} = 0{,}48\left(\frac{\text{grados}}{\text{cables}}\right).$$

2. Se calcula el error cuadrático medio de las líneas de posición:

$$m_A = \frac{m^\circ}{g_A} = \frac{0,8}{1,6^\circ/cab} = \pm 0,5 cables;$$

$$m_B = \frac{m^\circ}{g_B} = \frac{0,8}{0,48^\circ/cab} = \pm 1,6 cables.$$

8.18 Error cuadrático medio en la determinación de la posición del buque por dos líneas de posición

La determinación de la posición del buque con mayor frecuencia se realiza por dos líneas de posición. Por eso deduciremos una fórmula común para el cálculo del error cuadrático medio de la determinación de la posición por dos líneas de posición en general.

Supongamos que la posición observada del buque F se obtuvo por las líneas de posición aa y bb, las cuales se cortan con un ángulo θ (Fig. 319).

Si se supone que los parámetros de navegación fueron medidos sin errores, el punto F representa la posición verdadera del buque.

Sin embargo como resultado de los errores casuales en la medición de los parámetros de navegación Δu_1 y Δu_2 las líneas de posición se desplazan paralelamente a sí mismas en las magnitudes:

$\Delta p = \frac{\Delta u_1}{g_1}$ y $\Delta q = \frac{\Delta u_2}{g_2}$. Entonces la posición F_1 del buque será determinada en la intersección de las líneas de posición $a_1\ a_1$ y $b_1\ b_1$ con determinado error $\rho = FF_1$

La magnitud del error ρ se halla del triángulo FF_1 A por la fórmula:

$$\rho^2 = AF^2 + AF_1^2 - 2AF\,AF_1 \cos\theta. \qquad (337)$$

ó

$$\rho^2 = AF^2 + AF_1^2 - 2AF\,AF_1 \cos(180^\circ - \theta) \qquad (338)$$

De los triángulos AFB y AF_1E encontramos que:

$$AF = \frac{\Delta p^2}{sen\theta} \quad y \quad AF_1 = \frac{\Delta q^2}{sen\theta} \qquad (339)$$

Entonces

$$\rho^2 = \frac{\Delta p^2}{sen^2\theta} + \frac{\Delta q^2}{sen^2\theta} - 2\frac{\Delta p \Delta q \cos\theta}{sen^2\theta} \qquad (340)$$

En la deducción de la fórmula 340 se toman los valores unitarios de los errores de las líneas de posición Δp y Δq, los cuales dependen de los errores de los parámetros de navegación.

Pero en la medición de éstos hay que considerar que se permitieron una variedad de errores con diferente signo y valores, los que concretamente no conocemos, sino que podemos sólo calcular en qué límites ellos se encuentran. Por consiguiente también los errores en las líneas de posición pueden variar en valor y signo.

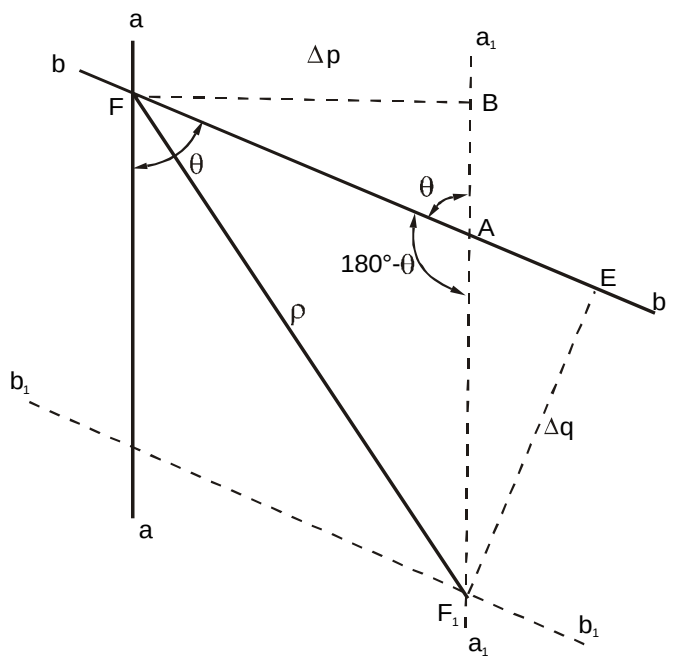


Fig. 319 Error cuadratico medio en la determinación de la posición del buque por dos línea de posición

De esta forma en dependencia de la magnitud y signo de los errores casuales de los parámetros de navegación, correspondientemente obtenemos los errores en magnitud y signo en la línea de posición y por ende un sistema de ecuaciones análogas a la ecuación 340.

Consideremos la existencia de tal sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
\rho_1^2 &= \frac{1}{\text{sen}^2\theta}\left(\Delta p_1^2+\Delta q_1^2-2\Delta p_1\Delta q_1\cos\theta\right);\\
\rho_2^2 &= \frac{1}{\text{sen}^2\theta}\left(\Delta p_2^2+\Delta q_2^2-2\Delta p_2\Delta q_2\cos\theta\right);\\
\rho_3^2 &= \frac{1}{\text{sen}^2\theta}\left(\Delta p_3^2+\Delta q_3^2-2\Delta p_3\Delta q_3\cos\theta\right);\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
\rho_n^2 &= \frac{1}{\text{sen}^2\theta}\left(\Delta p_n^2+\Delta q_n^2-2\Delta p_n\Delta q_n\cos\theta\right).
\end{aligned} \tag{341}$$

Sumando estas ecuaciones y dividiéndola entre n obtenemos:

$$\frac{\sum\rho^2}{n}=\frac{1}{sen^2\theta}\left(\frac{\sum\Delta p^2}{n}+\frac{\sum\Delta p^2}{n}-\frac{2\cos\theta\sum\Delta p\Delta q}{n}\right). \tag{342}$$

En esta ecuación:

$\frac{\sum\rho^2}{n}=M^2$– cuadrado del error cuadrático medio en la determinación de la posición por dos lineas de posición.

$\sum \Delta p^2/n = m_1^2$ – cuadrado del error cuadrático medio de la primera línea de posición.

$\sum \Delta p^2/n = m_2^2$ – cuadrado del error cuadrático medio de la segunda línea de posición.

El último término de la ecuación $2\cos\theta \sum \Delta p \Delta q/n = 0$ ya que la suma de los productos $\Delta p \Delta q$ tiene igual probabilidad de aparición; son iguales en magnitud pero de signos contrarios, por esta razón $\sum \Delta p \Delta q = 0$

Realizando la correspondiente sustitución en la ecuación 342 obtenemos la fórmula para el cálculo del error cuadrático medio en la determinación de la posición por dos líneas de posición:

$$M^2 = \frac{1}{\text{sen}^2\theta}(m_1^2 + m_2^2) \qquad (343)$$

$$\text{ó} \quad M = \frac{1}{\text{sen}\,\theta}\sqrt{(m_1^2 + m_2^2)} \qquad (344)$$

Considerando que los errores cuadráticos medios m_1 y m_2 de las líneas de posición se calculan por la fórmula $m = m_u/g$, la fórmula 324 se puede escribir de la siguiente forma:

$$M = \frac{1}{\text{sen}\theta}\sqrt{\frac{m_{u1}^2}{g_1^2} + \frac{m_{u2}^2}{g_2^2}}. \qquad (345)$$

donde m_{u1} y m_{u2} – errores cuadráticos medios de la medición de los parámetros de navegación;

g_1 y g_2 – gradientes de los parámetros de navegación.

La fórmula 345 es universal para el cálculo del error cuadrático medio en la determinación de la posición del buque por dos líneas de posición cualesquiera.

De las fórmulas 344 y 345 se observa que en términos generales la exactitud de la determinación de la posición del buque depende de los siguientes factores:

1.Valor del ángulo de intersección θ de las líneas de posición. Cuanto más se aperoxime este ángulo a 90°, mayor será la exactitud en la determinación posición del buque, en igualdad de condiciones. Habitualmente se considera que cuando el ángulo de intersección de las líneas de posición es menor de 30° o mayor de 150° la posición del buque se considerará no confiable.

2. Exactitud de la medición de los parámetros de navegación. Cuanto menor sea el error cuadrático medio en la medición de los parámetros de navegación, mayor será la exactitud en la determinación de la posición. Por eso es necesario tratar de utilizar equipos más exactos en la determinación de la posición y realizar las mediciones con mayor cuidado. Además deben medirse los parámetros de navegación más de una vez y luego calcular su valor medio aritmético, ya que el error cuadrático medio del valor medio obtenido de observaciones de igual exactitud, es menor que el error cuadrático medio de una medición aislada.

3. Magnitud de los gradientes de los parámetros de navegación. Cuanto mayor sean éstas mayor será la exactitud de la posición determinada.

El error cuadrático medio M permite comparar las exactitudes de las posiciones determinadas por diferentes procedimientos. Cuanto menor sea el error cuadrático medio, mayor será la exactitud de la posición observada.

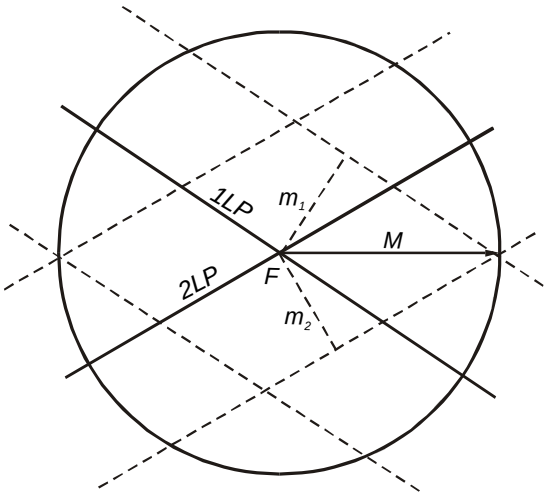


Fig. 320 Paralelogramo y círculo del error cuadrático medio en la determinación de la posición del buque por dos líneas de posición

La sencillez de los cálculos y la posibilidad de utilización para la valoración general sobre la exactitud de la determinación de la posición son las ventajas del error cuadrático medio como criterio de exactitud en la determinación de la posición.

Si se traza una circunferencia alrededor de la posición observada con un radio igual al error cuadrático medio M, la probabilidad de que la posición del buque se encuentre dentro de esta circunferencia oscila de 63,2 a 68,3 %.

Sin embargo la circunferencia de radio M considerablemente no corresponde a la forma real de la figura del error (Fig. 320). Además el error cuadrático medio no permite valorar la magnitud del posible error de la posición observada en la dirección dada.

Por eso, cuando es necesario una valoración más estricta de la exactitud de la posición observada o cuando es necesario conocer el error de la posición observada en la dirección dada, es necesario considerar y construir la elipse de errores.

8.19 Conceptos sobre los errores vectoriales y conversión de los errores de las líneas de posición en errores vectoriales

Los errores casuales se caracterizan no sólo por su magnitud, sino también por su dirección.

Por ejemplo en la medición de distancias hasta los objetos los errores casuales estarán dirigidos por la marcación hacia el objeto y en sentido contrario (Fig. 321).

El sistema de los posibles errores casuales que actúan en determinada dirrección en sentidos opuestos, se llama **error vectorial.**

Los errores vectoriales posen las siguientes propiedades principales.

1. Los errores vectoriales que actúan en una dirección se suman cuadráticamente:

$$V=\sqrt{V_1^2+V_2^2+V_3^2+...+V_n^2}.$$

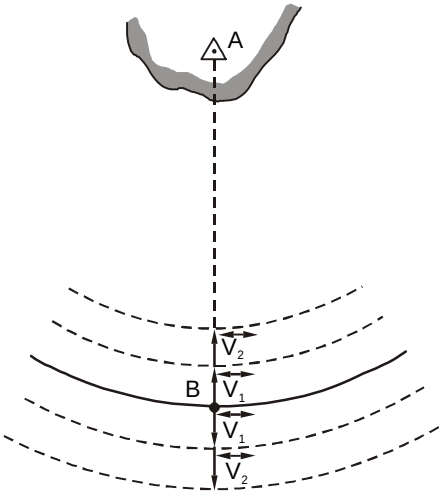


Fig.321. Errores Vectoriales

2. Los errores vectoriales se pueden proyectar en diferentes direcciones (ejes). Estas proyecciones son dependientes entre sí, ellas surgen a un mismo tiempo por las reglas de descomposición de los vectores en los ejes y sumados dan el error vectorial inicial.

3. Los errores vectoriales y sus proyecciones se someten a la ley de la distribución normal de os errores casuales.

Realicemos el paso de los errores cuadráticos medios de las líneas de posición a los errores vectoriales. Sea el punto F la posición observada del buque obtenida por dos líneas de posición, que se cortan con el ángulo θ , y m_1 y m_2 serán los errores cuadráticos medios de las líneas de posición (Fig. 322).

Como resultado del error $\pm m_1$ de la primera línea de posición; la posición observada se desplazará por la segunda línea de posición. Este desplazamiento puede caracterizar al error vectorial $\overline{V}_1$.
El error $\pm m_2$ de la segunda línea de posición origina el desplazamiento de la posición observada F por la primera línea de posición, la cual se puede caracterizar por el error vectorial $\overline{V}_2$.

Conversión de los errores de las líneas de posición en errores vectoriales.

Por consiguiente el sistema de los errores vectoriales $\overline{V}_1$ y $\overline{V}_2$ es equivalente al sistema de errores de las líneas de posición $\pm m_1$ y $\pm m_2$ y la dirección de la línea de posición son los ejes de acción de los errores vectoriales. Las magnitudes de estos errores se determinan de los triángulos FAB y FCE por las siguientes fórmulas:

$$V_1=\frac{m_1}{sen\theta}; \qquad V_2=\frac{m_2}{sen\theta}. \qquad (346)$$

ó en forma general:

$$V_i = \frac{m_i}{sen\,\theta}. \qquad (347)$$

Trazando segmentos desde el punto F a lo largo de la primera línea de posición hacia ambos lados, que sean iguales al error $\overline{V}_2$, y a lo largo de la segunda línea segmentos iguales al error vectorial $\overline{V}_2$ y trazando rectas paralelas a través de los puntos A, A_1, C y C_1 a las líneas de posición, obtendremos el paralelogramo NN' HH', en cuyos limites se encuentra la posición más probable del buque.

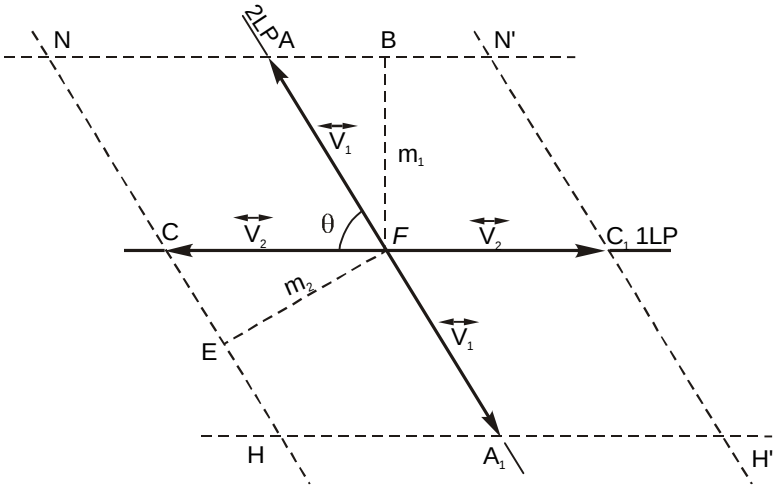


Fig.322. Conversión de los errores de las líneas de posición a errores vectoriales.

La probabilidad de que buque se encuentre en la franja de desplazamiento de la primera línea de posición observada en $\pm m_1$ es igual a 0,683 (68,3%), la probabilidad de que buque se encuentre en la franja del desplazamiento de la segunda línea de posición observada en $\pm m_2$ tambien es igual 0,683. (Punto 8.16)

Por tanto la probabilidad de que buque se encuentre en los límites del área del **paralelogramo** NN' HH' será igual al producto de estas probabilidades, es decir:

$$P = P_{m_1} P_{m_2} = 0{,}683x0{,}683 = 0{,}466;$$

$$P = 46{,}6\%$$

Los paralelogramos dan la posibilidad de apreciar la posible magnitud y carácter del error del punto observado. Sin embargo la caracterización de los errores en la posición con ayuda del paralelogramo es bastante incompleta y la construcción de estos paralelogramos en ocasiones es muy compleja, por ejemplo cuando se determina la posición por varias (más de dos) líneas de posición. Por eso se utiliza un procedimiento más completo de caracterización de los errores en las posiciones, el cual conlleva el cálculo y construcción de la **elipse de los errores cuadráticos medios.**

8.20. Suma de dos errores vectoriales en la elipse de errores.

Tomemos como origen de coordenadas el punto observado F, obtenido por dos líneas de posición y por ejes de coordenadas tomemos a X y Y que son las líneas de posición (Fig. 323).

Los errores vectoriales $\overline{V}_1$ y $\overline{V}_2$ caracterizan el desplazamiento de las líneas de posición, es decir, son los errores cuadráticos medios de las líneas de posición en las direcciones de los ejes de coordenadas.

Como resultado de diferentes combinaciones de errores parciales dirigidos a lo largo de los ejes de coordenadas X y Y, obtenemos una multitud de errores: los vectores FB_i.

Determinemos la ecuación de la línea curva que contornea los extremos de todos los vectores FB_i, los cuales poseen igual probabilidad de aparición.

Los errores que actúan a lo largo de los ejes X y Y se someten a la ley de la distribución normal. La probabilidad de su surgimiento se caracteriza por la ecuación de Gauss:

$$dP_{(x)} = \frac{1}{V_1\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2v_1^2}} dx \qquad (348)$$

$$dP_{(y)} = \frac{1}{V_2\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2v_2^2}} dy$$

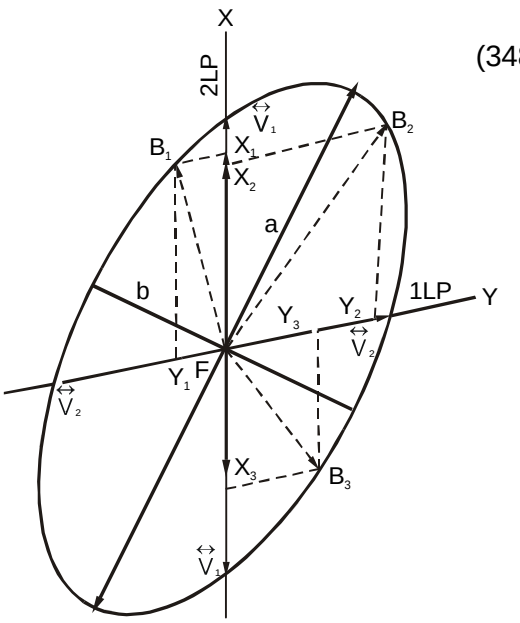


Fig.323. Suma de dos errores vectoriales en la elipse de errores

donde X y Y – valores actuales de los errores, cuyas probabilidades es necesario calcular

V_1 y V_2 – errores vectoriales (cuadráticos medios) en las direcciones de los ejes de coordenadas.

La probabilidad de surgimiento del error resultante FB_i como un suceso complejo es igual a la multiplicación de las probabilidades de las componentes de los errores en los ejes X y Y:

$$P_{(x,y)} = dP_{(x)}dP_{(y)} = \frac{1}{2\pi V_1 V_2} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{v_1^2}+\frac{y^2}{v_2^2}\right)} dxdy. \qquad (349)$$

En la fórmula 349 las magnitudes variables son solamente los errores x y y, por eso para la obtención de la constancia de la probabilidad $P_{(x,y)}$ es necesario y suficiente que el exponente de la potencia e sea constante, es decir:

$$\frac{x^2}{v_1^2} + \frac{y^2}{v_2^2} = C^2 \qquad (350) \qquad \text{ó} \qquad \frac{x^2}{C^2 v_1^2} + \frac{y^2}{C^2 v_2^2} = 1 \qquad (351)$$

La igualdad 351 representa la ecuación de una elipse con los semiejes CV_1 y CV_2 yuxtapuestos y determina las coordenadas actuales de los puntos de esta elipse.

Los errores de todos los puntos que se encuentran en la elipse dada, tendrán igual probabilidad de surgimiento.

De esto se deduce que el área, en el interior de la cual se encuentra la posición probable del buque, se caracteriza no por el cuadrilátero, sino por la elipse de errores (Punto 8,16).

La probabilidad de que el buque se encuentre dentro de la elipse de los errores, construida con relación a la posición observada, depende de la magnitud del coeficiente C.

Cuando $C = 1$ la probabilidad es igual a 39,3% y la elipse se llama **elipse cuadrático medio o elipse de errores**.

Cuando $C = 2$ $P = 86{,}5\%$. Para $C = 3$ $P = 98{,}9\%$ y la elipse se denomina elipse límite. Los semiejes de la elipse límite son tres veces mayores que los ejes correspondientes de la elipse cuadrático medio. Los semiejes yuxtapuestos de la elipse cuadrática media son iguales a los errores vectoriales $\overline{V}_1$ y $\overline{V}_2$
.

La elipse de errores posee las siguientes propiedades:

- las dimensiones y orientaciones de la elipse de errores nos da una representación visual sobre la exactitud en la determinación de la posición en diferentes direcciones;

- la probabilidad de que el error casual – vector se encuentre dentro de los límites de la elipse de errores es mayor que para otra figura cualquiera de error que posea la misma área;

- entre todas las figuras, en cuyos límites la probabilidad de que se encuentre el buque son iguales, la elipse de errores posee la menor área.

Estas propiedades de la elipse de errores fundamentan su utilización de la exactitud de la posición del buque.

8.21. Cálculo de los elementos de la elipse de errores.

En cualquier método de determinación de la posición del buque el centro de la elipse de errores puede hacerse coincidir con la posición observada (la más probable) en la carta.

Los métodos más usuales para el cálculo de los elementos de la elipse de errores son los métodos analíticos y grafoanalíticos.

El **método analítico** para el cálculo de los elementos de la elipse de errores es comparablemente complejo y da la posibilidad de realizar la valoración de la exactitud en la determinación de la posición del buque sólo por dos líneas de posición.

El **método grafoanalítico** es el método más simple y universal, ya que permite realizar la valoración de la exactitud en la determinación de la posición ante cualquier número de líneas de posición. La esencia de este método se encierra en lo siguiente:

Cualquier número de líneas de posición reales que satisfacen los parámetros de navegación medidos, se pueden sustituir por líneas de posición equivalentes que se corten con un ángulo recto en la posición más probable buscada. Las líneas de posición equivalentes son correspondientemente paralelas a los

semiejes menor y mayor de la elipse de errores. Los semiejes de la elipse de errores se determinan en este caso a través de los pesos de las líneas de posición equivalentes.

El cálculo de los elementos de la elipse de errores se realiza en el siguiente orden:

1. Determinamos la dirección τ_i y la magnitud de los gradientes g_i de los parámetros de navegación.

2. Calculamos los pesos de las líneas de posición por las fómulas:

$P_i = \frac{g_i^2}{m_i^2}$ - cuando las mediciones de los parámetros de navegación son de desigual exactitud.

$P_i = g_i^2$ - cuando las mediciones de los parámetros de navegación son de igual exactitud.
donde m_i - error cuadrático medio en la medición del parámetros de navegación.

3 Calculamos la suma de los pesos de las líneas de posición equivalentes, la cual es igual a la suma de los pesos de todas las líneas de posición iniciales:

$$P_{max} - P_{min} = \Sigma P_i, \qquad (352)$$

donde P_{max} y P_{min} - valores máximo y mínimo de los pesos del par de líneas de posición equivalentes, el cual sustituye el sistema real de líneas de posición.

4. Construimos el asi llamado polígono cuadrático (polígono de los pesos), para lo cual en una hoja de papel desde un punto arbitrario A se traza formando un ángulo $2\tau_1$ con el meridiano verdadero en la escala seleccionada, un vector con un peso igual P_1de la primera línea de posición. Desde su extremo se traza el vector igual al peso P_2de la segunda línea de posición formando un ángulo $2\tau_2$con el meridiano verdadero y así sucesivamente (Fig. 324).

Con esta misma escala medimos la longitud del vector que cierra el polígono. Esta longitud será igual a la diferencia de los pesos de las líneas de posición equivalentes:

$$P_{max} - P_{max} = \left|\Sigma \overline{P_i}\right| \qquad (353)$$

5. Medimos el ángulo 2T entre el meridiano verdadero y el vector que cierra el polígono cuadrático, es decir el ángulo Tes la marcación, en la cual está dirigido el eje menor de la elipse de error.

.

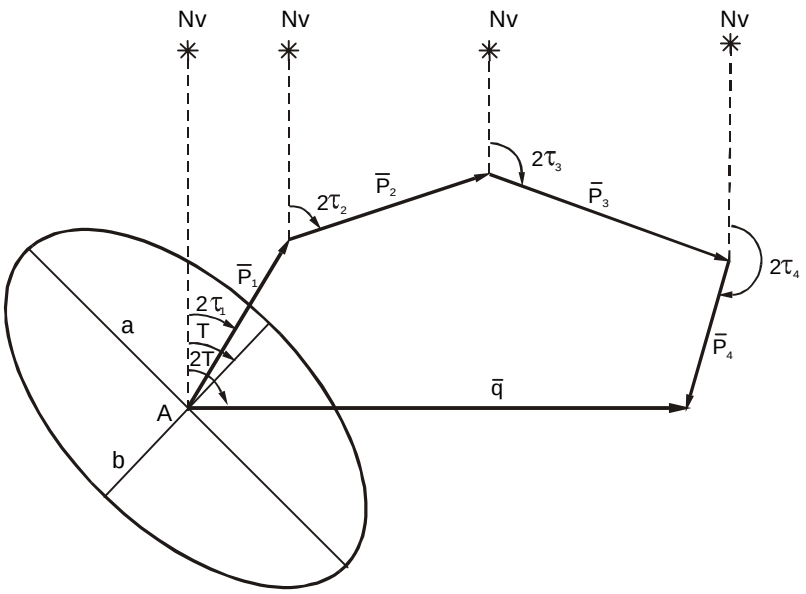


Fig.324. Método grafoanalítico del cáculo de los elementos de la elipse de error.

6. De la ecuación 352 y 353 determinamos los pesos de las líneas de posición equivalentes:

$$P_{max} = \frac{1}{2}\left(\sum P_i + q\right), \qquad (354)$$

$$P_{min} = \frac{1}{2}\left(\sum P_i + q\right). \qquad (355)$$

7. Calculamos las magnitudes de los semiejes de la elipse de errores:

$$a = \sqrt{\frac{1}{P_{min}}}; \qquad (356)$$

$$a = \sqrt{\frac{1}{P_{max}}}. \qquad (357)$$

La elipse cuadrática de errores se construye en el punto observado de acuerdo a los elementos a, b y T. Conociendo las dimensiones de los semiejes de la elipse de errores es muy fácil determinar el error cuadrático medio de la posición observada por la fórmula:

$$M = \sqrt{a^2 + b^2}. \qquad (358)$$

Ejemplo. La posición del buque se determinó por marcaciones a tres puntos notables. los valores de las marcaciones y las distancias tomadas de la carta fueron las siguientes:

$Mv_1 = 30°$ $D_1 = 20$ millas
$Mv_2 = 80°$ $D_2 = 15$ millas
$Mv_3 = 110°$ $D_3 = 10$ millas

Valorar la exactitud de la posición, si todas las marcaciones se midieron con un error cuadrático medio igual a ± 10°.

Solución. 1. Calculamos la dirección de los gradientes rotados, sus magnitudes, los pesos de la línea de posición y sus sumas.

Solución. 1. Calculamos la dirección de los gradientes rotados, sus magnitudes, los pesos de la línea de posición y sus sumas.

Tabla 8.7

N°de la línea de posición	τ_i^*	D(Millas)	$g_i \frac{\text{grados}}{\text{millas}}$	$p_i = \frac{g_i^2}{m_i^2}$	$2\tau_i^*$
1	30	20	2,8	7,9	60
2	80	15	3,8	14,4	160
3	110	10	5,7	32,5	220
				$\sum p_i = 548$	

2. Construtamos el polígono cuadrático (Fig. 324a) y midamos la longitud del lado que cierra el polígono: q=35,4.

3. Midamos el ángulo 2T*, el cual cerrando el polígono forma con la línea del meridiano (2T*=194°), donde T*=97°. Debido a que operamos con los gradientes rotados 90°, la magnitud T* representa la dirección del eje mayor de la elipse de errores.

4. Hallemos el peso de las líneas de posición equivalente.

$$P_1 = \frac{1}{2}\left(\sum_{i=1}^{n} p_i + q\right) =$$

$$= \frac{1}{2}(54{,}8 + 35{,}4) = 45{,}1$$

$$P_2 = \frac{1}{2}\left(\sum_{i=1}^{n} p_i - q\right) =$$

$$= \frac{1}{2}(54{,}8 - 35{,}4) = 9{,}7$$

5. Calculemos las dimensiones de los semiejes de la elipse cuadrática de errores:

$$a = \sqrt{\frac{1}{P_2}} = \frac{1}{3{,}1} = 0{,}32 \text{ millas} = 3{,}2 \text{ cables}$$

$$b = \sqrt{\frac{1}{P_1}} = \frac{1}{6{,}7} = 0{,}15 \text{ millas} = 1{,}5 \text{ cables}$$

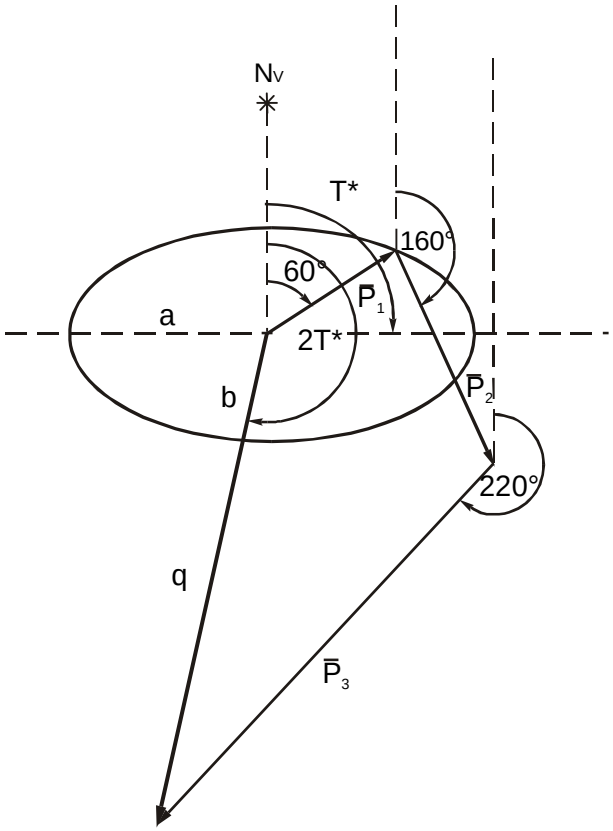


Fig.324a.

CAPITULO IX

VALORACIÓN DE LA EXACTITUD DE DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DEL BUQUE POR DOS LÍNEAS DE POSICIÓN.

Capítulo IX

VALORACIÓN DE LA EXACTITUD DE DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DEL BUQUE POR DOS LÍNEAS DE POSICIÓN

9.1 Valoración de la exactitud de determinación de la posición por dos marcaciones.

Las marcaciones tomadas por cualquier método accesible al navegante y medidas cuidadosamente, contienen siempre errores, los cuales son las causas de la inexactitud en la determinación de la posición.

El error cuadrático medio de la marcación visual medida con ayuda del girocompás, es aproximadamente de 0,6°-1,0°. Este se caracteriza por los errores casuales de orientación de la alidada hacia el objeto y de la lectura de la marcación asi como el error sistemático en la corrección del compás, el error sistemático por la inestabilidad del girocompás en el meridiano y los errores sistemáticos instrumentales.

El error cuadrático medio de la marcación medida con ayuda del compás magnético puede alcanzar 1,3°-1,6°. Este se caracteriza por el error sistemático originado por las oscilaciones de la rosa del compás, los errores casuales en la orientación de la alidada hacia el punto noteble y la lectura de la marcación así como los errores sistemáticos instrumentales y los errores sistemáticos de la declinación magnética y el desvío.

El error cuadrático medio resultante de la radiomarcación medida a un radiofaro circular por la vía auditiva puede ser considerada a 1,5°-2,0° y con ayuda de la radiomarcación automática igual a 0,0°-4,0°.

Este error es insignificante y en los radiofaros modernos no supera 0,1°.

Los errores originados por las condiciones de propagación de las ondas de radio suceden durante la noche a causa de la deformación del diagrama direccional de la emisión por las ondas especiales reflejadas en la ionosfera. La influencia de las ondas especiales se manifiesta en la distancia 250-300 millas del radiofaro, Los mayores errores se observan a distancias de 300-500 millas y pueden alcanzar ± 7°.

El error cuadrático medio sumario de la marcación, para cualquier dirección con relación a la normal de la base, puede ser calculado por la fórmula:

$$m_M^0 = (0{,}3° - 0{,}4°)\sec Q_P$$

De noche el error cuadrático medio a distancias D = 300 - 400 millas del radiofaro en los sectores 0-40° de la normal, alcanza $\pm 1{,}0°$ y en los sectores 40-60° aumenta hasta ± 2,0° y en ciertos casos alcanza ± 5,0°-7,0°.

Los errores cuadráticos medios señalados anteriormente de las marcaciones visuales y las radiomarcaciones fueron teóricamente calculados para ciertas condiciones medias (equipos corregidos, observador de entrenamiento medio, ausencia de interferencias considerables en las observaciones, etc). El error real de la marcación media puede diferenciarse en mayor o menor medida del valor teórico. Por eso en la valoración de la exactitud de la observación es necesario determinar el error cuadrático medio directamente antes de la determinación de la posición o tomar las observaciones anteriores realizadas por el mismo equipo en las condiciones iniciales.

La exactitud de la determinación de la posición por marcaciones a dos objetos se puede valorar por el error cuadrático medio (circular) o por la elipse cuadrática media.

Indudablemente, cuando es necesario una valoración más estricta de la posición, cuando se desea conocer los errores del punto observado en la dirección dada (navegación en los canales, rastreo, etc.), se deben calcular los elementos de la elipse de errores. La desventaja esencial de este método es su complejidad, por eso en los demás casos está establecido utilizar un método más simple para la valoración de la exactitud de la determinación de la posición por el cálculo del error cuadrático medio.

El error cuadrático medio de la posición observada por dos marcaciones se calcula por la fórmula (344):

donde: $$M = \frac{1}{\operatorname{sen}\theta}\sqrt{m_1^2 + m_2^2},$$

θ - ángulo de intersección de las líneas de posición (diferencia de las marcaciones);

m_1 y m_2 -errores cuadráticos medios de las líneas de posición o sus desplazamiento correspondientes a los errores cuadráticos medios de la determinación de las marcaciones.

En la determinación de la posición del buque por marcaciones, los errores cuadráticos medios son iguales a:

donde: $$m_1 = \frac{m_A^o}{g_A}; \quad m_2 = \frac{m_B^o}{g_B}. \qquad (359)$$

m_1 y m_2 - errores cuadráticos medios de la medición de las marcaciones a los objetos A y B

g_A y g_B - gradientes de las marcaciones a los objetos A y B.

Sustituyendo en la fórmula (359) los valores de los gradientes de las marcaciones

$$g_A = \frac{57{,}3°}{D_A}$$

$$g_B = \frac{57{,}3°}{D_B}$$

obtenemos

$$m_1 = \frac{D_A m°_A}{57{,}3°}, \quad m_2 = \frac{D_B m°_B}{57{,}3°}, \qquad (360)$$

donde

D_A y D_B distancia hasta lospuntos notables A y B.

Después de sustituir los valores de m_1 y m_2, la fórmula para el cálculo del error medio cuadrático de la determinación de la posición por dos marcaciones toma la siguiente forma:

$$M = \frac{1}{57{,}3°\operatorname{sen}\theta}\sqrt{\left(D_A m_A^0\right)^2 + \left(D_B m_B^0\right)^2}.$$

En las mediciones de igual exactitud de las marcaciones, $m_A^0 = m_B^0 = m_M^0$, tendremos:

$$M = \frac{m_M^0}{57{,}3° \operatorname{sen}\theta}\sqrt{D_A^2 + D_B^2}. \qquad (362)$$

Si la diferencia de distancia hasta los objetos no es muy grande, para simplificar los cálculos en la marcación visual se puede asumir que:

$$D_A^2 + D_B^2 = 2\left(\frac{D_A + D_B}{2}\right)^2 = 2D_m^2.$$

Entonces obtenemos una fórmula más simple para los cálculos del error cuadrático medio de la determinación de la posición por dos marcaciones visuales:

$$M = 1{,}4\frac{D_m m_M^0}{57{,}3° \operatorname{sen}\theta}. \qquad (363)$$

Del análisis de la fórmula (362) se puede observar que el error al determinar la posición por dos marcaciones es directamente proporcional al error en la marcación y depende del ángulo de intersección de las líneas de posición y la distancia hasta los puntos notables.

Para disminuir el error en la determinación de la posición es necesario seleccionar los objetos más cercanos que garanticen el ángulo de intersección de las marcaciones en los límites 30-150°.

Ejemplo. Calcular el error cuadrático medio en la determinación de la posición por dos radiomarcaciones, si θ = 56,0°; D_A = 45 millas; D_B = 63 millas .

Solución.

$$m_M^0 = \pm 1{,}5°$$

$$M = \frac{m_M^0}{57{,}3° \operatorname{sen}\theta}\sqrt{D_A^2 + D_B^2} = \frac{1{,}5°}{57{,}3° \operatorname{sen}\ 56{,}0°}\sqrt{45^2 + 63^2} = 2{,}4 \text{millas}.$$

9.2 Valoración de la exactitud de la posición obtenida por observaciones y estima.

En la determinación de la posición por marcación corrida, la línea de la primera marcación se traslada paralela a sí misma por la estima en la distancia recorrida por el buque en el tiempo entre las observaciones de las marcaciones.

Por eso la exactitud de determinación de la posición en este caso, paralelamente a los errores de las marcaciones y su ángulo de intersección, dependerá del error de estima durante la navegación entre la toma de las marcaciones (Fig. 324).

En este caso el error de determinación de la posición se expresa por la fórmula (344):

$$M = \frac{1}{\operatorname{sen}\theta}\sqrt{m_1^2 + m_2^2}.$$

El error cuadrático medio de la primera línea de posición es la suma de los errores originados por los errores en la marcación y los errores de estima, es decir

$$m_1^2 = \left(\frac{m_M^o}{g_1}\right) + M_e^2 = \left(\frac{m_M^o D_1}{57{,}3°}\right)^2 + M_e^2. \qquad (364)$$

donde

m_M^0 - error cuadrático medio de medición de la marcación;

g_1 - gradiente de la primera marcación;

D_1 - distancia hasta el objeto en el momento de medición de la primera marcación;

M_e - error cuadrático medio de la estima del buque durante la navegación entre la medición de las marcaciones.

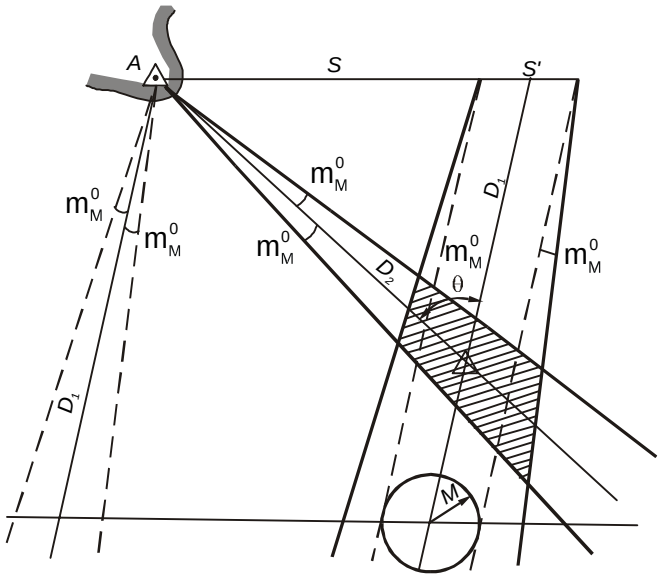


Fig.325. Error cuadrático medio de la posición optenida por estima y observaciones.

El error cuadrático medio de la segunda línea de posición:

$$m_2 = \frac{m_M^0}{g_2} = \frac{m_M^0 D_2}{57{,}3°}, \qquad (365)$$

donde

g_2 - gradiente de la segunda marcación;

D_2- distancia hasta el objeto en el momento de toma de la segunda marcación.

Sustituyendo los valores de m_1 y m_2 en la fórmula general obtenemos la expresión para el cálculo del error medio cuadrático de la posición observada y de estima:

$$M = \frac{1}{\operatorname{sen}\theta}\sqrt{\left(\frac{m_M^0 D_1}{57{,}3°}\right)^2 + \left(\frac{m_M^0 D_2}{57{,}3°}\right)^2 + M_e^2} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{m_M^0 D_1}{57{,}3° \operatorname{sen}\theta}\right)^2 + \left(\frac{m_M^0 D_2}{57{,}3° \operatorname{sen}\theta}\right)^2 + \frac{M_e^2}{\operatorname{sen}^2\theta}} \qquad (366)$$

ó $$M = \sqrt{M_0^2 + \frac{M_e^2}{\operatorname{sen}^2\theta}}, \qquad (367)$$

donde

M_O -error cuadrático medio de la determinación de la posición por dos marcaciones.

Análogamente se realiza por marcaciones tomadas en diferentes momentos a dos objetos.

La fórmula (367) muestra que las mejores condiciones de determinación de la posición por marcación corrida son:

- pequeñas distancias D_1 y D_2 hasta los objetos en el momento de toma de las marcaciones;
- ángulo de intersección de las marcaciones próximo a 90°.
- alta exactitud de la estima de la derrota en el tiempo entre la medición de las marcaciones.

Sin embargo cumplir estas condiciones no siempre es posible, ya que para que disminuya el error en la exactitud de la estima Me es necesario disminuir la distancia recorrida por el buque durante la toma de las marcaciones y para lograr un ángulo θ suficiente es necesario disminuir esta distancia.

Por consiguiente para aumentar la exactitud de determinación de la posición se debe seleccionar la relación más favorable entre el espacio y el ángulo θ , en los cuales el error cuadrático medio resultante sea mínimo.

Ejemplo. Calcular el error cuadrático medio de determinación de la posición por marcación corrida si el error de la marcación $m_M^0 = \pm 1{,}0°$; D_1=60 cables; D_3=70 cables; θ= 43°; el error en la derrota (Rumbo efectivo) es de $m_{Re} = \pm 1{,}2°$; $m_{c\%} = \pm 6\%$; S = 55cables.

Solución 1. Calculamos el error cuadrático medio de determinación de la posición por dos marcaciones:

$$M_0 = \frac{m_M^0}{57{,}3° \operatorname{sen}\theta}\sqrt{D_1^2 + D_2^2} = \frac{1}{57{,}3° \operatorname{sen}43°}\sqrt{60^2 + 70^2} = 2{,}4\text{cables.}$$

2. Calculamos el error cuadrático medio de la estima durante la navegación entre las marcaciones medidas:

$$M_e = \sqrt{\left(\frac{m_{Re}^0 S}{57{,}3°}\right)^2 + \left(\frac{S m_{\Delta c\%}}{57{,}3°}\right)^2} =$$

$$\sqrt{\left(\frac{1{,}2° x 55}{57{,}3°}\right)^2 + \left(\frac{0{,}6 x 55}{100}\right)^2} = 1{,}2\text{cables}$$

3. Calculamos el error cuadrático medio de la posición de estima observada:

$$M_e = \sqrt{M_0^2 + \frac{M_e^2}{sen^2\theta}} = \sqrt{(2{,}4)^2 + \left(\frac{1{,}2}{0{,}68}\right)^2} = 2{,}8 \text{cables.}$$

9.3 Valoración de la determinación de la posición por dos ángulos.

La determinación de la posición por dos ángulos horizontales medidos con el sextante es la más exacta de todos los métodos visuales.

El ángulo horizontal entre los objetos costeros pueden ser medidos con ayuda del sextantes con un error cuadrático medio $m'_\alpha = 1{,}2' - 2{,}0'$. .

Este error sumario se forma por el error instrumental, el error de determinación de la corrección de índice, el error de coincidencia de la imagen de los objetos y el error en la lectura del ángulo.

En la valoración de la exactitud de la observación además de los errores de medición de los ángulos, es necesario considerar los errores de las construcciones geométricas en la carta o la plancheta así como los errores del instrumento, que se utilizaron en su construcción.

El error cuadrático medio del ploteo del ángulo con ayuda del transportador de tres brazos se puede considerar igual a ± 5,0'.

Entonces el error cuadrático medio sumario de medición y ploteo de los ángulos será:

$$m_\alpha = \sqrt{(2')^2 + (5')^2} = 6' = 0{,}1°.$$

Si para el ploteo de la posición, en lugar del transportador de tres brazos se utiliza papel de calco (alba), el error del ángulo se puede considerar igual a $m_\alpha^0 = 0{,}2°$.

Para la valoración de la exactitud de determinación de la posición por dos ángulos, utilizamos la fórmula de valoración del error cuadrático medio por dos líneas de posición (344).

$$M = \frac{1}{sen\theta}\sqrt{m_1^2 + m_2^2}.$$

Los errores cuadráticos medios de los ángulos horizontales son iguales unos a otros, es decir .
Entonces los errores cuadráticos medios de las líneas de posición serán iguales, o sea $m_\alpha^0 = m_\beta^0 = m^0$.

$$m_1 = \frac{m^0}{g_\alpha} = \frac{D_A D_B m^0}{53{,}7° D_{AB}};$$
$$m_2 = \frac{m^0}{g_\beta} = \frac{D_B D_C m^0}{53{,}7° D_{BC}}. \qquad (368)$$

donde

g_α, g_β - gradientes de los ángulos horizontales α y β
D_A, D_B, D_C - distancia hasta los objetos A,B,C
D_{AB}, D_{BC} - distancia entre los objetos correspondiente

Sustituyendo los valores m_1 y m_2 en la formula inicial obtenemos la expresión para el cálculo del error medio cuadrático de la posición obtenida por dos ángulos:

$$M = \frac{m^\circ D_B}{57{,}3^\circ \operatorname{sen}\theta}\sqrt{\left(\frac{D_A}{D_{AB}}\right)^2 + \left(\frac{D_C}{D_{BC}}\right)^2}; \qquad (369)$$
$$= \frac{m' D_B}{3438' \operatorname{sen}\theta}\sqrt{\left(\frac{D_A}{D_{AB}}\right)^2 + \left(\frac{D_C}{D_{BC}}\right)^2}$$

El ángulo de intersección de las líneas de posición puede ser determinado como el complemento de 360° de la suma de los ángulos medidos y el ángulo en la base del objeto central;

$$\theta = 360^\circ - (\alpha + \beta + B^\circ) \qquad (370)$$

La fórmula (369) es incomoda porque exige cálculos muy grandes.

La tarea de la valoración de la exactitud de la observación se simplifica considerablemente si se construye el triángulo de los gradientes.

Para ello calculamos los gradientes de la direcciones g_A, g_B, g_C por la fórmula $g_i = \frac{57{,}3^\circ}{D_i}$ y lo construimos en la posición observada rotado en sentido horario en 90° (Fig. 326). Entonces éstos coinciden con las correspondientes direcciones a los objetos A, B y C.

El vector $\bar{g}_\alpha$,que une los extremos de los vectores $\bar{g}_A$ y $\bar{g}_B$, estará rotado en 90° por el gradiente del ángulo α y el vector $\bar{g}_\beta$ que une los extremos de los vectores $\bar{g}_B$ y $\bar{g}_C$, y se encuentra rotado 90° por el gradiente del ángulo β.

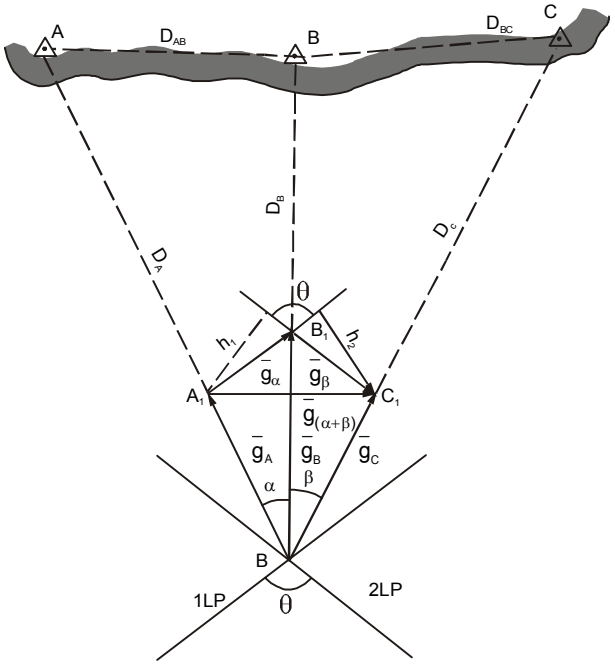


Fig.326 Valoración de la exactitud en la determinación de la posición por dos ángulos.

En el triángulo $A_1B_1C_1$ los lados $\overline{A_1B_1} = \bar{g}_\alpha$, $\overline{B_1C_1} = \bar{g}_\beta$, $\overline{A_1C_1} = \bar{g}_{(\alpha+\beta)}$.

Los gradientes de los ángulos rotados 90° $\bar{g}_\alpha$ y $\bar{g}_\beta$ son paralelos a las líneas de posición respectivmente.

Por consiguiente el ángulo entre las direcciones de los gradientes es igual al ángulo de intersección (θ) de las líneas de posición.

Del triángulo A_1, B_1, C_1 se determina las magnitudes de los gradientes de los ángulos $\bar{g}_\alpha$ y $\bar{g}_\beta$ y el ángulo de intersección de las líneas de posición θ es fácil calcular el error medio cuadrático de la posición observada por la fórmula.

$$M = \frac{1}{\operatorname{sen}\theta}\sqrt{\left(\frac{m'_\alpha}{g_\alpha}\right)+\left(\frac{m'_\beta}{g_\beta}\right)}. \qquad (371)$$

Cuando $m'_\alpha = m'_\beta = m'$ la fómula tendrá la forma siguiente

$$M = \frac{m'}{\operatorname{sen}\theta}\sqrt{\frac{1}{g_\alpha^2}+\frac{1}{g_\beta^2}}. \qquad (372)$$

El profesor Kavraiskii V, V. Propuso la simplificación posterior de esta fórmula.
Desde los vértices A_1 y C_1 del triángulo de gradiente $A_1B_1C_1$ trazamos las alturas h_1 y h_2. De la fig. 326 se puede observar que:

$$h_1 = g_\alpha \operatorname{sen}\theta; \quad h_2 = g_\beta \operatorname{sen}\theta;$$

Entoces

$$g_\alpha = \frac{h_1}{\operatorname{sen}\theta}; \quad g_\beta = \frac{h_2}{\operatorname{sen}\theta}.$$

Sustituyendo los valores de g_α, g_β en la fórmula (372) obtenemos

$$M = m'\sqrt{\frac{1}{h_1^2}+\frac{1}{h_2^2}}. \qquad (373)$$

La construcción del triángulo inverso y el cálculo del error cuadrático medio medio de la observación se realiza de la siguiente forma:

1 - de la carta o plancheta se toman distancias D_A, D_B, D_C de la posición observada hasta los puntos notables en millas.

2 - calculamos los gradientes g_A, g_B, g_C, de las direcciones a los puntos notables en minutos por metro de desplazamiento de la línea de posición para aumentar la escala del triángulo invertido multiplicamos éstos por el coeficiente K (cualquier número entero, por ejemplo 15, 20, 30):

$$g = \frac{3438'K}{1852D\text{millas}} = K\frac{1{,}86}{D}\left(\frac{\text{minutos}}{\text{metros}}\right);$$

3 - en una hoja limpia de papel construimos loa ángulos α y β y en las correspondientes direcciones a los objetos trazamos las magnitudes de los gradientes g_A, g_B y g_C (tomamos la escala: 1 unidad de gradientes =1 cm);

4 -los extremos de los segmentos trazados los unimos con líneas rectas y obtenemos el triángulo inverso $A_1B_1C_1$. Desde los vértices A_1 y C_1 que se encuentran en las direcciones límites del triángulo trazamos las alturas h_1 y h_2 en sentidos opuestos (Fig. 327);
5 -medimos las alturas h_1 y h_2 en centímetros y las sustituimos en la fórmula de trabajo

$$M = m'K\sqrt{\frac{1}{h_1^2} + \frac{1}{h_2^2}}.$$

Obtenemos el error cuadrático medio de determinación de la posición por dos ángulos en metros.
Al determinar la posición por dos ángulos es importante la correcta selección de los objetos, entre los cuales se miden los ángulos. Los puntos notables se pueden seleccionar por medio de la comparación directa de los errores M de varias combinaciones o con ayuda del triángulo inverso.

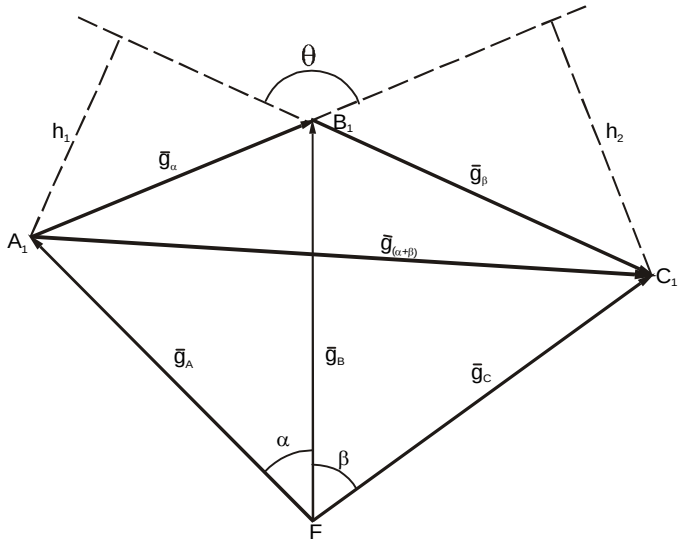


Fig. 327.Triángulo inverso.

Para la selección de la mejor combinación de los objetos en el último caso representemos la fórmula (372) de la siguiente forma:

$$M = m'\sqrt{\frac{g_\alpha^2 + g_\beta^2}{g_\alpha^2 g_\beta^2 \operatorname{sen}\theta}}.$$

Pero

$$g_\alpha g_\beta \operatorname{sen}\theta = g_\alpha h_2 = g_\beta h_1 = 2S_{inv}.$$

donde

S_{inv} -área del triángulo inverso.

Entonces el error de determinación de la posición será igual a

$$M = \frac{m'}{2S_{inv}}\sqrt{g_\alpha^2 + g_\beta^2} \qquad (374)$$

En la fórmula se observa que el error de la posición es menor, cuanto mayor sea el área del triángulo inverso y por ende la mejor combinación de los objetos es aquella, en la cual el triángulo inverso es mayor en área.

Ejemplo. Calcular el error cuadrático medio de determinación de la posición por dos ángulos si α= 30°; β= 60°, D_A= 10 millas, D_B= 8,5 millas, D_C= 9 millas y m'=± 3,0'.

Solución1. Calculamos los gradientes de las direcciones, considerando K= 30:

$$g_A = 30\frac{1{,}86}{10} = 5{,}6;$$

$$g_B = 30\frac{1{,}86}{8{,}5} = 6{,}6;$$

$$g_C = 30\frac{1{,}86}{9} = 6{,}2.$$

2. De acuerdo a α, β, g_A, g_B y g_C construimos el triángulo $A_1B_1C_1$ (Fig. 328). Desde los vértices A_1 y C_1 trazamos las alturas h_1 y h_2.

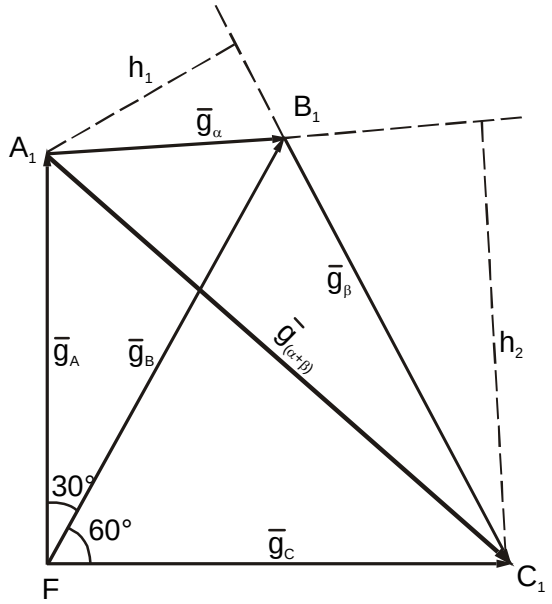


Fig. 328. Triángulo inverso para el ejemplo.

Tomemos del dibujo h_1= 2,5 cm, h_2= 6,2 cm y calculamos el error cuadrático medio de la observación:

$$M = m'K\sqrt{\frac{1}{h_1^2}+\frac{1}{h_2^2}} = 3'x30\sqrt{\left(\frac{1}{2{,}5}\right)^2+\left(\frac{1}{6{,}2}\right)^2} = 38{,}7\text{metros.}$$

9.4 Valoración de la exactitud en la determinación de la posición por dos distancia y por marcación y distancia.

La exactitud de las mediciones de distancia hasta los objetos depende ante todo de los medios técnicos y los instrumentos, con cuya ayuda éstas se realizaron.

En la medición de la distancia con ayuda de los radares el error cuadrático medio puede ser considerado igual a 0,5 - 1% del alcance límite de distancia en la escala dada. La exactitud práctica de medición de distancia debe determinarse por vía experimental en el ajuste de la estación en un polígono equipado

especialmente para ello.
Con ayuda de las estaciones hidroacústicas la distancia puede ser medida con un error de 0,5 - 1,7 cables.
Los SRN telemétricos por impulsos de corto alcance permiten medir la distancia hasta los objetos costeros con un error cuadrático medio de 20 - 30 metros.

En la utilización del sistema hidroacústico el error cuadrático medio puede calcularse por la fórmula

$$m_D = \sqrt{\left(Cm_t\right)^2 + \left(tm_c\right)^2} = \sqrt{\left(Cm_t\right)^2 + \left(\frac{D}{C}m_c\right)^2}, \qquad (375)$$

donde

C - valor medio de la velocidad del sonido en el mar;
m_t - error cuadrático medio de la medición del tiempo de propagación del sonido;
m_c - error cuadrático medio en la velocidad del sonido asumida;
t - tiempo de propagación del sonido desde la fuente hasta el buque;
D - distancia de la fuente de sonido hasta el buque.

Si la distancia se determinó por ángulo vertical medido al objeto, el error medio cuadrático m_D en la ausencia de error en la altura del objeto, puede ser determinado por la fórmula:

$$m_D = \frac{m'_\gamma}{\gamma'}, \quad (m_D) \text{ - ECM de la línea de posición debido cáculo de la distancia.} \qquad (376)$$

donde

$m'\gamma$ - error cuadrático medio de medición del ángulo vertical;
γ' - ángulo vertical
D - distancia hasta el objeto.

Para el cálculo del error cuadrático medio en la determinación de la posición por dos distancia utilizaremos la fórmula general (344).

$$M = \frac{1}{\operatorname{sen}\theta}\sqrt{m_1^2 + m_2^2}.$$

Ya que el gradiente de distancia g = 1, los errores cuadráticos medios de la línea de posición serán iguales a los errores cuadráticos medios de medición de distancias:

$$m_1 = \frac{m_{D1}}{g} = m_{D1}; \quad (m_1) \text{ - ECM de la línea de posición debido a la 1}^{ra} \text{ distancia.} \qquad (377)$$

$$m_2 = \frac{m_{D2}}{g} = m_{D2}. \quad (m_1) \text{ - ECM de la línea de posición debido a la 2}^{da} \text{ distancia.}$$

Entonces la fórmula del error cuadrático medio de determinación de la posición por dos distancias será de la siguiente forma

$$M = \frac{1}{\operatorname{sen}\theta}\sqrt{m_{D_1}^2 + m_{D_2}^2}. \qquad (378)$$

El ángulo θ corresponde a la diferencia de marcaciones entre los objetos. Esta diferencia puede ser medida en la carta después del ploteo de la posición observada.

En las mediciones de distancia hasta los objetos con igual exactitud, cuando m_{D1}, m_{D2}, m_{D3}la fómula (378) toma la forma:

$$M = 1{,}4\frac{m_D}{\text{sen}\theta} \qquad (379)$$

Como se observa de la fórmula (379), el error mínimo (M) aparecerá cuando el ángulo de intersección de las líneas de posición θ es igual o próximo a 90°.

En la determinación de la posición por marcación y distancia hasta el objeto el ángulo de intersección de las líneas de posición θ = 90° y los errores de las líneas de posición se determinan de las expresiones:

$$m_1 = \frac{m_M^0 D}{57{,}3°}; \qquad (m_1) \text{ - ECM de la línea de posición debido a la distancia.} \qquad (380)$$

$$m_2 = m_1 \qquad (m_2) \text{ - ECM de la línea de posición debido a la marcación.}$$

Entonces la fórmula para el cálculo del error cuadrático medio de la observación toma la siguiente forma:

$$M = \sqrt{\left(\frac{m_M^0 D}{57{,}3°}\right)^2 + m_D^2}, \qquad (381)$$

donde

m_M^0 - error de la marcación
m_D - error en la medición de la distancia;
D - distancia hasta el objeto

9.5 Valoración de la exactitud en la determinación de la posición por diferencias de distancias obtenidas con ayuda del SRN por impulsos.

En condiciones de navegación la determinación de la diferencia de distancia puede ser realizada por distintos métodos relacionados con la utilización de los SRN por impulsos, fases e impulso-fásicos.

El error en la determinación de la posición del buque por el SRN por impulsos "Loran" depende principalmente de la exactitud de medición, o sea, de la diferencia de los momentos de llegada de los impulsos desde las estaciones costeras.
La magnitud del error cuadrático medio de medición del parámetro de navegación por la onda superficial se suma de:

- los errores de sincronización de las estaciones maestras (1 μs);

- los errores de sincronismo de los frentes de los impulsos (1-3,5 μs).

- los errores instrumentales (1μs).

En la determinación de la posición por las ondas espaciales el error de medición del parámetro de navegación aumenta a causa del error en la corrección por el retardo de los impulsos espaciales.

El error cuadrático medio resultante de medición del parámetro de navegación puede alcanzar:

- en pequeños niveles de interferencia (onda superficial)

m_r=1,5-2,0 μs;

- en niveles considerables de interferencias (onda superficial).

$$m_r = 3\text{-}4\ \mu s;$$

Cuando se determina la posición por la onda espacial el error del parámetro de navegación m_r= 3 -5 μs y puede alcanzar valores considerablemente grandes.

Para el cálculo del error cuadrático medio de la observación se utiliza la fórmula general para dos líneas de posición (344).

$$M = \frac{1}{\operatorname{sen}\theta}\sqrt{m_1^2 + m_2^2}.$$

Ya que el gradiente de la diferencia de distancia es igual a $g = 2\operatorname{sen}\frac{\omega}{2}$, los errores cuadráticos m_1 y m_2 de las líneas de posición se determinan por las expresiones:

$$m_1 = \frac{0{,}16 m_{r1}}{2\operatorname{sen}\frac{\omega_1}{2}} = 0{,}08\frac{m_{r1}}{\operatorname{sen}\frac{\omega_1}{2}}; \qquad (m_1) \text{ - EMC de la línea de posición debido al } PN_1 \qquad (383)$$

$$m_2 = \frac{0{,}16 m_{r1}}{2\operatorname{sen}\frac{\omega_2}{2}} = 0{,}08\frac{m_{r2}}{\operatorname{sen}\frac{\omega_2}{2}} \qquad (m_2) \text{ - EMC de la línea de posición debido al } PN_2$$

donde

m_{r1}, m_{r2} - errores cuadráticos medio de los parámetros de navegación en microsegundos;
0,16 - coeficiente de conversión de microsegundos a millas;
ω_1, ω_2- ángulos de posición.

Sustituyendo m_1 y m_2 en la fórmula general obtenemos la expresión para el cálculo del error cuadrático medio de determinación de la posición por diferencias de distancias:

$$M = \frac{0{,}08}{\operatorname{sen}\theta}\sqrt{\left(\frac{m_{r1}}{\operatorname{sen}\frac{\omega_1}{2}}\right)^2 + \left(\frac{m_{r2}}{\operatorname{sen}\frac{\omega_2}{2}}\right)^2} \qquad (383a)$$

En las mediciones de igual exactitud de los parámetros de navegación, cuando $m_{r1} = m_{r2} = m_r$ tendremos que:

$$M = \frac{0{,}08}{\operatorname{sen}\theta}\sqrt{\frac{1}{\operatorname{sen}^2\frac{\omega_1}{2}} + \frac{1}{\operatorname{sen}^2\frac{\omega_2}{2}}}. \qquad (384)$$

Los ángulos ω_1, ω_2 y $\theta = \frac{A_1 + A_2}{2}$ se toman directamente de la carta.

Para la determinación de la posición con ayuda de los SRN por impulsos y diferencias de distancias, como regla, se confeccionan cartas especiales con las redes de líneas isométricas (hipérbolas) trazadas.

El cálculo del error cuadrático medio del punto observado puede ser simplificado considerablemente si se utiliza este tipo de carta, evitando cálculos prolongados al utilizar las fórmulas (363) y (364) (Fig. 329).

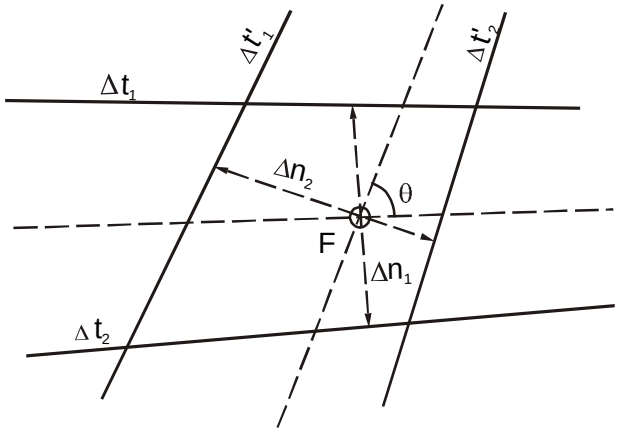


Fig.329. Valoración de la exactitud en la determinación de la posición por los SRN de impulsos con la utilización de carta con redes de líneas isométricas .

En la región donde se obtuvo la posición observada del buque fueron tomadas de la carta las distancias Δn_1 y Δn_2 entre líneas isométricas vecinas (desplazamiento de las líneas isométricas) en millas y calculamos las diferencias correspondientes a estas líneas isométricas de los parámetros de navegación (variación de la función)

$$\Delta u_1 = \Delta t_1 - \Delta t_2; \qquad (385)$$
$$\Delta u_2 = \Delta t_1^{'} - \Delta t_2^{'}.$$

Calculamos los siguientes:

$$g_1 = \frac{\Delta u_1}{\Delta n_1}; \quad g_2 = \frac{\Delta u_2}{\Delta n_2}. \qquad (386)$$

Sustituyendo en la fórmula general los gradientes g_1 y g_2, obteniendo una fórmula más simple para el cálculo del error medio cuadrático de la posición observada:

$$M = \frac{1}{sen\,\theta}\sqrt{\left(\frac{m_{r_1}\Delta n_1}{\Delta u_1}\right)^2 + \left(\frac{m_{r_2}\Delta n_1}{\Delta u_1}\right)^2}, \qquad (387)$$

donde:

θ - ángulo de intersección de las líneas isométricas tomado de la carta;
m_{r1}, m_{r2} - errores cuadráticos medios de medición de los parámetros de navegación, μs;
Δn_1, Δn_2 - desplazamiento de las líneas isométricas, millas;
Δu_1, Δu_2 - variación de las funciones en el desplazamiento de las líneas isométricas en Δn_1 y Δn_2, μs.

9.6 Valoración de la exactitud de la posición determinada por diferencias de distancias medidas con ayuda del SRN por fases.

En la determinación de la posición con ayuda del SRN por fases en el buque directamente se mide la diferencia de fases de las oscilaciones electromagnéticas que lleguan desde las estaciones maestra y secundaria.

Por consiguiente el error de la posición dependerá de los errores de medición de las diferencias de fase y magnitud del ángulo de intersección de las lineas de posición.

La práctica de utilización de los sistemas fásicos muestra que el error medio cuadrático sumario en la medición de la diferencia de fases puede alcanzar ± 15 -20°. De noche este error puede incrementarse.

El error en la determinación de la diferencia de distancias que ocurre por los errores en la medición de las diferencias de fases puede calcularse por la fórmula.

$$m_{\Delta D} = \frac{\lambda}{360°} m^0_{\Delta\varphi}, \qquad (388)$$

donde $m_{\Delta D}$ – error cuadrático medio cuadrático de la diferencia de distancia (m) ;
λ – longitud de onda correspondiente a la frecuencia de comparación (m);
$m^0_{\Delta\varphi}$ – error cuadrático medio de la medición de la diferencia de fase (gra).

Ya que el receptor- indicador fásico de a bordo permite medir la diferencia de fase en divisiones de un ciclo fásico y el valor de una división es igual a 1/100 , el error determinado por la diferencia de distancia , en dependencia de la diferencia de fase, expresado en divisiones del ciclo fásico , se puede calcular por la fórmula :

$$m_{\Delta D} = \frac{\lambda m_{\Delta\varphi}}{100}. \qquad (389)$$

donde

$m_{\Delta D}$ – error cuadrático medio de la diferencia de distancia (m).
λ – longitud de onda (m).
$m_{\Delta\varphi}$ – error cuadrático medio de la medición de la diferencia de fase en divisiones de un ciclo.
100 – número de divisiones en el ciclo fásico.

La valoración de la exactitud en la determinación de la posición con ayuda del SRN fásico en esencia no se diferencia del método anterior y se realiza por la fórmula general:

$$M = \frac{1}{2\operatorname{sen}\theta}\sqrt{\left(\frac{m_{\Delta D_1}}{\operatorname{sen}\frac{\omega_1}{2}}\right)^2 + \left(\frac{m_{\Delta D_2}}{\operatorname{sen}\frac{\omega_2}{2}}\right)^2}, \qquad (390)$$

donde

$m_{\Delta D_1}$ y $m_{\Delta D_2}$ - error cuadrático medio en la determinación de la diferencias de distancias y calculado por la fórmula (389);
ω_1, ω_2 - ángulo de posición;
θ - ángulo de intersección de las líneas de posición.

En la utilización de cartas con redes de líneas isométricas trazadas, en la región del punto observado tomamos las discrepancias de los correspondientes parámetros de navegación en divisiones del ciclo fásico:

$\Delta u_1 = u_1 - u_2$ (divisiones del ciclo fásico)
$\Delta u_2 = u'_1 - u'_2$ (divisiones del ciclo fásico)

Entonces los gradientes de los parámetros de navegación serán:

$$g_1 = \frac{\Delta u_1}{\Delta n_1}\left(\frac{\text{divisiones del ciclo fasico}}{\text{millas}}\right);$$

$$g_2 = \frac{\Delta u_2}{\Delta n_2}\left(\frac{\text{divisiones del ciclo fasico}}{\text{millas}}\right).$$

Sustituyendo en la fómula general los errores $m_{\Delta\varphi 1}$ y $m_{\Delta\varphi 2}$ de mediciónde las diferencias de fases en diviciones de ciclo fásico y los valores de los gradientes g_1 y g_2 btenemos las siguiente fórmula para el cálculo del error cuaratico medio de la observación:

$$M = \frac{1}{\text{sen}\theta}\sqrt{\left(\frac{m_{\Delta\varphi_1}\Delta n_1}{\Delta u_1}\right)^2 + \left(\frac{m_{\Delta\varphi_2}\Delta n_2}{\Delta u_2}\right)^2} \qquad (391)$$

El ángulo θ de intersección de las líneas de posición se toma directamente de la carta.

CAPITULO X

VALORACIÓN DE LA EXACTITUD DE DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DEL BUQUE CON MÁS DE DOS LÍNEAS DE POSICIÓN.

Capítulo X

VALORACIÓN DE LA EXACTITUD DE DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DEL BUQUE CON MÁS DE DOS LÍNEAS DE POSICIÓN

10.1 Búsqueda y valoración de la exactitud de la posición más probable en la figura de errores con la mayor influencia de los errores casuales de las líneas de posición.

1. Peso de la línea de posición y puntos de intersección de dos líneas regulares de posición.

La magnitud del error cuadrático medio de la línea de posición depende del error cuadrático medio de medición del parámetro de navegación y su gradiente.

De acuerdo a la fórmula (336) el error cuadrático medio (desplazamiento) de la línea de posición es igual a:

$$m_n = \frac{m_u}{g}.$$

Cuanto menor sea el error (desplazamiento) de la línea de posición, más próximo pasará la línea dada de la posición verdadera y por consiguiente, mayor será su valor o peso.

De esta forma el peso de la línea de posición caracteriza su desviación de la medición del parámetro de navegación.

El peso P de la línea de posición es inversamente proporcional al cuadrado de su error cuadrático medio, es decir:

$$P = \frac{C}{m_u^2}. \qquad (392)$$

donde:C- coeficiente de proporcionalidad.

Sustituyendo en la fórmula (392) el valor del desplazamiento m_n obtenemos:

$$P = C\frac{g^2}{m_u^2}. \qquad (393)$$

Cuando $C = 1$ tenemos que:

$$P = \frac{g^2}{m_u^2}. \qquad (394)$$

La fórmula (394) se utiliza en aquellos casos cuando las mediciones son de desigual exactitud.
En las mediciones de igual exactitud, es decir con la igualdad de los errores cuadráticos medios de una serie de parámetros de navegación, el peso de la línea de posición se calcula por la fórmula:

$$P = g^2. \qquad (395)$$

Las fórmulas (394) y (395) muestran que cuanto mayor sea el gradiente de la función y mayor sea la exactitud de su medición, mayor será el peso de la línea de posición y más cerca pasará ésta de la posición verdadera del buque.

Si en la determinación de la posición del buque varias líneas de posición que poseen diferentes peso forman la figura de error, el peso del punto de intersección de dos líneas de posición es igual al producto de los pesos de las líneas de posición por el sen^2 del ángulo de intersección de estas líneas de posición, o sea:

$$P_a = P_1 P_2 \text{sen}^2\theta. \qquad (396)$$

2. Método centrográfico de determinación de la posición más probable por los pesos de los vértices de la figura de errores.

Para la determinar la posición del buque es suficiente tener dos líneas de posición. En este caso la posición del buque se encontrará en el punto de intersección. Sin embargo por dos líneas de posición es imposible detectar los errores admisibles.

Tres o más líneas de posición permiten elevar la exactitud de la posición determinada y controlar la calidad de las observaciones.

Como se conoce, tres y más líneas de posición en presencia tanto de los errores sistemáticos de las observaciones, como los errores casuales, no se cortan en un punto, sino que forman la figura de errores.

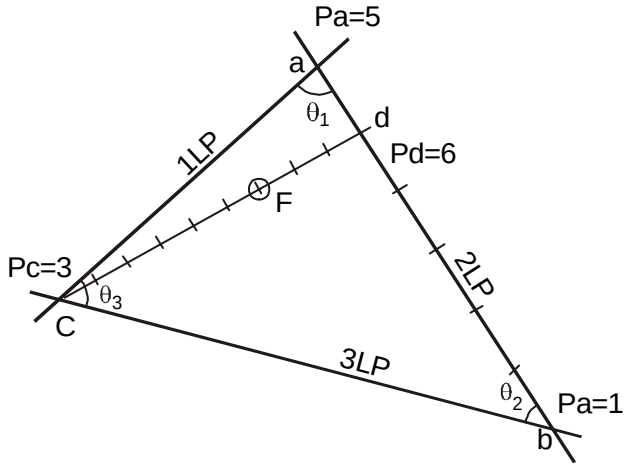


Fig. 330. Método centrográfico en la determinación de la posición má sprobable de la posición por los pesos de los vértices del triángulo de error.

Con tres líneas de posición esta figura será un triángulo, con más de tres líneas se forma un polígono. Aun cuando se utilice cualquier cantidad de líneas de posición excesivas, es imposible eliminar la influencia de los errores sistemáticos y casuales.

El surgimiento de la figura de errores de pequeñas dimensiones sienta la base para suponer que en las mediciones tuvieron mayor influencia los errores casuales, los cuales por lo general son pequeños.

El método más simple de determinación de la posición más probable en la figura de errores es el **método centrográfico**.

Si la figura de errores surge a causa solamente de los errores casuales, la posición del buque se encontrará siempre dentro de la figura de errores.

El método centrográfico consiste en lo siguiente:

Supongamos que en la determinación de la posición por tres líneas de posición, como resultado de los errores casuales de medición se formó la figura de errores (fig. 330)

Para hallar la posición más probable en el triángulo de errores calculamos los gradientes de los parámetros de navegación g_1, g_2 y g_3 y el error cuadrático medio de las líneas de posición.

$$m_{n_1}=\frac{m_{u_1}}{g_1};\ m_{n_2}=\frac{m_{u_2}}{g_2};\ m_{n_3}=\frac{m_{u_3}}{g_3}. \qquad (397)$$

Calculamos los pesos de las líneas de posición $P_1=\frac{g_1^2}{m_{u_1}^2}$, $P_2=\frac{g_2^2}{m_{u_2}^2}$; $P_3=\frac{g_3^2}{m_{u_3}^2}$. y los pesos de los puntos de intersección de dos líneas de posición es decir, los vértices del triángulo de error:

$$P_a=P_1P_2\,\mathrm{sen}^2\theta_1;$$

$$P_b=P_2P_3\,\mathrm{sen}^2\theta_2;$$

$$P_c=P_1P_3\,\mathrm{sen}^2\theta_1.$$

Supongamos, por ejemplo, que obtuvimos Pa=5,0; Pb=1,0 y Pc=3,0.

Dividimos uno de los lados del triángulo, por ejemplo ab, en partes inversamente proporcionales a los pesos de los vértices correspondientes.

Al punto d obtenido (Fig. 330) le asignamos el peso igual a la suma de los pesos de los vértices a y d, es decir, Pd = Pa + Pb = 6.

Unimos el punto d con el vértice C del triángulo, dividimos la recta cd en segmentos inversamente proporcionar a los pesos de los puntos cd es decir en la relación 6:3.

El punto obtenido F en el segmento cd será la posición más probable del buque en el triángulo de errores.

En la determinación de la posición por tres líneas de posición que tienen igual peso, la posición más probable del buque se encontrará siempre dentro del triángulo de errores, en el punto dende se cortan las antimeridianas, que son rectas trazadas desde los vértices del triángulo de errores simétricamente a las meridianas con relación a las bisectrices (Fig. 331).

Al determinar la posición por líneas de posición de desiguales pesos, si las dimensiones de la figura de errores son pequeñas y no se exige exactitud especial en la obtención de la posición del buque, se permite plotear el punto observado a ojo dentro de la figura de errores.

Ante esto es necesario recordar:

- el punto observado debe encontrarse cerca de la línea de posición que posee mayor peso;

- si el triángulo de error es muy alargado, el punto observado debe encontrarse más cerca del lado que tiene menor longitud .

En el triángulo de error el peso del vértice será mayor, cuanto más próximo a 90° se encuentra el ángulo de intersección de las líneas de posición y la posición más probable estará tanto más cerca del vértice dado y de la línea de posición dada, mientras mayor sean sus pesos.

Si en las inmediaciones predominan los errores casuales, entonces en la determinación de la posición por cuatro líneas de posición de igual peso los lados del polígono de errores deben dividirse en relaciones proporcionales inversas a los pesos de las líneas de posición adyacentes y entonces la posición observada se encontrará en el punto de intersección de los segmentos que unen por pares los puntos obtenidos (Fig.332)

El método centrográfico de búsqueda de la posición más probable del buque en la figura de errores es universal y puede ser utilizado con cualquier número de líneas de posición.

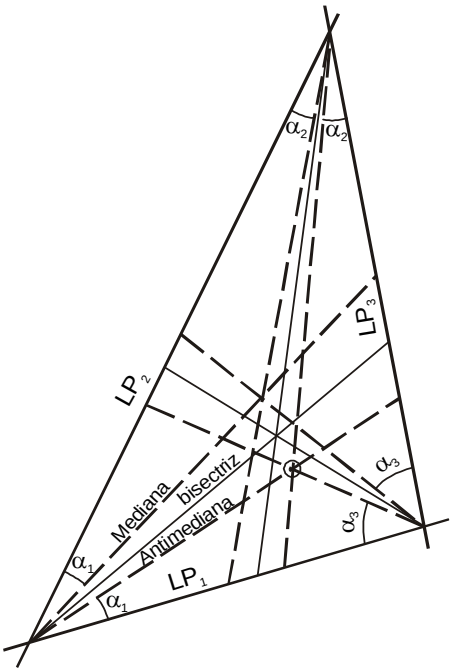


Fig.331. Búsqueda de la posición más probable del buque en el triángulo de errores por el método de antimedianas

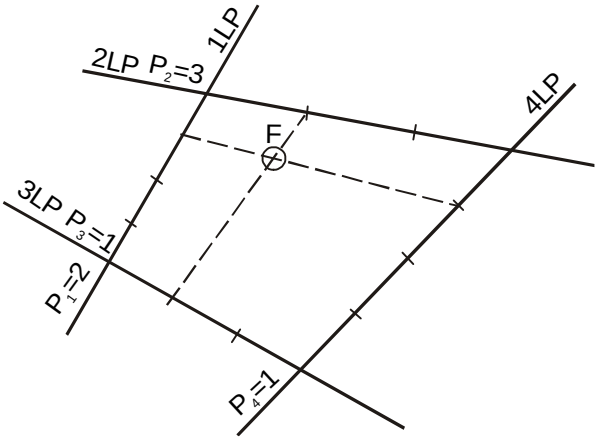


Fig.332. Búsqueda de la posición más probable del buque en el polígono de errores por el método centrográfico.

La valoración de la exactitud en la determinación de la posicón por tres y más líneas de posición se realiza por vía del cálculo de los elementos y construcción de la elipse cuadrática por el método grafoanalítico estudiado en el punto 8.20 (Cápitulo VIII).

10.2 Búsqueda de la posición más probable en la figura de errores cuando predominan los errores sistemáticos de las observaciones.

Los errores sistemáticos de las observacines surgen como resultado de la inexactitud en la determinación de las correciones en los equipos de medición , la variación de estas correcciones con el tiempo transcurrido desde el momento desde de su determinación, los desperfectos o inexactitud de la regulación de los equipos así como de las particularidades de los órganos sensitivos del observador. Este puede ser grande o pequeño en magnitud.

Los errores sistemáticos pequeños conmesurables con los casuales en la mayoría de los casos se pueden despreciar; ante errores sistemáticos grandes se obtiene una figura de grandes dimensiones y para la determinación de la posición más probables es necesario eliminar estos errores. Para no admitir en este caso errores graves es necesario, en primer lugar, cerciorarse que el surguimiento de la figura de errores puede ser consecuencia sólo de los errores sistemáticos de las observaciones pero sin fallo en una observación ni resultado de la influencia de errores casuales.

Para ello es necesario comprobar cuidadosamente la veracidad de las observacines y cálculos, asi como la correcta identificación de los puntos notables y repetir la determinación de la posición del buque.

Si sucede que las figuras de errores conservan aproximadamente las mismas dimensiones y configuraciones se puede considerar que la causa de su surgimiento son los errores sistemáticos.

Analicemos la solución general de las tereas en la eliminación de los errores sistemáticos y la búqueda de la posición más probable del buque en la figura de errores.

Supongamos que la posición de buque se determina por cuatro líneas de posición de igual exactitud. El error cuadrático de todas las líneas es idéntico para todas y es igual a **d**.
Es conocido que la ecuación de la línea de posición tiene la siguiente forma:

$$\cos\tau\Delta x + \operatorname{sen}\tau\Delta y - n = 0 \qquad (398)$$

Entonces se puede escribir el siguiente sistema de ecuaciones considerando los errores sistemáticos de las cuatro líneas de posición:

$$\begin{aligned}
&\cos\tau_1\Delta x + \operatorname{sen}\tau_1\Delta y = n_1 + d;\\
&\cos\tau_2\Delta x + \operatorname{sen}\tau_2\Delta y = n_2 + d;\\
&\cos\tau_3\Delta x + \operatorname{sen}\tau_3\Delta y = n_3 + d;\\
&\cos\tau_4\Delta x + sen\,\tau_4\Delta y = n_4 + d.
\end{aligned} \qquad (399)$$

Restando de la primera ecuación de la segunda y la tercera de la cuarta obtenemos dos nuevas ecuaciones idénticas a las ecuaciones de las líneas de posición:

$$\begin{aligned}
&(\cos\tau_1 - \cos\tau_2)\Delta x + (\operatorname{sen}\tau_1 - \operatorname{sen}\tau_2)\Delta y = n_1 - n_2;\\
&(\cos\tau_3 - \cos\tau_4)\Delta x + (\operatorname{sen}\tau_3 - \operatorname{sen}\tau_4)\Delta y = n_3 - n_4.
\end{aligned} \qquad (400)$$

Estas ecuaciones son las ecuaciones de las bisectrices de los ángulos, en los cuales se cortan la primera y la segunda y la tercera con la cuarta líneas de posición.

El error sistemático **d** es igual cero para el punto de interseción de las bisectrices.
De esta forma, para la determinación de la posición más probable del buque con la eliminación de los errores sistemáticos de las cuatro líneas de posición, es necesario trazar en la carta o e una hoja de papel estas líneas y luego trazar las bisectrices indepedientes de dos ángulos de las figuras de errores, es decir trazar tales bisectrices, para cuyos cálculos fueron utilizados pares diferentes de líneas de posición.

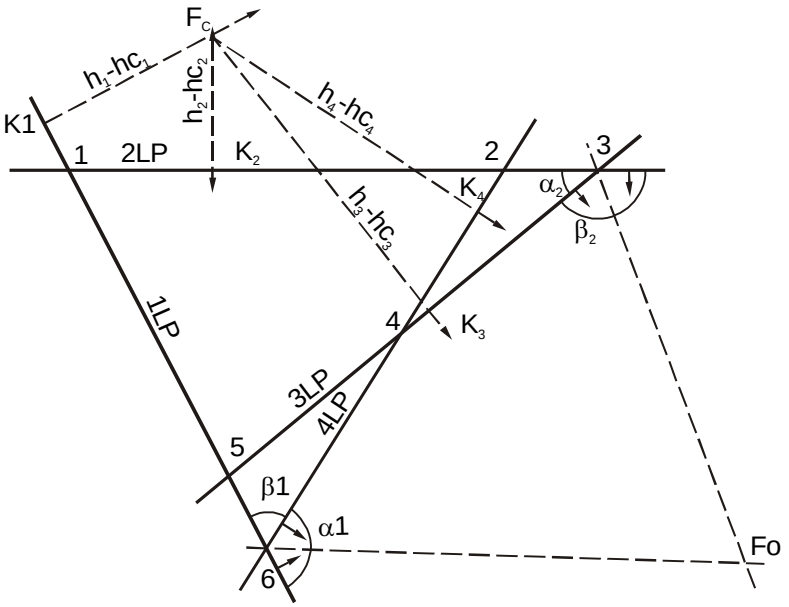


Fig.333. Búsqueda de la posición más probable con la presencia de cuatro rectas de altura de igual exactitud sobre cargadas por los errores sistemáticos.

El punto de intersección de las bisectrices será la posición más probable del buque, libre de errores casuales.

Supongamos que la posición del buque se determinó por cuatro rectas de alturas de igual exactitud sobrecargada por los errores sistemáticos (Fig. 333).
En tal caso la figura de errores puede tener seis puntos de intersección de las líneas de posición:

$$K = \frac{n(n-1)}{2} = 6;$$

donde n - cantidad de líneas de posición;
K - cantidad de puntos de intersección.

Seleccionemos en la figura de errores los puntos de intersección de dos pares de líneas de posición En este caso es necesario seleccionar tal combinación de los ángulos de intersección de las líneas de posición que las bisectrices independientes se corten en un ángulo próximo a 90°.
En la figura 333 los puntos más convenientes de intersección de estas líneas son los puntos 3 y 6.

Determinemos cúal de los águlos adyacentes α y β dividir a la mitad. Para ello es necesario trazar saetas desde los ángulos hacia el lado de aumento o disminución del parámetro de navegación (en el caso de la altura de los astros), y luego se divide los ángulos entre estas saetas a la mitad.

En el ejemplo se debe trazar en el punto 3 la bisectriz del ángulo β_2 y en punto 6 la bisectriz del ángulo α_1. En la intersección de las bisertrices obtenemos la posición observada del buque más probable F_o. Este método de eliminación del error sistemático y de búsquedas de la posición más probable del buque es utilizable ante cualquier número de líneas de posición.

El punto observado se encuentra dentro de la figura de errores en el caso. cuando los puntos de notables por los que se determinan la posición están dispuestos en todo el horizonte.

Si los puntos notables están distribuidos sólo en un mitad del horizonte, la posicón observada se encontrará fuera de la figura de errores.

Si la mediciones son de igual exactitud, pero los pesos de las líneas de posición son diferentes, a causa de la desigualdad de los gradientes, por ejemplo, en lugar de las bisectrices de los ángulos externos o internos es necesario trazar segmentos de rectas que dividan los correspondientes ángulos en partes inversamentes proporcionales a los pesos de la línea de posición que se corten en un punto.Tales rectas se denominan **bisectrices ponderadas.**

Supongamos por ejemplo, que la posición del boque se determinó por tres marcaciones, como resultado de lo cual se obtuvo un triángulo de error (Fig.334). Se requiere determinar la posicón más probable del buque si las líneas de posición están sobrecargadas por los errores sistemáticos.

Calculamos los pesos de las líneas de posición por la fórmula.

$$P_i = \frac{g_i^2}{m_{u_i}^2}.$$

Elegimos los vértices A y B del triángulo y por la regla expuesta anteriormente determinamos los ángulos, en los cuales se deben trazar las bisectrices ponderadas.

Dividamos los ángulos determinados en partes proporcionales a los pesos de las líneas de posición adyacentes, es decir en relaciones 3:2 y 3:4. Trazando las bisectrices ponderadas en cuya intersección se obtienela posición observada del buque F_0 libre de errores sistemáticos.

De una forma más simple puede ser determinada la posición más probable del buque por tres líneas de posición, de la forma siguiente:
Habiendo determinado el tiángulo de error se varían los parámetros de navegación (marcaciones, distancias etc.) en una misma magnitud, y luego se trazan nuevamente las líneas de posición en la carta.Como resultado se obtiene un nuevo triángulo de error (Fig. 335).

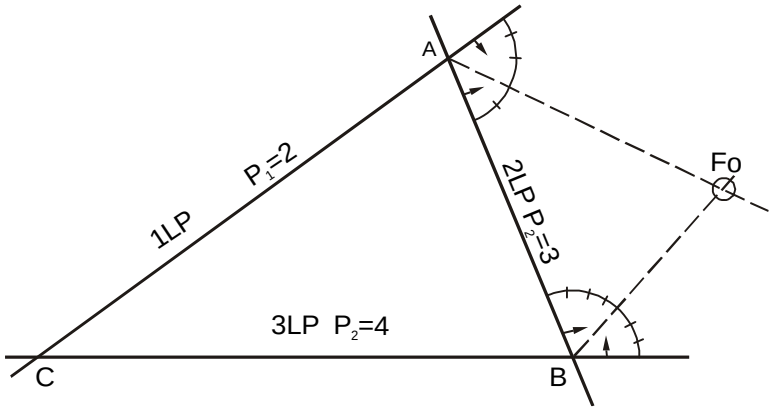


Fig. 334 Búsqueda de la posición más probable en el triángulo de error por el método de las bisectrices ponderadas.

Trazando a través de los vértices semejantes de los triángulos, líneas rectas, obtenemos en su intersección la posición buscada más probable el buque.

Las rectas trazadas son las bisectrices ponderadas de los ángulos del triángulo de error.

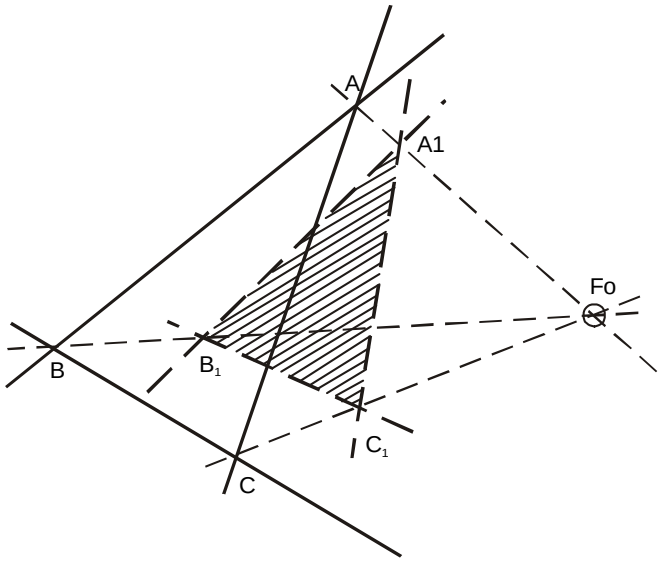


Fig. 335 Búsqueda de la posición más probable por el método de desplazamiento de las líneas de posición.

10.3 Determinación de la posición más probable en presencia de varias posiciones reducidas a un mismo momento.

Teniendo una serie de posiciones determinadas en los momentos T_1, T_2, ... T_n durante un intervalo comparativamente corto de tiempo, entre dichas posiciones, se puede hallar la posición, que posee mayor exactitud que cada una de las posiciones independientes la cual a su vez se utiliza como posición para cálculos posteriores de la estima del buque.

Para resolver la tarea planteada, es necesario que todas las posiciones sean llevadas a un mismo momento. Generalmente este momento corresponde a la última posición, siendo el método gráfico el más sencillo de todos, para esto las posiciones obtenidas se trasladan en la dirección de la línea de rumbo efectivo en un espacio igual al producto de la velocidad real del buque por el intervalo de tiempo $T_n - T_i$ (Fig. 336). La no coincidencia de las posiciones llevadas a un mismo instante, explica la presencia de errores en la estima.

Las coordenadas φ_0, λ_0 de la posición más probable pueden ser caluladas por las fómulas:

$$\varphi_0 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^{i=n} P_i};$$

$$\lambda_0 = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i \lambda_i}{\sum_{i=1}^{i=n} P_i}. \qquad (401)$$

obtenida en base a la fómula (297)

donde φ_i y λ_i - coordenadas de las posiciones consideradas,

P_i - peso de las posiciones.

Para el cálculo de los pesos de las posiciones independientes se emplea la fómula:

$$p_i = \frac{1}{m_i^2} \qquad (402)$$

donde m_{l_i} - error cuadrático medio en la determinación de la posición independiente.

En lugar de los pesos reales, calculados por la fómula (402), se puede calcular los pesos relativos, hallados como la relación parcial del cuadrado del error cuadrático medio de la posición, cuyo peso se toma como la unidad entre los errores cuadráticos medios de las observaciones independientes.

Para el cálculo de estos errores de la posición más probable se emplean las se las fómula (298) y (299).

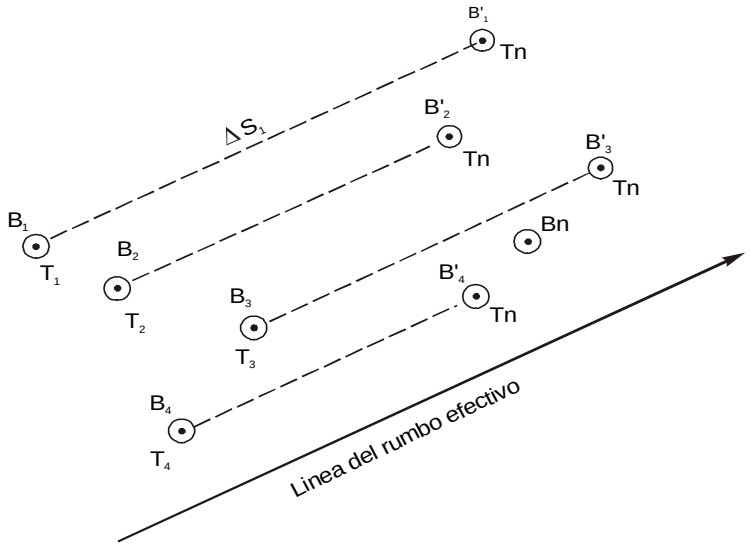


Fig.336 Posiciones determinadas por diferentes métodos reducidas a un mismo momento de tiempo.

Durante la determinación de las coordenadas de igual exactitud de la posición más probable, se calcula como la media aritmética de la latitud y longitud de las posiciones independientes.
Además, la posición más probable puede ser hallada empleando el método centrográfico teniendo en cuenta los pesos de las posiciones independientes, calculados por la fórmula (402).

Ejemplo. Un buque se encuentra en posición de estima $\varphi_e = 21°33{,}2'N$, $\lambda_e = 81°19{,}4'W$ la cual se caracteriza por un error cuadrático medio m_e=1,5 millas. Las coordenadas de las posiciones observadas que son llevadas a un mismo momento son:

$$\varphi_1 = 21°34{,}6'N,\ \lambda_1 = 81°19{,}6'W \quad m_1 = 1{,}2\,\text{millas};$$
$$\varphi_2 = 21°32{,}6'N,\ \lambda_2 = 81°16{,}8'W \quad m_2 = 2{,}0\,\text{millas};$$
$$\varphi_3 = 21°33{,}6'N,\ \lambda_3 = 81°21{,}2'W \quad m_3 = 2{,}5\,\text{millas}.$$

Calcular las coordenadas y el error cuadrático medio de a posición más probable teniendo en cuenta la posición de estima.

Solución 1) Calculemos los pesos relativos de las posiciones, considerando el peso de la posición de coordenadas φ_3, λ_3 igual a la unidad:

$$p_e = \frac{6,25}{2,25} = 2,8 - \text{peso de la línea de posición } \varphi_e, \lambda_e$$

$$p_1 = \frac{6,25}{1,44} = 4,3 - \text{peso de la línea de posición } \varphi_1, \lambda_1$$

$$p_2 = \frac{6,25}{4,00} = 1,6 - \text{peso de la línea de posición } \varphi_2, \lambda_2$$

$$p_3 = \frac{6,25}{6,25} = 1,0 - \text{peso de la línea de posición } \varphi_3, \lambda_3$$

2) Calculemos los valores de la latitud (φ_0) y longitid(λ_0):

$$\varphi_o = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i \varphi_i}{\sum_{i=n}^{i=n} P_i} = 21°30' + \frac{2,8x3,2 + 4,3x4,6 + 1,6x2,6 + 1,0x3,6}{9,7} =$$

$$= 21°30' + \frac{8,96 + 19,78 + 4,16 + 3,6}{9,7}$$

$$= 21°30' + \frac{36,5}{9,7}$$

$$\boxed{\varphi_o = 21°33,8' N}$$

$$\lambda_o = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i \lambda_i}{\sum_{i=n}^{i=n} P_i} = 81°15' + \frac{2,8x4,4 + 4,3x4,6 + 1,6x1,8 + 1,0x6,2}{9,7} =$$

$$= 81°15' + \frac{12,32 + 19,78 + 2,88 + 6,2}{9,7}$$

$$= 81°15' + \frac{41,18}{9,7}$$

$$\boxed{\lambda_o = 81°19,2' W}$$

Calculemos el error cuadrático medio de la coordenadas φ_0 y λ_0 por la fómula 298:

$$m_{\varphi_0} = \sqrt{\frac{\sum P \Delta\varphi^2}{(n-1)\sum P}};$$

$$m_{\lambda_0} = \sqrt{\frac{\sum P \Delta\lambda^2}{(n-1)\sum P}}.$$

La solución está resumida en la siguiente tabla:

φ_i	$\Delta\varphi = \varphi_0 - \varphi_I$	$\Delta\varphi^2$	p_I	$p_i\Delta^2\varphi$	λ_i	$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_i$	$\Delta\lambda^2$	$p_i\Delta^2{}_\lambda$
21°33,2’	+0,6	0,36	2,8	1,01	81°19,4’	-0,2	0,04	0,11
21°34,6’	-0,8	0,64	4,3	2,75	81°19,6’	-0,4	0,16	0,69
21°32,6’	+1,2	1,44	1,6	2,30	81°19,8’	-0,6	0,36	0,58
21°33,6’	+0,2	0,04	1,0	0,04	81°21,2’	-2,0	4,00	4,00
			$\sum p_i\Delta^2{}_\varphi = 6{,}10$				$\sum p_i\Delta^2{}_\lambda = 5{,}38$	

$$m_{\varphi_0} = \sqrt{\frac{6{,}04}{9{,}7x3}} = 0{,}209 \approx 0{,}21$$

$$m_{\lambda_0} = \sqrt{\frac{5{,}376}{9{,}7x3}} = 0{,}184 \approx 0{,}18.$$

4) Hallemos el error cuadrático medio del apartamiento por la fómula:

$$m_\rho = m_{\lambda_0} \cos\varphi_0;$$

$$= 0{,}184x\cos 21°33{,}8'N = 0{,}171;$$

$$m_\rho \approx 0{,}17.$$

y el radio del círculo de errores M_o de la posición más probable:

$$M_0 = \sqrt{m^2_{\varphi_0} + m^2_\rho};$$

$$M_0 = \sqrt{0{,}04 + 0{,}03} = 0{,}27.$$

Para hallar la posición más probable por el método centrográfico,tomemos dos posiciones cualesquiera, por ejemplo B_1 y B_2 (Fig.337) y unámosla con una línea recta, la cual dividimos en segmentos inversamente proporcionale a los pesos de estas posiciones;obteniendo el punto b, escribamos el peso, igual a la suma de los pesos p_1 y p_2. El punto b lo unimo con una línea recta con la tercera posición B_3 y tambien la dividimos en partes inversamente proporcional a los pesos de los puntos, a través de los cuales pasa la línea recta obteniéndose de forma análoga el punto B_o el cual será la posición más probable buscada.

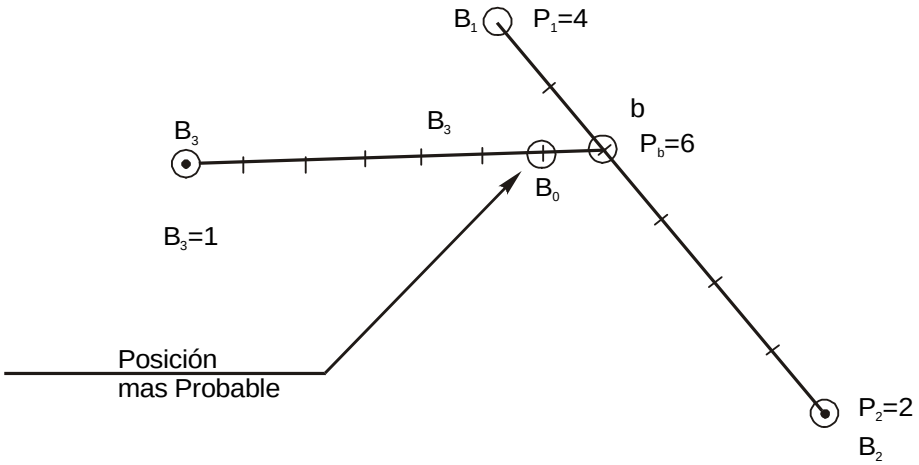


Fig. 337. Determinación de la posición más probable del buque por el método centrográfico.

CAPÍTULO XI

ESTIMA ANALÍTICA DE LA DERROTA DEL BUQUE.

Capítulo XI

ESTIMA ANALÍTICA DE LA DERROTA DEL BUQUE

11.1 Fórmulas y tablas del método de estima analítica de la derrota del buque

En algunos casos el método gráfico de conducción de la estima de la derrota del buque se complementa por el método de estima analítica. Este método se emplea, cuando es necesario aumentar la exactitud de la determinación de las coordenadas del buque debido a la eliminación de los errores en la construcción gráfica, así como durante la navegación en regiones donde se requiere cartas de escala pequeña (cartas generales). Además, la necesidad del empleo de la estima analítica surge ante la determinación de la posición del buque por las observaciones al Sol, durante los cálculos de las distancias entre los puntos de salida y llegada del buque, así como en los cálculos del rumbo loxodrómico o marcación.

El valor fundamental del método de estima analítica radica en que sus fórmulas son la base teórica principal del trabajo de los dispositivos calculadores y ploteadoras automáticas.

Durante la conducción de la estima analítica el ploteo gráfico en la carta se sustituye por los cálculos de las coordenadas geográficas del buque. **La esencia de la estima analítica consiste en el cálculo de la diferencia de latitud ($\Delta\varphi$) y diferencia de longitud ($\Delta\lambda$), contraídas por el buque durante su traslado desde un punto de salida determinado cuyas coordenadas son conocidas (φ_1 y λ_1).** Las coordenadas incógnitas **(φ_2 y λ_2)** en un momento dado se calculan por las fórmulas conocidas:

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$$
$$\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$$

donde $\Delta\varphi$ y $\Delta\lambda$ son funciones del desplazamiento del buque, o sea:

$$\Delta\varphi = f_1(Rv,S) \text{ y } \Delta\lambda = f_2Rv,S)$$

Para deducir las fórmulas fundamentales de la estima analítica, es decir para hallar los tipos de funciones $\Delta\varphi = f_1(Rv,S)$ y $\Delta\lambda = f_2Rv,S)$, nos referiremos a la figura 338 y supongamos, que el buque desde el punto A cuyas coordenadas φ_1, λ_1 conocidas se trasladó hacia el punto B(φ_2,λ_2) con el rumbo constante R. La distancia, recorrida por el buque por la loxodrómica AB, simbolisémolas por S y hallemos la dependencia de la diferencia de latitud $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, y la diferencia de longitud $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, respecto al rumbo R y el espacio recorrido S.

Dividamos el segmento de loxodrómica AB en m partes elementales iguales; designando cada segmento por ΔS. Tracemos a través de los puntos obtenidos los meridianos y arcos de paralelo. Como resultado obtenemos m triángulos rectángulos elementales iguales entre sí, ya que la hipotenusa de cada uno de ellos y los ángulos, formados con sus catetos son iguales (la loxodrómica corta todos los meridianos y paralelos con el mismo ángulo R).

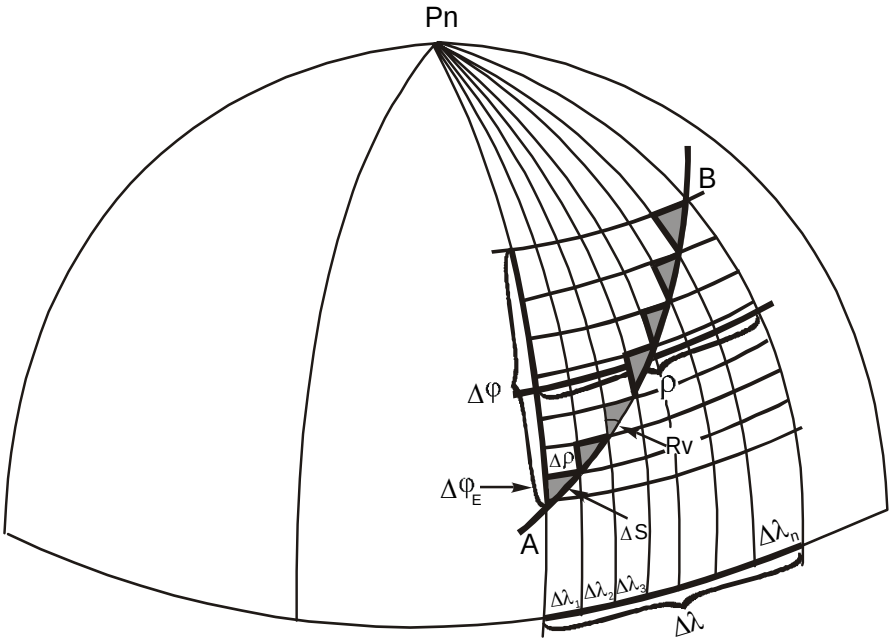


Fig. 338 Gráfico para la deducción de las fórmulas de la estima analítica

En cada uno de estos triángulos la hipotenusa es igual a dS; los catetos, que coinciden con los meridianos, son iguales a los incrementos de latitud $\Delta\varphi_i$ los catetos, que coinciden con los paralelos representa el desplazamiento del buque por el paralelo $\Delta\rho$.

Considerando que los lados $\Delta\varphi$, $\Delta\rho$, ΔS son pequeños sustituyamos los triángulos formados en la esfera por triángulos planos, por lo que podemos plantear que:

$$\Delta\varphi = \Delta S \cos Rv$$

Sustituyendo los incrementos $\Delta\varphi$ y ΔS por sus diferenciales $d\varphi$ y ΔS, obtenemos $d\varphi = dS\cos Rv$ Integrando esta ecuación en los límites de φ_1 a φ_2 y desde 0 hasta S.

$$\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi = \int_0^S dS\cos Rv$$

obtenemos

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = dS\cos Rv \qquad (403)$$

o sea la diferencia de latitud es igual al espacio recorrido por el coseno del rumbo verdadero.

El signo de la diferencia de latitud se determina por el signo de cosRv, o sea, para rumbos situados en los cuadrantes **NE** y **NW** la diferencia de latitud es norte o positiva y en los rumbos situados en los cuadrantes **SE** y **SW** es sur o negativa.

El desplazamiento del buque por el paralelo, se expresa en millas náuticas y se denomina **apartamiento** (ρ). Este se determina por la relación:

$$\Delta\rho = \Delta S \operatorname{sen} Rv$$

$$d\rho = dSsenRv$$

$$\int_{01}^{\rho} d\rho = \int_{0}^{S} dSsenRv,$$

$$\rho = SsenRv \qquad (404)$$

o sea el apartamiento es igual al espacio recorrido por el seno del rumbo verdadero. Numéricamente el apartamiento es igual a la longitud del segmento de un determinado paralelo intermedio (entre los paralelos A y B), comprendido entre los meridianos de los puntos de salida y llegada. El valor de la latitud intermedia, es decir la latitud del paralelo intermedio, será mostrado posteriormente.

El signo del apartamiento se determina por el senRv ; o sea en rumbos situados en los cuadrantes **NE** y **SE** el apartamiento es este o positivo, mientras que en rumbos situados en los cuadrantes **NW** y **SW** es oeste o negativo.

Como la $\Delta\varphi$ se mide por el meridiano, y una milla náutica es igual a la longitud de un minuto de meridiano, entonces para obtener φ_2 es suficiente a la latitud del punto inicial φ_1, sumar la diferencia de latitud calculada por la fórmula $\Delta\varphi$ expresado en millas náuticas.

Para obtener λ_2 es necesario reducir el apartamiento a la diferencia de longitud. Como el apartamiento es la suma de apartamientos elementales $\Delta\rho$, en diferentes latitudes e iguales apartamientos en diferentes paralelos corresponden a diferentes diferencias de longitudes, utilicemos para convertir el apartamiento a la diferencia de longitud, la conocida relación entre la longitud del arco del ecuador y la longitud del arco de paralelo:

$$d\lambda_1 = d\rho\sec(\varphi_1 + d\varphi);$$
$$d\lambda_2 = d\rho\sec(\varphi_2 + d\varphi);$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$d\lambda_n = d\rho\sec(\varphi_n + d\varphi.$$

Sumando los primeros y segundos miembros de las ecuaciones, obtenemos:

$$\Delta\lambda = d\rho\sum_{1}^{n}\sec\varphi_1.$$

Multiplicando y dividiendo el primer miembro de la igual obtenida por el número de segmentos:

$$\Delta\lambda = nd\rho\,\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\sec\varphi_1.$$

El producto $nd\rho$ es igual al apartamiento ρ, y $\frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\sec\varphi_1 = \sec\varphi_m$ representa el valor aritmético medio de la secante de la latitud φ_i, que corresponde a una latitud determinada; denominada latitud media φ_m

$$\Delta\lambda = \rho\sec\varphi_m \qquad (405)$$

El valor numérico $\sec\varphi_m$ se halla de la expresión:

$$\sec\varphi_m = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n}\sec\varphi_i$$

que escribiremos en la forma:

$$\sec\varphi_m = \frac{1}{nd\varphi}\sum_{1}^{n}\sec\varphi_i d\varphi = \frac{1}{nd\varphi}\int_{\varphi_1}^{\varphi_2}\frac{d\varphi}{\cos\varphi_i}.$$

Esta integral representa la diferencia de partes meridionales $\Delta PM = D_2 - D_1$ en la esfera, correspondientes a las latitudes φ_1, φ_2, y la expresión $nd\varphi$ es la diferencia de latitud $\Delta\varphi$, por eso:

$$\sec\varphi_m = \frac{\Delta PM}{\Delta\varphi} \qquad (406)$$

De esta forma la fórmula exacta para hallar la diferencia de longitud por el apartamiento considerando a la Tierra como una esfera tendrá la forma:

$$\Delta\lambda = \rho\sec\varphi_m = \rho\frac{\Delta PM}{\Delta\varphi}. \qquad (407)$$

Si dividimos la ecuación (405) entre la (404), obtenemos $\frac{\rho}{\Delta\varphi} = \tan R$, y la fórmula exacta para calcular la diferencia de longitud en función del rumbo del buque puede ser escrita en la forma:

$$\Delta\lambda = \Delta PM\tan R_v \Rightarrow \tan R_v = \frac{\Delta\lambda}{\Delta PM}. \qquad (408)$$

Esta última fórmula no debe ser empleada para hallar $\Delta\lambda$ para rumbos del buque próximos a 90° ó 270°, ya que la tangente del ángulo, próxima a 90°, varía bruscamente y un error considerable en la incógnita $\Delta\lambda$.

Para simplificar los cálculos de la diferencia de longitud por ρ se puede asumir aproximadamente, que la secante de la latitud intermedia (φ_{int}) corresponde a la secante de la latitud media φ_m entre los puntos A y B, es decir.

$$\sec\varphi_{int} \cong \sec\frac{\varphi_1+\varphi_2}{2} \cong \sec\varphi_m. \qquad (409)$$

La fórmula (409) da buenos resultados para diferencias de latitudes hasta 5° - 7° en particular en navegaciones en bajas latitudes. En estos casos la diferencia de longitud se calcula por la fórmula:

$$\Delta\lambda = \rho\sec\varphi_m. \qquad (410)$$

Las fórmulas de la estima analítica se pueden deducir con mayor sencillez, si en la proyección Mercator se construye un triángulo rectángulo, formado por el meridiano del punto de salida de estima A, el paralelo del punto de llegada B y el segmento de loxodrómica AB (Fig. 339a).

Expresando todos los lados del triángulo en millas náuticas, obtenemos

$$\Delta\varphi = S\cos Rv$$
$$\rho = S\,\mathrm{sen}Rv$$

Si los catetos del triángulo se expresan en minutos ecuatoriales, obtenemos (Fig. 339b)

$$\Delta\lambda = \Delta PM\tan Rv$$

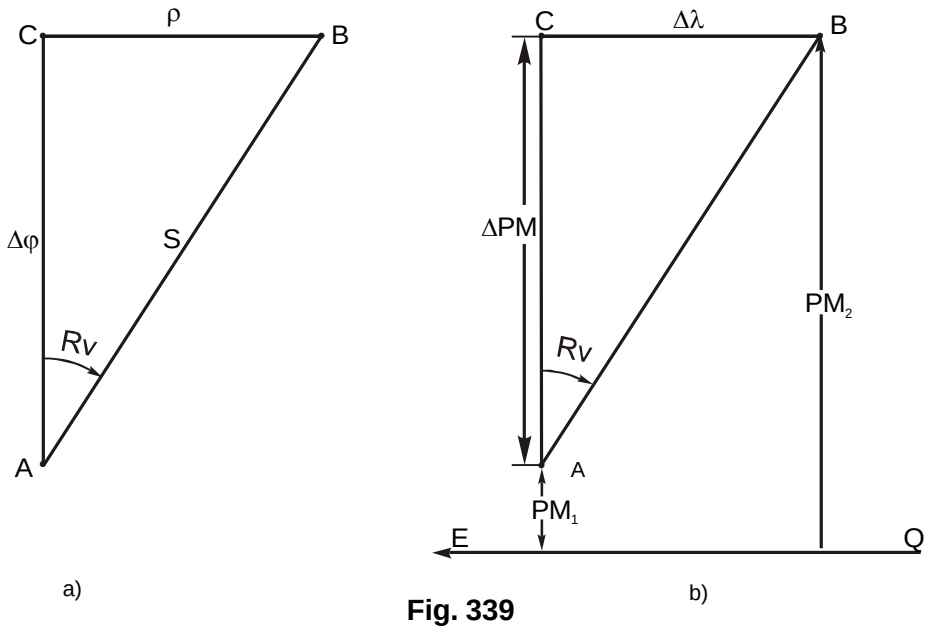


Fig. 339

Para el cálculo de la $\Delta\varphi$, ρ y $\Delta\lambda$ están confeccionadas las tablas 24, 25 y 26 TUN.

La tabla 24 está calculada por la fórmula (403) y (404), donde por los argumentos S y R_V se dan los valores de $\Delta\varphi$ y ρ .

La tabla 25 da el valor de $\Delta\lambda$ por ρ y la latitud media

$$\varphi_m = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}.$$

En la tabla 26 están dados las partes meridionales para los paralelos dede 0 hasta 89°59' cada 1'

La utilización de las tablas de estima analítica se mostrará en el siguiente ejemplo.

Ejemplo 1. Dadas las coordenadas de estima φ_1 = 44° 10.0' N λ_1 = 150° 34' E; R_v = 12°; espacio recorrido por el buque S = 320 millas. Hallar las coordenadas del punto de llegada.

Solución 1): **Por las tablas 24 y 25 - a TUN:**

Entramos en la tabla 24 con R_v =12° y S=32 (320/10) como argumentos (Pag. 223) y determinamos la diferencia de latitud ($\Delta\varphi = D_{lat}$) y el apartamiento (ρ=A):

– $\Delta\varphi = D_{lat}$= 313,0' (Anteriormente se entró en la tabla con S=32, siendo su valor real 320, por lo que el valor obtenido hay que multiplicarlo por 10 (31,30x10 = 313,0).

– ρ = 66,5' (6,65 que es el valor tabular, el valor real será 6,65x10 = 66,5').

Para hallar la diferencia de longitud ($\Delta\lambda$) entramos en la tabla 25 con la latitud media (φ_m= 46,8°) y el apartamiento (A = 66,5), desglosados en tres partes (ρ_1= 60millas, ρ_2= 6millas, ρ_3= 0,5millas), obteniéndose los segmentos de longitud ($\Delta\lambda_1$= 87,6', $\Delta\lambda_2$= 8,8', $\Delta\lambda_3$= 8,8') y finalmente la longitud. Los cáculos y sus resultados se muestran a continuación.

$$\Delta\varphi = 313{,}0' \text{ hacia el N}$$
$$\varphi_1 = 44°10'\text{N}$$
$$\Delta\varphi = \ \ 5°13'\text{N}$$
$$\text{Latitud de llegada} \rightarrow \ \varphi_2 = 49°23'\text{N}$$
$$-1/2\ \Delta\varphi = 2°36{,}5'$$
$$\varphi_m = 46°46{,}5' = 46{,}8°$$

$$\rho = 66{,}5 \text{ millas hacia el E}$$
$$\rho_1 = 60 \text{ millas} \qquad \Delta\lambda_1 = 87{,}6'$$
$$\rho_2 = \ \ 6 \text{ millas} \qquad \Delta\lambda_2 = \ \ 8{,}8'$$
$$\rho_3 = 0{,}5 \text{ millas} \qquad \Delta\lambda_3 = \ \ 0{,}7'$$
$$\Delta\lambda = 97{,}1'\text{E} \rightarrow \Delta\lambda = 1°37{,}1'\text{E}$$
$$\lambda_1 = +150°34{,}0'$$
$$\Delta\lambda = + \ \ 1°37{,}1'$$
$$\lambda_2 = +152°11{,}1'$$
$$\lambda_2 = \ \ 152°11{,}1' \leftarrow \text{Longitud de llegada por la tabla}$$

2. Por la fórmula (406) y determinando las partes meridionales de la tabla 26 TUN

$$PM_2 = 3399{,}8'$$
$$PM_1 = 2943{,}7'$$
$$\Delta PM = 456{,}1$$
$$\Delta\varphi = 313{,}0'\text{N}$$
$$\sec\varphi_m = \frac{\Delta PM}{\Delta\varphi}$$

Utilizando la calculadora científica

$$\sec\varphi_m = \frac{456{,}1'}{313{,}0'} = 1{,}457188498 = x$$
$$x^{-1} = \cos\varphi_m = 0{,}686253014$$
$$\varphi_m = \cos^{-1} 0{,}686253014$$
$$\varphi_m = 46{,}666° = 46°40{,}0'$$

Cálculo de la diferencia de longitud

$$\Delta\lambda = \rho\sec\varphi_m$$

ó

$$\Delta\lambda = \frac{\rho}{\text{coo}\varphi_m} = \frac{66{,}0}{\text{coo}46°40'} = \frac{66{,}0}{0{,}68241637}$$
$$\Delta\lambda = 96{,}9'$$
$$\Delta\lambda = 1°36{,}9'\text{E}$$
$$\lambda_1 = +150°34{,}0'$$
$$\Delta\lambda = + \ \ 1°36{,}9'$$
$$\lambda_2 = +152°10{,}9'$$
$$\lambda_2 = +152°10{,}9'\text{E} \leftarrow \text{Longitud de llegada por la fórmula}$$

Resolviendo la tarea por la fórmula (407), obtenemos $\Delta\lambda$ con mayor exactitud que por la fórmula aproximada (410).

Ejemplo 2: Un buque en latitud 32° 14.7’, longitud 66° 28.9 W esta aproado para llegar a un punto cerca del faro Chesapeake, latitud 36° 58.7’ N longitud 75° 42.2’ W.

Se requiere: Rumbo y distancia por: 1) cálculo, 2) tabla TUN

1) Solución por las fórmulas

$$\tan Rv = \frac{\Delta\lambda}{\Delta PM}, \quad S = \Delta\varphi \sec Rv.$$

Cálculo de la diferencia de partes meridionales

a) Entre en la tabla 26b TUN con los valores de las latitudes y determine las partes meridionales correspondientes a cada una de ellas.

$$PM_2(36°58{,}7'N) = 2377{,}0'$$
$$PM_1(32°14{,}7'N) = 2033{,}3'$$
$$\Delta PM = \qquad = 343{,}7'$$
$$\lambda_2 = 075°42{,}2'W$$
$$\lambda_1 = 066°28{,}9'W$$
$$\Delta\lambda = 9°13{,}3'W \rightarrow (9x60' + 13{,}3' = 540 + 13{,}3' = 533{,}3')$$
$$\Delta\lambda = 533{,}3'$$
$$\tan R = \frac{533{,}3}{343{,}7} = 1{,}609834158$$
$$R = 1{,}609834158 \rightarrow (R \text{ - ángulo de rumbo})$$
$$R = 58{,}2°W$$
$$Rv = 301{,}8°$$

b) Cálculo de la distancia

$$S = \Delta\varphi \sec Rv \quad ó \quad S = \frac{\Delta\varphi}{\cos Rv}$$
$$\varphi_2 = 36°58{,}7'N$$
$$\varphi_1 = 32°14{,}7'N$$
$$\Delta\varphi = 4°44{,}0'N$$
$$\Delta\varphi = 284{,}0'N$$
$$S = \frac{284}{\cos 58°09{,}1'} = \frac{284}{0{,}527672556} = 538{,}2'$$
$$S = 538{,}2 \text{ millas}$$
$$Rv = 301{,}8°$$

Respuesta: $S = 538{,}2$ millas

2) Solución por la tabla TUN

Entre en la tabla 24 con ΔPM como $\Delta\varphi$ (D_{Lat}) y $\Delta\lambda$ como A (apartamiento). Como los valores 343,7 y 553,3 no aparecen en la tabla por ser un valor >100 por lo que ΔPM y $\Delta\lambda$ se divideentre 10, entonces con 34,4 y 55,3 entramos de nuevo en la tabla hasta encontrar los valores más próximos, obteniendo que $Rv \approx 302$.
Entrando en la tabla con Rv = 302° para hallar la distancia por $\Delta\varphi$ =284'.

S = 536 millas

TABLA 24. DIFERENCIAS DE LATITUDES Y APARTAMIENTOS

Rumbo / Espacio	29° 151 209° 331°		30° 150° 210° 330°		31° 149° 211° 329°		32° 148° 212° 328°		33° 147° 213° 327°		34° 146° 214° 326°		35° 145° 215° 325°	
	D lat	A	D lat	A	D lat	A	D lat	A	D lat	A	D lat	A	D lat	A
50	43.73	24.24	43.30	25.00	42.86	25.75	42.40	26.50	41.93	27.23	41.45	27.96	40.96	28.68
51	44.61	24.73	44.17	25.50	43.72	26.27	43.25	27.03	42.77	27.78	42.28	28.52	41.78	29.25
52	45.48	25.21	45.03	26.00	44.57	26.78	44.10	27.56	43.61	28.32	43.11	28.08	42.60	29.83
53	46.35	25.69	45.90	26.50	45.43	27.30	44.95	28.09	44.45	28.87	43.94	29.64	43.42	30.40
54	47.23	26.18	46.77	27.00	46.29	27.81	45.79	28.62	45.29	29.41	44.77	30.20	44.23	30.97
55	48.10	26.66	47.63	27.50	47.14	28.33	46.64	29.15	46.13	29.96	45.60	30.76	45.05	31.55
56	48.98	27.15	48.50	28.00	48.00	28.84	47.49	29.68	46.97	30.50	46.43	31.31	45.87	32.12
57	49.85	27.63	49.36	28.50	48.86	29.36	48.34	30.21	47.80	31.04	47.26	31.87	46.69	32.69
58	50.73	28.12	50.23	29.00	49.72	29.87	49.19	30.74	48.64	31.59	48.08	32.43	47.51	33.27
59	51.60	28.60	51.10	29.50	50.57	30.39	50.03	31.27	49.48	32.13	48.91	32.99	48.33	33.84
60	52.48	29.09	51.96	30.00	51.43	30.99	50.88	31.80	50.32	32.68	49.74	33.55	49.15	34.41
61	53.35	29.57	52.83	30.50	52.29	31.42	51.73	32.33	51.16	33.22	50.57	34.11	49.97	34.99
62	54.23	30.06	53.69	31.00	53.14	31.93	52.58	32.85	52.00	33.77	51.40	34.67	50.79	35.56
63	55.10	30.54	54.56	31.50	54.00	32.45	53.43	33.38	52.84	34.31	52.23	35.23	51.61	36.14
64	55.98	31.03	55.43	32.00	54.86	32.96	54.28	33.91	53.67	34.86	53.06	35.79	52.43	36.71
65	56.85	31.51	56.29	32.50	55.72	33.48	55.12	34.44	54.51	35.40	53.89	36.35	53.24	37.28
66	57.72	32.00	57.16	33.00	56.57	33.99	55.97	34.97	55.35	35.95	54.72	36.91	54.06	37.86
67	58.60	32.48	58.02	33.50	57.43	34.51	56.82	35.50	56.19	36.49	55.55	37.47	54.88	38.43
68	59.47	32.97	58.89	34.00	58.29	35.02	57.67	36.03	57.03	37.04	56.37	38.03	55.70	39.00
69	60.35	33.45	59.76	34.50	59.14	35.54	58.52	36.56	57.87	37.58	57.20	38.58	56.52	39.58

Ejemplo 3: Un buque se encuentra en φ = 75° 31.7' N, λ = 79° 08.7', Bafin, recorre 263,5 millas en un rumbo de 155°

Se requiere 1) Latitud y longitud del punto de llegada.

1) Solución por las fórmulas (Utilizando la calculadora científica)

a) Cálculo de la latitud (φ_2)

S = 263,5millas

Rv =155°

$$S = \Delta\varphi \sec Rv$$

$$\Delta\varphi = S\cos Rv$$

$$\Delta\varphi = 263{,}5\cos 155°$$

$$= 263{,}5x0{,}906307787$$

$$\Delta\varphi = 238{,}8'\,S \rightarrow (238{,}8'/60 = 3°58{,}8')$$

$$\Delta\varphi = 3°58{,}8'\,S$$

$$\varphi_1 = 75°31{,}7'$$

$$\Delta\varphi = 3°58{,}8'\,S$$

$$\varphi_2 = 72°32{,}9'$$

b) Cálculo de la longitud

$$\varphi_2 = 75°31{,}7'N \quad \rightarrow \quad PM_1 = 7072{,}4$$
$$\varphi_1 = 72°32{,}9'N \quad \rightarrow \quad PM_2 = 6226{,}1$$
$$\Delta PM = 846{,}3$$

$$\Delta\lambda = \Delta PM \tan Rv$$
$$= -846{,}3' \tan 155°$$
$$= 846{,}3' \times 0{,}466307658$$
$$= 394{,}49' \rightarrow (394{,}49'/60 = 6°34{,}5')$$
$$\lambda_1 = 79°08{,}7'W$$
$$\Delta\lambda = \quad 6°34{,}7'E$$
$$\lambda_2 = 72°34{,}2'W$$

Los resultados están mostrado en la figura 340.

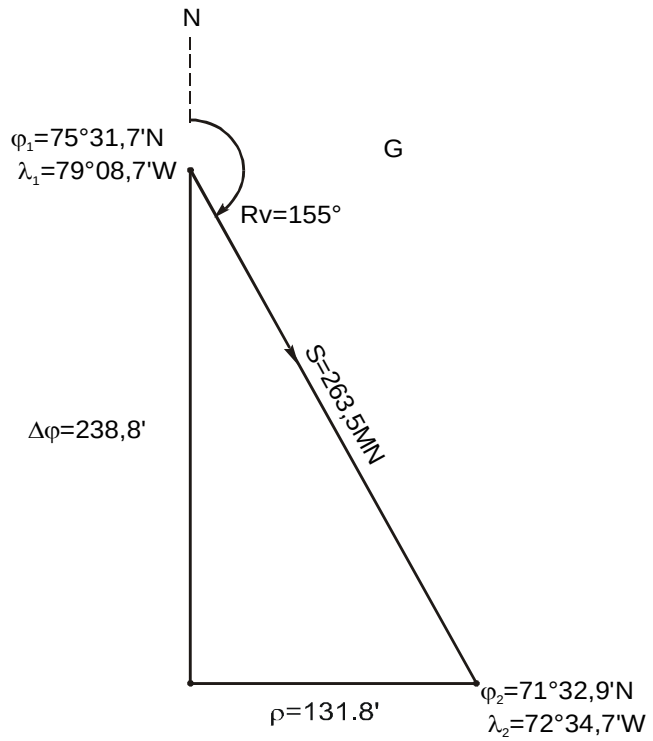


Fig. 340.

2) Solución por la tabla TUN

Entre en la tabla 24 con los valores del Rv = 155° y la distancia S = 263,5 Como esta distancia es mayor de 100, es necesario dividirla entre 10 (26,4) y con este valor hallamos que $\Delta\varphi$ = 238,8' La latitud del punto de llegada se obtiene restándole la diferencia de latitud a la latitud del punto de salida. Para hallar la diferencia de longitud $\Delta\lambda$ procedamos como sigue: determinemos la diferencia de partes meridiona les por la tabla 26b (ΔPM = 846,3). Con el rumbo verdadero Rv = 155°, la diferencia de partes meridionales (ΔPM = 846,3) como diferencia de latitud $\Delta\varphi$ y la $\Delta\lambda$ como apartamiento entramos en la tabla. Como el valor 846,3 no aparece en la tabla en la columna de ΔPM, entonces será necesario dividir ésta entre 10 e inspeccionar en la columna ΔPM el valor de 84,6. Con el cual se obtiene $\Delta\lambda$ = 39,4'. Finalmente $\Delta\lambda$ = 394' (39,4' $\times$ 10). La longitud del punto de llegada se haya aplicando la diferencia de longitud a la longitud del punto de salida.

φ_2 = 71° 32.9' N
λ_2 = 72° 34.7' W

TABLA 24. DIFERENCIAS DE LATITUDES Y APARTAMIENTOS

Rumbo / Espacio	22°	158° 202° 338°	23°	157° 203° 337°	24°	156° 204° 336°	25°	155° 205° 335°	26°	154° 206° 334°	27°	153° 207° 333°	28°	152° 208° 332°
	D lat	A	D lat	A	D lat	A	D lat	A	D lat	A	D lat	A	D lat	A
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.93	0.37	0.92	0.39	0.91	0.41	0.91	0.42	0.90	0.44	0.89	0.45	0.88	0.47
2	1.85	0.75	1.84	0.78	1.83	0.81	1.81	0.85	1.80	0.88	1.78	0.91	1.77	0.94
3	2.78	1.12	2.76	1.17	2.74	1.22	2.72	1.27	2.70	1.32	2.67	1.36	2.65	1.41
4	3.71	1.50	3.68	1.56	3.65	1.63	3.63	1.69	3.60	1.75	3.56	1.82	3.53	1.88
5	4.64	1.87	4.60	1.95	4.57	2.03	4.53	2.11	4.49	2.19	4.46	2.27	4.41	2.35
6	5.56	2.25	5.52	2.34	5.48	2.44	5.44	2.54	5.39	2.63	5.35	2.72	5.30	2.82
7	6.49	2.62	6.44	2.74	6.39	2.85	6.34	2.96	6.29	3.07	6.24	3.18	6.18	3.29
8	7.42	3.00	7.36	3.13	7.31	3.25	7.25	3.38	7.19	3.51	7.13	3.63	7.06	3.76
9	8.34	3.37	8.28	3.52	8.22	3.66	8.16	3.80	8.09	3.95	8.02	4.09	7.95	4.23
10	9.27	3.75	9.21	3.91	9.14	4.07	9.06	4.23	8.99	4.38	8.91	4.54	8.83	4.69
11	10.20	4.12	10.13	4.30	10.05	4.47	9.97	4.65	9.89	4.82	9.80	4.99	9.71	5.16
12	11.13	4.50	11.05	4.69	10.96	4.88	10.88	5.07	10.79	5.26	10.69	5.45	10.60	5.63
13	12.05	4.87	11.97	5.08	11.88	5.29	11.78	5.49	11.68	5.70	11.58	5.90	11.48	6.10
14	12.98	5.24	12.89	5.47	12.79	5.69	12.69	5.92	12.58	6.14	12.47	6.36	12.36	6.57
15	13.91	5.62	13.81	5.86	13.70	6.10	13.59	6.34	13.48	6.58	13.37	6.81	13.24	7.04
16	14.83	5.99	14.73	6.25	14.62	6.51	14.50	6.76	14.38	7.01	14.26	7.26	14.13	7.51
17	15.76	6.37	15.65	6.64	15.53	6.91	15.41	7.18	15.28	7.45	15.15	7.72	15.01	7.98
18	16.69	6.74	16.57	7.03	16.44	7.32	16.31	7.61	16.18	7.89	16.04	8.17	15.89	8.45
19	17.62	7.12	17.49	7.42	17.36	7.73	17.22	8.03	17.08	8.33	16.93	8.63	16.78	8.92
20	18.54	7.49	18.41	7.81	18.27	8.13	18.13	8.45	17.98	8.77	17.82	9.08	17.66	9.39
21	19.47	7.87	19.33	8.21	19.18	8.54	19.03	8.87	18.87	9.21	18.71	9.53	18.54	9.86
22	20.40	8.24	20.25	8.60	20.10	8.95	19.94	9.30	19.77	9.64	19.60	9.99	19.42	10.33
23	21.33	8.62	21.17	8.99	21.01	9.35	20.85	9.72	20.67	10.08	20.49	10.44	20.31	10.80
24	22.25	8.99	22.09	9.38	21.93	9.76	21.75	10.14	21.57	10.52	21.38	10.90	21.19	11.27
25	23.18	9.37	23.01	9.77	22.84	10.17	22.66	10.57	22.47	10.96	22.28	11.35	22.07	11.74
26	24.11	9.74	23.93	10.16	23.75	10.58	23.56	10.99	23.37	11.40	23.17	11.80	22.96	12.21
27	25.03	10.11	24.85	10.55	24.67	10.98	24.47	11.41	24.27	11.84	24.06	12.26	23.84	12.68
28	25.96	10.49	25.77	10.94	25.58	11.39	25.38	11.83	25.17	12.27	24.95	12.71	24.72	13.15
29	26.89	10.86	26.69	11.33	26.49	11.80	26.28	12.26	26.07	12.71	25.84	13.17	25.61	13.61

CAPÍTULO XII

NAVEGACIÓN POR CÍRCULO MÁXIMO

Capítulo XII

NAVEGACIÓN POR CÍRCULO MÁXIMO (DERROTA ORTODRÓMICA)

12.1. Derrota ortodrómica. Es la que lleva un buque cuando navega siguiendo un círculo máximo.

La menor distancia entre los puntos de salida y llegada del buque sobre la superficie terrestre si consideramos la Tierra como una esfera **es el menor arco de círculo máximo** (en la figura 341 es el arco (AB), **que pasa a través de estos puntos**.

Por eso es lógico suponer, que la navegación del buque por círculo máximo (ortodrómica) posee ciertas ventajas en comparación con la navegación por loxodrómica entre estos mismos puntos y por tanto: se reduce la distancia de la derrota y disminuye el tiempo de la travesía.

El cálculo de los elementos (parámetros) del círculo máximo, su ploteo en la carta de proyección Mercator así como los cálculos en el proceso de navegación es más compleja, que las acciones análogas al navegar por loxodrómica. Sin embargo la ganancia en tiempo y otras ventajas que con frecuencia son tan considerables, que la travesía por ortodrómica es más ventajosa que por loxodrómica.

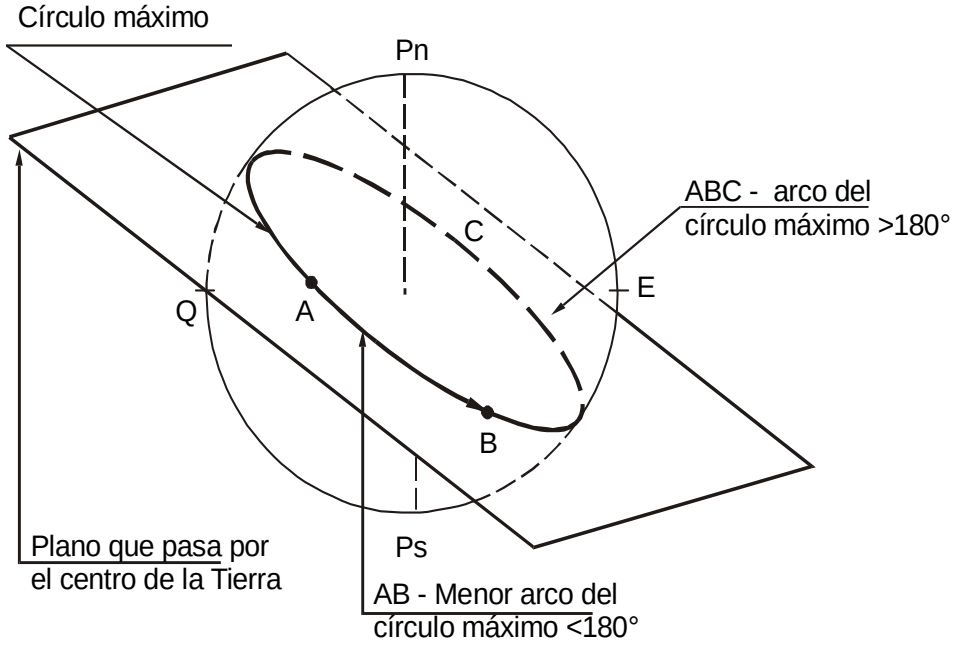


Fig. 341 Representación del circulo maximo en la superficie terretre

La diferencia entre la línea de rumbo (loxodrómica) y el menor arco de círculo máximo (ortodrómica) que une los dos puntos, aumenta:

a) al aumentar la longitud

b) al disminuir la diferencia de latitud ($\Delta\varphi$).

c) al aumentar la diferencia de longitud ($\Delta\lambda$)

A diferencia de la derrota loxodrómica en la cual el rumbo es constante (la línea de rumbo corta a los meridianos con el mismo ángulo), en la navegación por círculo máximo u ortodrómica es necesario cambiar constantemente el rumbo, ya que esta corta los meridianos con águlos diferentes .

Dada esta dificultad y por ser en la práctica la diferencia muy pequeña, se navega siguiendo una línea quebrada por varias loxodrómicas, modificándose el rumbo una o dos veces por singladura o cada 200 – 300 millas, según el criterio establecido.

Entre dos puntos, la ortodrómica se halla siempre más cercana al polo elevado que la loxodrómica y navegando de la forma anteriormente expuesta tiene en la carta Mercator el trazado que indica la figura 342 que aunque aparentemente mayor que la ortodrómica; no lo es en realidad por estar ploteada en una longitud más elevada a la que corresponde distancias menores. En este tipo de proyección siempre tiene la concavidad hacia el Ecuador y con un punto de inflexión en el mismo, en el caso de que los puntos de salida y llegada estén en diferentes hemisferios (Fig.356 y 357) En las cartas gnomónicas la ortodrómica (las más adecuadas para este tipo de navegación) viene representada por una línea recta.

Es evidente que tanto el Ecuador como los meridianos son líneas ortodrómicas.

Por todo lo antes expuesto al navegante le es imprescindible estudiar las particularidades de este tipo de navegación, así como saber realizar todos los cálculos a fin de obtener los datos necesarios que garanticen la seguridad durante la travesía.

Para deducir las fórmulas para los cálculos de la navegación ortodrómica introduzcamos la siguiente simbología:

S_{ORT} – distancia de la ortodrómica entre los puntos de salida y llegada.
S_{LOX} – distancia de la loxodrómica entre los puntos de salida y llegada.
R_{LOX} – rumbo loxodrómico entre los puntos de salida y llegada.
φ_m – latitud media entre los puntos de salida y llegada.
R_1 – dirección de la ortodrómica (rumbo ortodrómico) en el punto de salida.
R_2 – dirección de la ortodrómica (rumbo ortodrómico) en el punto de llegada.
φ_1, λ_1 – coordenadas del punto de salida.
φ_2, λ_2 – coordenadas del punto de salida.

La diferencia (ΔS) entre los espacios ortodrómico (S_{ORT}) y loxodrómico (S_{LOX}) está condicionado por la disposición de los puntos, entre los cuales ellos pasan. El máximo valor de esta diferencia para igualdad de condiciones se alcanza, cuando los puntos de salida y llegada están en un mismo paralelo (R_{LOX} = 90° ó 270° ; para $\varphi \neq 0$); la diferencia $S_{LOX} - S_{ORT} = 0$, cuando estos puntos se encuentran en un mismo meridiano (R_{Lox} = 0° ó 180°). En este último caso la loxodrómica y la ortodrómica coinciden con el meridiano. Y finalmente la diferencia $S_{LOX} - S_{ORT}$ toma valores medios cuando los rumbos loxodrómicos están próximos a los colaterales (45°, 135°, 225°, 315°).

Ante distancias relativamente pequeñas entre los puntos, la diferencia en distancia entre la ortodrómica y la loxodrómica puede resultar insignificante. Por eso en cada caso específico antes de comenzar los cálculos para el ploteo previo, debe cerciorarse que esta diferencia es considerable.

En la carta Mercator la ortodrómica se representa como una línea curva teniendo su convexidad próxima a los polos geográficos (Fig. 342). El trazado que indica la figura que aunque aparentemente mayor que la loxodrómica no lo es en realidad por estar trazada en una latitud más elevada a la que corresponden distancias menores. A diferencia de la loxodrómica en la cual los rumbos son constantes, la ortodrómica corta los meridianos con diferentes ángulos y para llevar el buque por la misma con ayuda de los indicadores de rumbos comunes, es necesario cambiar ininterrumpidamente el rumbo, lo cual prácticamente es imposible cumplirlo. Dada esta dificultad y por ser en realidad la diferencia muy

pequeña, se navega siguiendo una línea quebrada por varias loxodrómicas, modificándose el rumbo una o dos veces por singladura o cada 200 - 300 millas, según el criterio establecido.

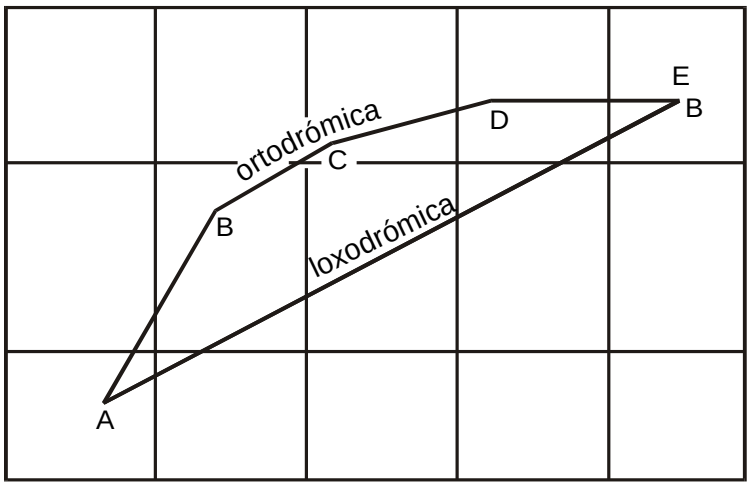


Fig. 342

Evidentemente mientras menor sean los intervalos de los rumbos loxodrómicos, tanto más cerca estará la línea quebrada de la ortodrómica. Sin embargo efectuar rumbos loxodrómicos muy cortos (cuerdas) en presencia del girocompás no es conveniente.

Durante los cálculos para la navegación ortodrómica es necesario determinar:

- espacio ortodrómico (S_{ORT})
- espacio loxodrómico (S_{LOX})
- número de los rumbos loxodrómicos intermedios
- coordenadas de los puntos intermedios de la ortodrómica para ser ploteados en la carta Mercator.
- longitud del punto de corte con el Ecuador.

Para la deducción de las fórmulas de cálculo necesarios utilicemos la figura 343 con la representación del círculo máximo ABVF, cuyo arco menor AB será objeto de nuestro análisis.

La posición de cualquier círculo máximo en la esfera se determina por sus parámetros λ_0 y R_0 ó φ_v y λ_v.

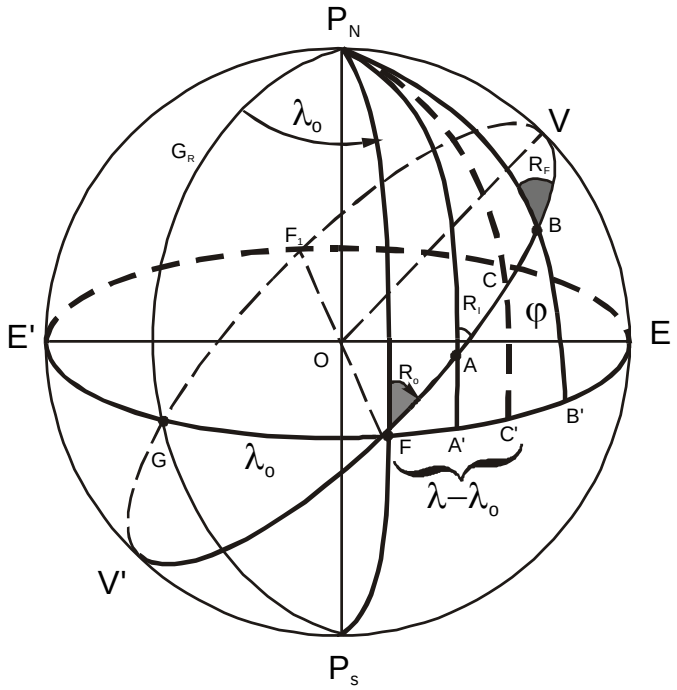


Fig. 343

El parámetro λ_0 determina la longitud del punto (nodo o punto de inflexión) en el cual el círculo máximo corta al Ecuador; R_0 representa la dirección (rumbo) del círculo máximo en el mismo punto.

Los puntos V y V' en los cuales el círculo máximo alcanza el mayor valor de latitud Norte y Sur, se denominan **vértices del círculo máximo**, y los parámetros de la ortodrómica φ_v y λ_v determinan las coordenadas del vértice.

En los vértices el círculo máximo es perpendicular al meridiano y por consiguiente, tiene dirección E- W. Los vértices están alejados en longitud del punto de corte del círculo máximo con el ecuador en ± 90°.

Los parámetros del círculo máximo están relacionados entre sí mediante las siguientes expresiones:

$$\varphi_v = 90° - R_0 \qquad R_0 = 90° - \varphi_v$$
$$\lambda_v = \lambda_0 \pm 90° \qquad \lambda_0 = \lambda_v \mp 90° \qquad (411)$$

Para mayor compresión en la deducción de las fórmulas representemos aisladamente los triángulos FCC' y FVE (Fig. 344)

Del triángulo esférico rectángulo FCC' aplicando la primera regla de *Napier (el seno de una parte media es igual al producto de las tangentes de las partes adyacentes) obtenemos que:

$$\text{sen}(\lambda - \lambda_0) = \tan\varphi \tan\left(\overline{90° - R_0}\right),$$

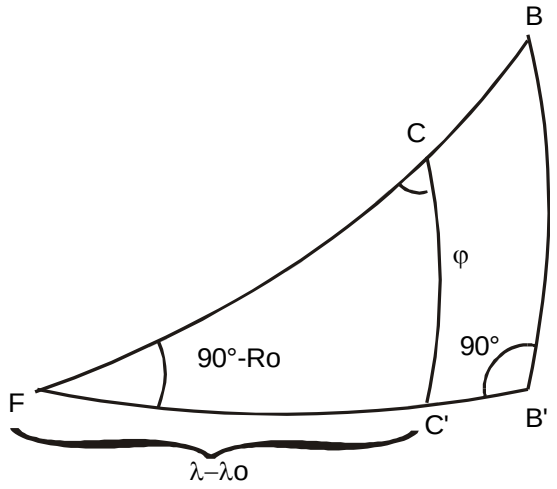
de donde:

$$\text{sen}(\lambda - \lambda_0) = \tan\varphi \tan R_0$$

$$\tan R_0 = \cot\varphi \operatorname{sen}(\lambda - \lambda_0)$$

ó

$$\tan\varphi = \tan\varphi_v \cos(\lambda - \lambda_v) \qquad (412)$$



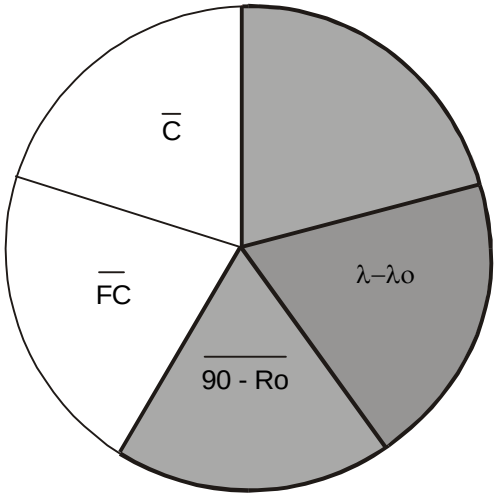


Fig. 344.

Sustituyendo los valores de R_0 y λ_0 (411) en (412) obtenemos:

$$\tan\varphi = \tan\varphi_v \cos(\lambda - \lambda_v) \qquad (413)$$

Las fórmulas 412 y 413 representan las ecuaciones de la ortodrómica en la esfera. En la primera las coordenadas corrientes φ y λ del punto arbitrario C en el arco de círculo máximo están expresadas a través de los parámetros de la ortodrómica λ_0 y R_0 y la segunda a través de las coordenadas del vértice φ_v y λ_v.

La figura 344 representa un triángulo esférico rectángulo, y en la Fig. 345 aparecen todas las letras de la figura anterior, excepto C (90°), y dispuestas en el mismo orden. Las barras sobre las letras C, FC y 90 – R_0 significan que se han de tomar los complementos de sus valores y corresponden a la hipotenusa y a los ángulos agudos. Las términos C, φ, $\lambda - \lambda_0$, 90 – R_0 y FC reciben el nombre de ***partes circulares****. La parte que se considera (incógnita) se llama* ***parte media****; las dos partes contigua,* ***partes adyacentes*** *y las otras dos,* ***partes opuestas****. Conociendo estos elementos podemos plantear las Reglas de Neper.*

Reglas de Neper.

Regla I. El seno de una parte media es igual al producto de las tangentes de las partes adyacentes.

Regla II. El seno de una parte media es igual al producto de los cosenos de las partes opuestas.

Como puede observarse en la figura 345 el sector de la circunferencia donde se encuentra ($\lambda - \lambda_0$), es la parte media, los sectores donde se hallan φ y (90 – R_0) son las partes adyacentes y $\overline{C}$ y $\overline{FC}$ *son las partes opuestas.*

12.2 Cálculo de los parámetros de la ortodrómica

Como se puede observar de las fórmulas 412 y 413, para hallar las coordenadas de cualquier punto del arco de círculo máximo que pasa por los puntos de salida A (φ_I, λ_I,) y llegada B (φ_2, λ_2), se debe calcular

previamente los parámetros R_0, λ_0 ó φ_v, λ_v de este círculo. Para esto es necesario conocer la relación de las coordenadas de los puntos de salida y llegada con los parámetros de la ortodrómica, que pasa a través de estos puntos.

Utilizando la fórmula de la ortodrómica 412 para las coordenadas de los puntos de salida y llegada:

$$\left.\begin{aligned} \tan\varphi_1 &= \cot g R_0 \operatorname{sen}(\lambda_1 - \lambda_0) \\ \tan\varphi_2 &= \cot g R_0 \operatorname{sen}(\lambda_2 - \lambda_0) \end{aligned}\right\} \qquad (414)$$

Para hallar λ_0, dividamos la segunda ecuación entre la primera:

$$\frac{\tan\varphi_2}{\tan\varphi_1} = \frac{\operatorname{sen}(\lambda_2 - \lambda_0)}{\operatorname{sen}(\lambda_1 - \lambda_0)}$$

Aplicando una de las propiedades de las proporciones obtenemos que:

$$\frac{\tan\varphi_2 + \tan\varphi_1}{\tan\varphi_1} = \frac{\operatorname{sen}(\lambda_2 - \lambda_0) + \operatorname{sen}(\lambda_1 - \lambda_0)}{\operatorname{sen}(\lambda_1 - \lambda_0)}$$

$$\frac{\tan\varphi_2 - \tan\varphi_1}{\tan\varphi_1} = \frac{\operatorname{sen}(\lambda_2 - \lambda_0) - \operatorname{sen}(\lambda_1 - \lambda_0)}{\operatorname{sen}(\lambda_1 - \lambda_0)}$$

Dividiendo la primera expresión entre la segunda y simplificando:

$$\frac{\tan\varphi_2 + \tan\varphi_1}{\tan\varphi_2 - \tan\varphi_1} = \frac{\operatorname{sen}(\lambda_2 - \lambda_0) + \operatorname{sen}(\lambda_1 - \lambda_0)}{\operatorname{sen}(\lambda_2 - \lambda_0) - \operatorname{sen}(\lambda_1 - \lambda_0)}$$

Sustituyendo los senos y cosenos por las tangentes en el primer miembro, y en el segundo miembro las fórmulas de la adición y sustracción por las fórmulas de suma y diferencia de poductos tenemos que:

$$\frac{\dfrac{\operatorname{sen}\varphi_2}{\cos\varphi_2} + \dfrac{\operatorname{sen}\varphi_1}{\cos\varphi_1}}{\dfrac{\operatorname{sen}\varphi_2}{\cos\varphi_2} - \dfrac{\operatorname{sen}\varphi_1}{\cos\varphi_1}} = \frac{2\operatorname{sen}\dfrac{\lambda_2 - \lambda_0 + \lambda_1 - \lambda_0}{2}\cos\dfrac{\lambda_2 - \lambda_0 - \lambda_1 - \lambda_0}{2}}{2\cos\dfrac{\lambda_2 - \lambda_0 + \lambda_1 - \lambda_0}{2}\operatorname{sen}\dfrac{\lambda_2 - \lambda_0 - \lambda_1 - \lambda_0}{2}}$$

Desarrollando y simplificando:

$$\frac{\operatorname{sen}(\varphi_2 + \varphi_1)}{\operatorname{sen}(\varphi_2 - \varphi_1)} = \frac{2\operatorname{sen}\left(\dfrac{\lambda_2 + \lambda_1}{2} - \lambda_0\right)\cos\left(\dfrac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}{2\cos\left(\dfrac{\lambda_2 + \lambda_1}{2} - \lambda_0\right)\operatorname{sen}\left(\dfrac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}$$

$$\frac{\operatorname{sen}(\varphi_2 + \varphi_1)}{\operatorname{sen}(\varphi_2 - \varphi_1)} = \tan\left(\frac{\lambda_2 + \lambda_1}{2} - \lambda_0\right)\cot\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right).$$

De esta última expresión hallemos la fórmula para el cálculo de los parámetros de la ortodrómica λ_0:

$$\tan\left(\frac{\lambda_2 + \lambda_1}{2} - \lambda_0\right) = \tan\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)\operatorname{sen}(\varphi_2 + \varphi_1)\csc(\varphi_2 - \varphi_1) \qquad (415)$$

Esta fórmula a pesar de ser relativamente voluminosa, es muy cómoda para fines prácticos ya que por su aspecto se puede aplicar logaritmos o utilizar una calculadora científica en base a los datos iniciales conocidos por el navegante.

Al determinar el parámetro λ_0 por la fórmula 415 se debe establecer la regla de los signos como sigue:

- **en latitudes Norte y longitudes Este se asume signo más (+);**
- **en latitudes Sur y longitudes Oeste signo (–);**
- **en el proceso de solución de las tareas en ocasiones es racional considerar la longitud respecto al meridiano de Greenwich en sentido de las manecillas del reloj, o sea hacia el este, de 0 a 360° simbolizándola con signo más (+);**
- **el signo de la semisuma $\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2}$ debe corresponder al signo del meridiano medio entre los meridianos final e inicial de los puntos.**
- **el signo de $\frac{\lambda_2-\lambda_1}{2}$ se determina de la dirección del movimiento del buque. Durante el movimiento del mismo hacia el este, la semidiferencia de longitud tiene signo más (+); hacia el oeste tiene signo menos (–).**
- **los signos de la suma ($\varphi_2+\varphi_1$) y la diferencia ($\varphi_2-\varphi_1$) se hallan por las reglas lgebraicas habituales en correspondencia con los dos primeros puntos de la presente regla.**

Para un control constante de la veracidad de todos los cálculos, relacionados con la ortodrómica; se recomienda realizar los cálculos, teniendo ante sí una representación esquemática sobre la esfera, mostrando en el gráfico la posición de la ortodrómica sobre la esfera, el ecuador, el meridiano de Greenwich 0 ó 180°

Para un control constante de la veracidad de todos los cálculos, relacionados con la ortodrómica; se recomienda realizar los cálculos, teniendo ante sí una representación esquemática sobre la esfera, mostrando en el gráfico la posición de la ortodrómica sobre la esfera, el ecuador, el meridiano de Greenwich 0 ó 180°.

Las fórmulas para el cálculo del segundo parámetro de la ortodrómica (R_0) también se deduce de la ecuación del arco de círculo máximo 412 y tiene la forma:

$$\cot R_0 = \tan\varphi_1 \csc(\lambda_1-\lambda_0);$$
$$\cot R_0 = \tan\varphi_2 \csc(\lambda_2-\lambda_0). \qquad (416)$$

ó

$$\tan R_0 = \cot\varphi_1 \operatorname{sen}(\lambda_1-\lambda_0).$$
$$\tan R_0 = \cot\varphi_2 \operatorname{sen}(\lambda_2-\lambda_0).$$

Si se necesita calcular otro grupo de parámetros de la ortodrómica (φ_v, λ_v) entonces para esto se calculan los parámetros λ_0 y R_0 utilizando correspondientemente la fórmula 413. Sin embargo φ_v y λ_v generalmente se calculan cuando λ_0 y R_0 se desconocen. En este caso para el cálculo de λ_v se emplea la fórmula:R

$$\tan\left(\frac{\lambda_1+\lambda_2}{2}-\lambda_v\right)=\cot\left(\frac{\lambda_1-\lambda_2}{2}\right)\operatorname{sen}(\varphi_1-\varphi_2)\csc(\varphi_1+\varphi_2) \qquad (417)$$

la cual se deduce de la ecuación de la ortodrómica 413 de forma análoga como se dedujo la fórmula 415. Para calcular φ_v se utiliza una de las siguientes fórmulas:

$$\cot\varphi_v=\cot\varphi_1\cos(\lambda_1-\lambda_v);$$
$$\cot\varphi_v=\cot\varphi_2\cos(\lambda_2-\lambda_v);$$

ó (418)

$$\tan\varphi_v=\tan\varphi_1\sec(\lambda_1-\lambda_v);$$
$$\tan\varphi_v=\tan\varphi_2\sec(\lambda_2-\lambda_v);$$

las cuales se obtuvieron de la ecuación de la ortodrómica 413 considerando las coordenadas del vértice.

Ejemplo: Calcular los parámetros λ_0, R_0, φ_v, λ_v de la ortodrómica, que pasa por los puntos A (φ_1, λ_1) y B(φ_2, λ_2) , que tiene las coordenadas:

φ_1= 44°42,0'N, λ_1= 64°58,0' W.

φ_2= 43°25,0'N, λ_2= 8°06,0' W.

Solución. Representemos gráficamente la posición de la ortodrómica (Fig.346). Calculemos el parámetro λ_0 por la fórmula 415.

Analicemos previamente los signos:

$$\tan\left(\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2}-\lambda_0\right)=\tan\left(\frac{\lambda_2^+-\lambda_1}{2}\right)\operatorname{sen}(\varphi_2^++\varphi_1)\csc(\varphi_2^--\varphi_1)$$

Argumentos.

$$\frac{\lambda_2-\lambda_1}{2}=\frac{-8°06'-(-64°58,0')}{2}=+28°26,0'$$
$$\varphi_2+\varphi_1=43°25,0'+44°42,0'=+88°07,0'$$
$$\varphi_2-\varphi_1=43°25,0'-(+44°42,0')=-1°17,0'$$
$$\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2}=\frac{-8°06'+(-64°58,0')}{2}=-36°32,0'$$

Para determinar el valor del parámetro λ_0 utilizando la calculadora científica es conveniente expresar la fórmula 415 en la forma:

$$\tan R_0=\cot\varphi_1\operatorname{sen}(\varphi_2-\varphi_1)$$

$$\tan\left(\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2}-\lambda_0\right)=\frac{\operatorname{sen}(\varphi_2+\varphi_1)\tan\left(\frac{\lambda_2-\lambda_1}{2}\right)}{\operatorname{sen}(\varphi_2-\varphi_1)} \qquad (419)$$

Sustituyendo los valores en la fórmula 419 obtenemos:

$$\tan\left(\frac{\lambda_1+\lambda_2}{2}-\lambda_0\right)=\frac{\operatorname{sen}88°07'\tan 28°26'}{\operatorname{sen}(-1°17')}$$

$$=\frac{0{,}999459 x 0{,}541442}{-0{,}022390}$$

$$\tan\left(\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2}-\lambda_0\right)=-24{,}168507$$

$$\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2}-\lambda_0=-87°37{,}5' \quad \text{pero} \quad \frac{\lambda_2+\lambda_1}{2}=-36°32'$$

Finalmente

$$-36°32'-\lambda_0=-87°37{,}5'$$

$$\lambda_0=87°37{,}5'-36°32'=+51°05{,}5'$$

$$\lambda_0=51°05{,}5'E$$

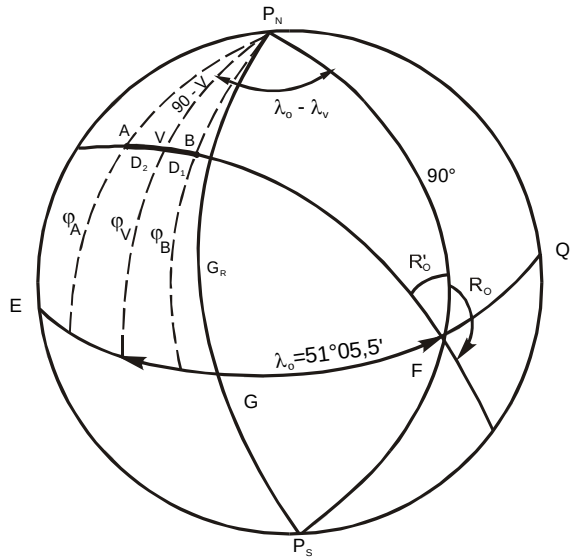


Fig. 346

Calculemos el parámetro R_0 por cualquiera de las fórmulas $\tan R_0 = \cot\varphi_1 \operatorname{sen}(\lambda_1 - \lambda_0)$ ó $\tan R_0 = \cot\varphi_2 \operatorname{sen}(\lambda_2 - \lambda_0)$

Realicemos el cálculo por las dos fórmulas para comparar los resultados.

Argumentos

$$\varphi_1=+44°42{,}0'$$

$$\lambda_1-\lambda_0=61°58{,}0'-(+51°05{,}5')=-116°03{,}5'$$

Sustituyamos los valores en la primera fórmula:

$$\tan R_0=\frac{\operatorname{sen}(\lambda_1-\lambda_0)}{\tan\varphi_1}$$

$$=\frac{\operatorname{sen}(-116°03{,}3')}{\tan 44°42'}$$

$$=\frac{-0{,}898349}{0{,}989582}=-0{,}907806$$

$$R'_0 = -42°14'$$
$$R'_0 = 180° - R'_0$$
$$R_0 = 137°46'$$

Calculemos R_0 por la segunda fórmula para comprobar:

$$\tan R_0 = \frac{\operatorname{sen}(\lambda_2 - \lambda_0)}{\tan \varphi_2}$$

Argumentos

$$\boxed{\begin{aligned} \varphi_2 &= +\ 43°25{,}0' \\ \lambda_2 - \lambda_0 &= -\ 8°06' - (+51°05{,}5') = -59°11{,}5' \end{aligned}}$$

$$\tan R_0 = \frac{\operatorname{sen}(-59°11{,}5')}{\tan 43°25'}$$
$$= -\frac{0{,}858884}{0{,}946204} = -0{,}907716$$
$$R_0 = 42°13{,}5'$$
$$R'_0 = 180° - 42°13{,}5'$$

$$\boxed{R_0 = 137°46{,}5'}$$

Coordenadas de los vértices. Como se definió anteriormente los vértices de la ortodrómica son los puntos V y V' (Fig. 343) de la misma, en que ésta alcanza las máximas latitudes. El cálculo de sus coordenadas (φ_v, λ_v) es interesante y conveniente sobre todo si uno de los vértices queda entre los puntos de salida y llegada, como en el ejemplo anterior.

Para calcular λ_v se utiliza la fórmula 417:

$$\tan\left(\frac{\lambda_1^- + \lambda_2}{2} - \lambda_v\right) = \frac{\operatorname{sen}(\varphi_1^+ - \varphi_2)}{\operatorname{sen}(\varphi_1^+ + \varphi_2)\tan\left(\frac{\lambda_2^+ - \lambda_1}{2}\right)}$$

Los argumentos a emplear en la solución de la fórmula son los del ejemplo anterior.

Argumentos

$$\boxed{\begin{aligned} \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} &= +\ 28°26' \\ \varphi_1 - \varphi_2 &= +\ 1°17{,}0' \\ \varphi_1 - \varphi_2 &= +88°07{,}0' \\ \frac{\lambda_2 + \lambda_1}{2} &= -\ 36°32{,}0' \end{aligned}}$$

$$\tan\left(\frac{\lambda_1^- + \lambda_2}{2} - \lambda_v\right) = \frac{\text{sen}1°17,0'}{88°07,0'\tan 28°26'}$$

$$= \frac{0,022338}{0,999459x0,541442}$$

$$\tan\left(\frac{\lambda_1^- + \lambda_2}{2} - \lambda_v\right) = 0,041279$$

$$\frac{\lambda_1^- + \lambda_2}{2} - \lambda_v = +2°22'$$

de donde

$$\lambda_v = -36°32,0' - 2°22'$$

$$\lambda_v = -38°54'$$

$$\lambda_v = \quad 38°54'W\,; \qquad \lambda_v = 141°06'E$$

Para el cálculo del parámetro φ_v se utiliza la fórmula 413

$$\tan\varphi_v = \frac{\tan\varphi_1}{\cos(\lambda_1 - \lambda_v)}$$

$$\lambda_1 - \lambda_v = -64°58,0' - (-3854) = -26°04'$$

$$\varphi_1 = +44°42,0'$$

$$\tan\varphi_v = \frac{\tan 44°42,0'}{\cos(-26°04')} = \frac{0,989582}{0,898288} = 1,101631$$

$$\varphi_v = 47°46'$$

Para comprobar los resultados se puede utilizar la fórmula (411)

$$\lambda_v = \lambda_0 + 90° \quad = 141°05,8'E$$

$$\lambda_v = \lambda_0 - 90° \quad = 038°54,2'W$$

$$\varphi_v = 90° - R'_0 = \pm 47°46'N$$

12.3 Trazado del arco de círculo máximo en la carta Mercator y cálculo de los rumbos para la navegación

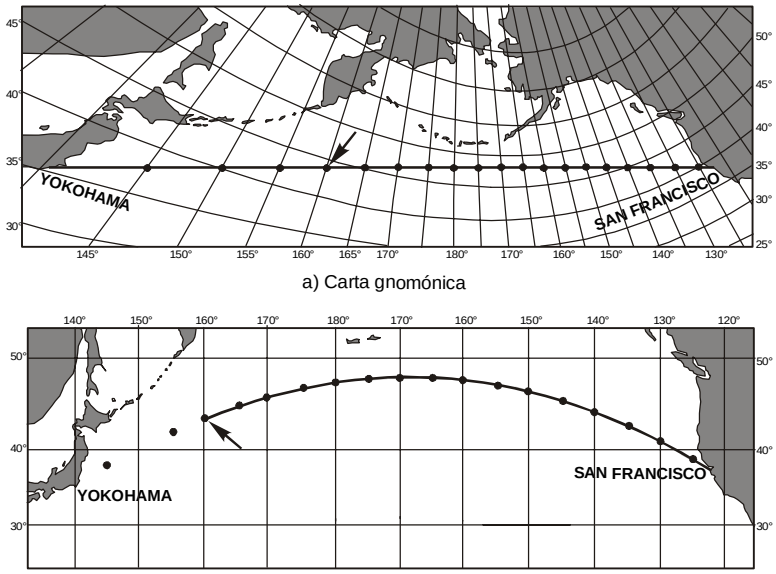
El arco de círculo máximo se traza en la carta náutica de proyección Mercator por los puntos cuyas coordenadas pueden ser:

- tomadas de la carta de proyección gnomónica
- calculadas por las fórmulas o seleccionadas de tablas especiales.
- ploteado en la carta utilizando la corrección ortodrómica.
- seleccionado de publicaciones especiales (Pilot chart) para la navegación por derrotas recomendadas (más ventajosa).

Analicemos la esencia de los tres primeros métodos:

Trazado del arco de círculo máximo por los puntos cuyas coordenadas son tomadas de la carta gnomónica

Es conocido, que en la carta de proyección gnomónica el arco de círculo máximo se representa por una línea recta. Por consiguiente si en esta carta se plotea el punto de salida A y el de llegada B (Fig. 347) y se unen estos puntos por una línea recta, entonces se puede tomar las coordenadas de los puntos a, b, c..... que se encuentran en la recta AB y plotear estos puntos en la carta Mercator. Trazando a través de los puntos obtenidos una curva suave, tendremos la representación del arco de círculo máximo.



a) Carta gnomónica

b) Carta Mercator

Fig. 347 Construcción de la derrota por circulo máximo en la carta de proyección Mercator

Debido a que la carta utilizada en la proyección gnomónica debe abarcar una gran región; inevitablemente la escala será muy pequeña y por eso las coordenadas de los puntos se toman con grandes errores. Teniendo en cuenta este aspecto, el método analizado puede ser recomendado para la orientación general de la menor derrota posible del buque.

Trazado del arco de círculo máximo por los puntos cuyas coordenadas son calculadas por las fórmulas o seleccionadas de las tablas especiales

Este método es el fundamental y más exacto, sin embargo exige considerables cálculos.

El cálculo de las coordenadas de los puntos, que se encuentran en el arco de círculo máximo que pasa por los puntos de salida y llegada, puede ser efectuado por dos métodos:

1) utilizando los parámetros λ_0 y R_0 ó

2) utilizando las coordenadas del vértice.

En el primero por las coordenadas de los puntos de salida y llegada es necesario calcular inicialmente los parámetros λ_0 y R_0.

El trazado del arco de círculo máximo puede efectuarse calculando por ejemplo, las latitudes de los puntos φ_i los cuales este arco corta los meridianos con las longitudes dadas de antemano. Para calcular las latitudes se emplea la ecuación del arco de círculo máximo:

$$\tan\varphi_i = \text{sen}\,(\lambda_i - \lambda_0)\cot R_0$$

También se puede calcular las longitudes λ_i de los puntos de intersección del arco de círculo máximo con los paralelos dados. Para la solución de esta tarea se emplea la fórmula:

$$\text{sen}(\lambda_i - \lambda_0) = \tan\varphi_i \tan R_0$$

Ejemplo. Determinar las latitudes de los puntos de salida, en los cuales el arco de círculo máximo corta los meridianos cada 10°, si las coordenadas del punto (A) $\varphi_1 = 23°00'$S $\lambda_1 = 43°30'$W y punto de llegada (B) $\varphi_2 = 31°00'$S, $\lambda_2 = 79°50'$E.

Solución 1) Calculemos λ_0 y R_0

Argumentos

$$\frac{\lambda_2-\lambda_1}{2} = \frac{79°50'-(-43°30')}{2} = \frac{123°20'}{2} = 61°40'$$

$$\varphi_2+\varphi_1 = -23°00'+(-31°00) = -54°00'$$

$$\varphi_2-\varphi_1 = -31°00'-(-23°00) = -8°00'$$

$$\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2} = \frac{79°50'+(-43°30')}{2} = \frac{36°20'}{2} = 18°10'$$

Sustituyendo los valores en la fórmula:

$$\tan\left(\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2} - \lambda_0\right) = \frac{\text{sen}(\varphi_2+\varphi_1)\tan\left(\frac{\lambda_2-\lambda_1}{2}\right)}{\text{sen}(\varphi_2-\varphi_1)}$$

$$= \frac{\text{sen}(-54°00')\tan 61°40'}{\text{sen}(-8°00')}$$

$$= \frac{0{,}809016 \text{x} 1{,}854564}{-0{,}139173}$$

$$\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2} - \lambda_0 = 84°42'$$

Sustituyendo $\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2} = 18°10'$ obtenemos que

$$18°10' - \lambda_0 = 84°42'$$

$$\lambda_0 = -66°32'$$

$$\lambda_0 = 66°32'\text{W}$$

Calculamos R_0

$$\tan R_0 = \frac{\operatorname{sen}(\lambda_1 - \lambda_0)}{\tan\varphi_1}$$

$$\lambda_1 - \lambda_0 = -43°30' - (-66°32) = 23°02'$$

$$\lambda_1 - \lambda_0 = 23°02'E$$

Sustituyendo valores en tan R_0

$$\tan R_0 = \frac{\operatorname{sen} 23°02'}{\tan 23°00'} = \frac{0{,}391261}{0{,}424474}$$

$$= 0{,}921753$$

$$R_0 = 42°40{,}1'$$

$$\varphi_v = 90° - R_0$$

$$\varphi_v = 47°19{,}9'S$$

Por los argumentos λ_1 -λ_0 y R_0 hallemos las latitudes λ_i de los puntos de corte del arco de círculo máximo con los meridianos, empleando la fórmula:

$$\tan\varphi_i = \operatorname{sen}(\lambda_i - \lambda_0)\cot R_0$$

ó

$$\tan\varphi_i = \frac{\operatorname{sen}(\lambda_i - \lambda_0)}{\cot R_0}$$

Sustituyendo valores:

$$\tan\varphi_1 = \frac{\operatorname{sen}30°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{0{,}5}{0{,}921750} = 0{,}542446 \quad \Rightarrow \quad \varphi_1 = 28°28{,}6'$$

$$\tan\varphi_2 = \frac{\operatorname{sen}40°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{0{,}642787}{0{,}921750} = 0{,}697355 \quad \Rightarrow \quad \varphi_2 = 34°53{,}4'$$

$$\tan\varphi_3 = \frac{\operatorname{sen}50°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{0{,}766044}{0{,}921750} = 0{,}831075 \quad \Rightarrow \quad \varphi_3 = 39°43{,}7'$$

$$\tan\varphi_4 = \frac{\operatorname{sen}60°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{0{,}939544}{0{,}921750} = 0{,}939544 \quad \Rightarrow \quad \varphi_4 = 43°12{,}9'$$

$$\tan\varphi_5 = \frac{\operatorname{sen}70°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{0{,}939692}{0{,}921750} = 1{,}019465 \quad \Rightarrow \quad \varphi_5 = 45°33{,}3'$$

$$\tan\varphi_6 = \frac{\operatorname{sen}80°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{0{,}984807}{0{,}921750} = 1{,}068410 \quad \Rightarrow \quad \varphi_6 = 46°53{,}6'$$

$$\tan\varphi_7 = \frac{\operatorname{sen}90°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{1}{0{,}921750} = 1{,}084892 \quad \Rightarrow \quad \varphi_7 = 47°19{,}9'$$

$$\tan\varphi_8 = \frac{\operatorname{sen}100°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{0{,}984807}{0{,}921750} = 1{,}068410 \quad \Rightarrow \quad \varphi_8 = 46°53{,}6'$$

$$\tan\varphi_9 = \frac{\operatorname{sen}110°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{0{,}939692}{0{,}921750} = 1{,}019465 \quad \Rightarrow \quad \varphi_9 = 45°33{,}3'$$

$$\tan\varphi_{10} = \frac{\text{sen}120°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{0{,}866025}{0{,}921750} = 0{,}939544 \quad \Rightarrow \quad \varphi_{10} = 43°12{,}9'$$

$$\tan\varphi_{11} = \frac{\text{sen}130°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{0{,}766044}{0{,}921750} = 0{,}831075 \quad \Rightarrow \quad \varphi_{11} = 39°43{,}7'$$

$$\tan\varphi_{12} = \frac{\text{sen}140°}{\tan 42°40{,}1'} = \frac{0{,}642787}{0{,}921750} = 0{,}697355 \quad \Rightarrow \quad \varphi_{12} = 34°53{,}4'$$

No	λ_i	λ_0	$(\lambda_i - \lambda_0)$	φ_i
1	36°32'W	-66°32'W	30	28°28,6'
2	26 32	-66 32	40	34 53,4
3	16 32	-66 32	50	39 43,7
4	6 32	-66 32	60	43 12,9
5	3 28	-66 32	70	45 33,1
6	13 28	-66 32	80	46 53,6
7	23 28	-66 32	90	47 19,9
8	33 28	-66 32	100	46 53,6
9	43 28	-66 32	110	45 33,1
10	53 28	-66 32	120	43 12,9
11	63 28	-66 32	130	39 43,7
12	63 28	-66 32	140	34 53,4

Para calcular las latitudes en las cuales el arco de círculo máximo corta los meridianos cada 10° se consideró utilizar para calcular la latitud del primer punto (φ_1), una longitud próxima $(\lambda'_1 = 36°32'W)$ a la longitud inicial $(\lambda_1 = 43°32'W)$ que no se va a diferenciar de los10° respecto a la longitud del punto de salida (longitud inicial):

$(\lambda'_1 - \lambda_1) = -36°32' - (-43°30') = 6°58' \neq 10°)$

Como puede apreciarse esta longitud sumada con la longitud del punto de corte $(\lambda_0 = -66°32')$ nos da un número que es múltiplo de 10*, lo que permite simplificar considerablemente el cálculo de los puntos restantes de la ortodrómica.

*

El arco de círculo máximo, trazado por las coordenadas de estos puntos en la carta Mercator está mostrada en la en la figura 348.

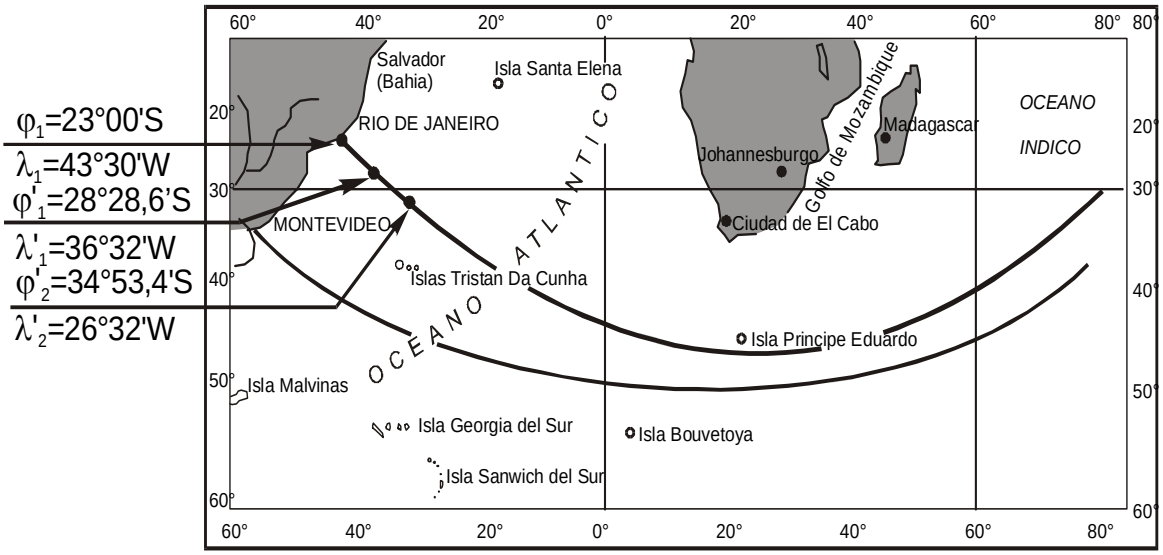


Fig. 348 Trazado del arco de círculo máximo por puntos

12.4 Navegación por arco de círculo máximo utilizando la corrección ortodrómica

La práctica demuestra, que la conducción real del buque por la ortodrómica generalmente no se efectúa por los cálculos del ploteo previo. La causa de éste fenómeno radica fundamentalmente en la consideración incorrecta de la corriente o abatimiento del buque debido al viento y oleaje:

Al obtener la posición del buque por observaciones (posición fija), al navegante siempre le es necesario resolver la cuestión: ¿ Será necesario corregir el rumbo de forma que el buque se mantenga en la derrota previamente propuesta?. Durante el trayecto entre los puntos de salida y llegada el navegante realiza no menos de 12 – 15 observaciones (fundamentalmente astronómicas). Si después de cada una de éstas el buque cambia de rumbo para mantener la derrota previamente calculada, entonces en primer lugar el cálculo y el ploteo se complican; en segundo lugar, en la corrección del rumbo se perderá una parte considerable de la ganancia de distancia cuyo provecho se obtiene en la navegación por ortodrómica. Por esta razón el navegante desde tiempos remotos llegó a recurrir a diferentes métodos prácticos mejorando por consiguiente la navegación ortodrómica. En la actualidad uno de los métodos más racionales en la navegación por círculo máximo es empleando la corrección ortodrómica.

Para el punto de salida A de la ortodrómica AB (Fig. 349) se calcula el primer rumbo ortodrómico R_{ORT} Para la obtención de R_{ORT} se utiliza la tabla 23 – a TUN, mediante la cual con los argumentos φ_A, φ_B, $\varphi_m = (\varphi_A+\varphi_B)/2$ y $\Delta\lambda = \lambda_B - \lambda_A$ se selecciona la corrección ortodrómica ψ'_0 respecto al rumbo loxodrómico R_{LOX1} entre los puntos A y B ó por las fórmulas $\psi = 1/2(\lambda_2 - \lambda_1)\text{sen}\varphi_1$ para $\Delta\lambda \leq 30°$ y $\tan\psi = \tan[(\lambda_2 - \lambda_1)/2]\text{sen}\varphi_1$ (para $\Delta\varphi > 30$).

El rumbo loxodrómico R_{LOX} puede ser calculado por la fórmula 403 o tomarlo directamente de la carta Mercator con ayuda de la regla paralela y el transportador. Aplicando la corrección ortodrómica (ψ)al rumbo loxodrómico R_{LOX} hallado, hallamos el primer rumbo ortodrómico R'_I.

$R'_I = R_{LOX1} \pm \psi'_0$

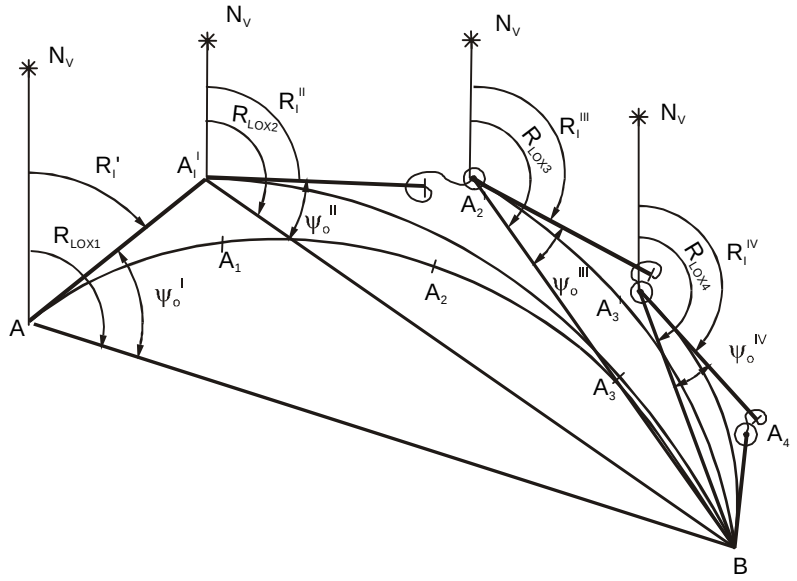


Fig. 349 Navegación por cículo máximo utilizando la corrección ortodrómica (Navegación por la tangente)

Muchos navegantes limitan estos cálculos y, conducen el buque por el rumbo calculado R_I a una distancia de 200 - 300 millas náuticas o hasta la primera observación. Obteniendo la posición por observaciones o por la posición de estima, el navegante considera el nuevo punto de salida A'_1 y para la nueva ortodrómica; que pasa a través de los puntos A'_1, y B se determina el rumbo ortodrómico (rumbo inicial) $R''_I = R_{LOX2} \pm \psi''_0$ en el cual cae el buque, para recorrer de 200 - 300 millas, hasta la próxima posición de estima u observación. En la nueva posición el proceso de cálculo del nuevo rumbo ortodrómico para la ortodrómica A'_2 B se repite ($R'''_I = R_{LOX2} \pm \psi''_0$).

La desventaja fundamental de este método de conducción del buque por la ortodrómica consiste en que éste navega todo el tiempo por la tangente a la ortodrómica en los puntos A'_1, A'_2, A'_3.....A'_n en lugar de hacerlo a través de los puntos A, A_1, A_2, A_3, ...A_n, que se encuentran en la ortodrómica AB, no realizando la travesía por la distancia más corta.

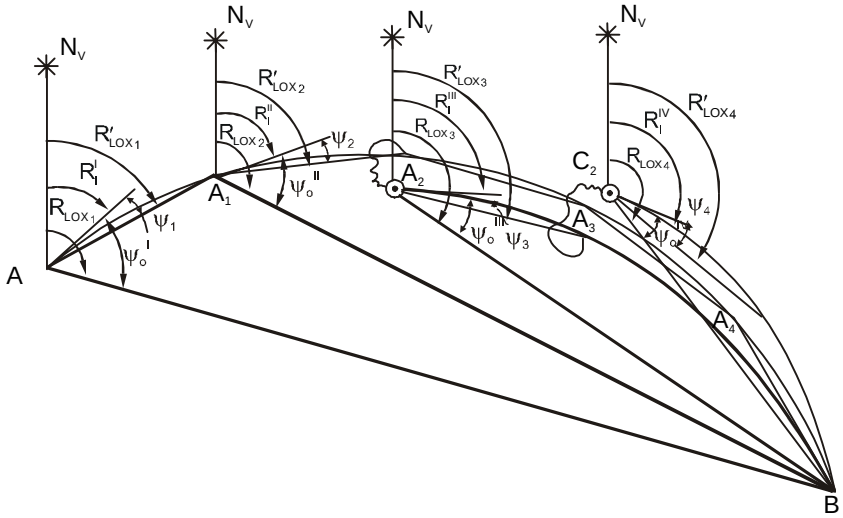


Fig. 350 Navegación por cículo máximo utilizando la corrección ortodrómica (Navegación por cuerda)

La diferencia entre los espacios recorridos por la tangente y la ortodrómica será mayor mientras mayor sea la longitud de estos segmentos de rumbos loxodrómicos.

Para eliminar esta deficiencia A.I. Misernitsi propuso, plotear previamente en cada uno de los puntos A_1, A_2, A_3 ..... A_n los rumbos ortodrómicos calculados R'_I, R''_I, R'''_I, aplicar a cada uno de ellos la corrección ortodrómica ψ_1, ψ_2, ψ_3.....ψ_n hallando los rumbos loxodrómicos entre los puntos A, A_1 .... A_2 ... B (Fig. 350). Para esto se efectúa el mismo procedimiento expuesto anteriormente, para el punto de salida A se obtiene el rumbo ortodrómico $R'_I = R_{LOX1} \pm \psi'_0$ y después se le aplica la corrección ortodrómica ψ_1 tomado de la tabla23 de las (TUN) por los argumentos φ_A, φ_{A1}, $\varphi_m = (\varphi_A + \varphi_{A1}) / 2$ y $\Delta\lambda = \lambda_{A1} - \lambda_A$, obteniéndose el rumbo loxodrómico R'_{LOX1} del punto de salida A al punto A_1, trazado para el primer cambio de rumbo durante la navegación por la ortodrómica AB. Ante esto φ_A, λ_A son las coordenadas del punto A; φ_{A1}, λ_{A1} las coordenadas del punto A_1.

Llegando por estima al punto $A_1(\varphi_{A1}, \lambda_{A1})$, el buque cae al nuevo rumbo loxodrómico en el punto A_2, el cual se calcula de forma análoga al anterior, es decir:

– se une el punto A_1, con el punto de llegada B, se plotea y se toma de la carta el rumbo loxodrómico R_{LOX2},

– por los argumentos φ_{A1}, φ_B, $\varphi_m = (\varphi_{A1} + \varphi_B) / 2$ y $\Delta\lambda = \lambda_B - \lambda_{A1}$ se selecciona la corrección ortodrómica ψ''_0 (tabla 23 a).

– se calcula el rumbo ortodrómico R''_I para el punto A_1

$$R''_I = R_{LOX2} \pm \psi''_0$$

– por los argumentos φ_{A1}, φ_{A2}, $\varphi_m = (\varphi_{A1} + \varphi_{A2}) / 2$ y $\Delta\lambda = \lambda_{A2} - \lambda_{A1}$ se halla la corrección ortodrómica ψ_2 (φ_{A2}, λ_{A2} – coordenadas del punto A_2).

– posteriormente se calcula el rumbo loxodrómico $R'_{LOX2} = R''_I \pm \psi_2$ desde el punto A_1 al punto A_2.

Si no se realizaron observaciones, cálculos análogos a los anteriores deben efectuarse en los puntos A trazados previamente.

En realidad siempre se realizan las observaciones, sin embargo no se introducen variaciones de principio en el orden de los cálculos descritos. La diferencia solamente estará en que, en lugar del cálculo de los rumbos loxodrómicos para cada posición de estima A_i es necesario calcular los rumbos loxodrómicos observados C_i, C_2 ..... C_n tomando los rumbos loxodrómicos R_{LOXi} de cada uno de ellos hasta el punto de llegada B. Por consiguiente, en el caso de obtención de la posición por observaciones, para ello se calcula los rumbos cada vez respecto a la nueva ortodrómica que pasa por la posición observada del buque y del punto de llegada B.

De esta forma, en la navegación por ortodrómica las acciones del navegante del buque se reducen fundamentalmente al cálculo de los rumbos loxodrómicos iniciales R_{LOXi} para la posición de estima observada del buque.

12.5 Derrota ortodrómica por rumbo inicial

Cualquier método de cálculo de los elementos de un triángulo esférico astronómico puede ser utilizado en la solución de los problemas de navegación por círculo máximo. El punto de salida se sustituye por la posición del observador, el punto de llegada se sustituye por la posición geográfica del astro, la diferencia de longitud por el ángulo horario local y la distancia por círculo máximo se sustituye por la distancia zenital (90° – altura verdadera). El triángulo de navegación se obtiene proyectando los vértices del triángulo astronómico sobre la superficie terrestre (triángulo AP_NB – Fig. 351).

La determinación del rumbo inicial y la distancia por círculo máximo se obtienen resolviendo el triángulo de navegación AP_NB (Fig. 351), pudiéndose incluir también el cálculo de la latitud, longitud y en ocasiones las distancias a los vértices; así como la latitud y longitud de varios puntos (x) en el círculo máximo.

El cálculo del vértice y de cualquier punto usualmente forma parte de la solución de un triángulo esférico rectángulo.

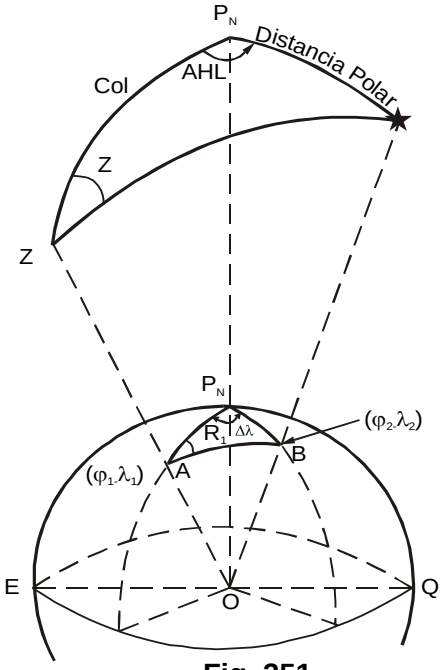


Fig. 351.

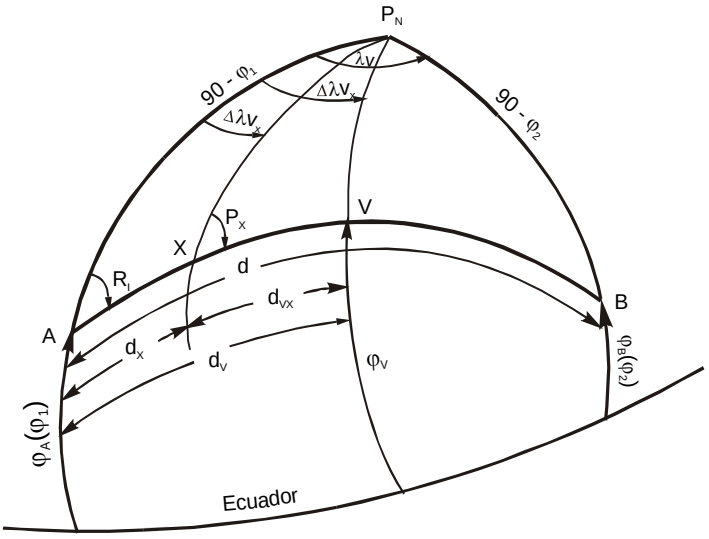


Fig. 352.

Aunque varias fórmulas pueden ser empleadas en la solución del triángulo esférico la fórmula del seno cudrado de la mitad del ángulo, conocida como haversine, que está definido por $sen^2 x / 2 = 1/2(1-cosx)$ son consideradas las más apropiadas para la obtensión del rumbo inicial para así evitar la ambigüedad que puede resultar el uso de las funciones trigonométricas, las cuales, no indican el cuadrante en la cual se encuentra la respuesta. En las fómulas dadas a continuación, los subídices se refieren a los puntos indicados en la figura mensionada anteriormente.

Las expresiones que a continuación se relacionan son las más apropiadas para la solución analítica de la navegación por cículo máximo.

$$\cos\varphi_v = sen\varphi_i \cos\varphi_1; \qquad (420)$$

$$\cos R_i = sen\Delta\lambda_v \cos\varphi_v; \qquad (421)$$ (Ver fig. 352 (Triángulo APNV)

$$sen d_v = \cos\varphi_1 sen\Delta\lambda_v. \qquad (422)$$

$$\tan\varphi_x = \cos\Delta\lambda_{vx} \tan\varphi_v. \qquad (423)$$

$$\cos R_{ix} = sen\varphi_v sen\Delta\lambda_{vx}; \qquad (424)$$ (Ver fig. 352 Triángulo PNXV)

$$\cos R_x = \csc\varphi_v \csc\Delta\lambda_{vx}; \qquad (425)$$

$$sen\Delta\lambda_{vx} = \tan\varphi_x \cot\varphi_v. \qquad (426)$$

$$\cos d = sen\varphi_1 sen\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\Delta\lambda, \qquad (427)$$

$$\tan R = \frac{sen\Delta\lambda}{\cos\varphi_1 \tan\varphi_2 - sen\varphi_1 \cos\Delta\lambda}. \qquad (428)$$

$$sen^2 \frac{R}{2} = \frac{sen^2 \frac{col\varphi_2}{2} - sen^2 \frac{(d \sim col\varphi_1)}{2}}{\cos\varphi_1 sen d} \qquad (429)$$

Ejemplo. Un buque parte de Cape Tawn con destino a la ciudad de New York. El capitán decide realizar la travesía por círculo máximo desde φ_1= 33°53,3'S, λ_1=018°23,1'E (cerca del Faro Cabo Verde) próximo al Faro Ambrosio, hasta φ_2= 40°27,1N', λ_2=073°49,4'W. .
Se requiere:

1) Rumbo inicial del círculo máximo
2) Distancia por círculo máximo
3) Las coordenadas ambos vértices.
4) Distancia desde el punto de salida hasta el vértice.
5) Longitud del punto de corte con el ecuador. 70° W.

Solución. Por las fórmulas 427 y 428.

- Calcule la diferencia de longitud $\Delta\lambda$ y la diferencia de latitud $\Delta\varphi$.

$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = -73°49,4' - (+18°23,1')$

$\Delta\lambda = 92°12,5'W$

$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 40°27,1' - (-33°53,3')$

$= 40°27,1' + 33°53,3')$

$\Delta\varphi = 74°20,0'N$

Argumentos

$\varphi_1 = -33°53,3'$

$\varphi_2 = +40°27,1'$

$\Delta\lambda = -92°12,5'$

1) Cálculo de la distancia ortodrómica por la fómula

$$\cos d = \operatorname{sen}\varphi_1 \operatorname{sen}\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos\Delta\lambda$$

Sustituyendo valores

$$\cos d = \operatorname{sen}(-33°53,3')\operatorname{sen}40°27,1' + \cos 33°53,3' \cos 40°27,1' \cos 92°12,5'$$

$$d = 112°42'22''$$

$$= 6720' + 42,36'$$

$$d = 6762'4 \text{ millas}$$

***Antes de sustituir los valores de los ángulos en las fórmulas, es conveniente llevar los minutos y décimas de minutos a grados*.**

2) Cálculo del rumbo inicial (R_i).

Sustituyendo los valores en la fórmula:

$$\tan R = \frac{\operatorname{sen}(-92°12,5')}{(\cos 33°53,3' \tan 40°27,1') - [\operatorname{sen}(-33°53,3')\cos(-92°12,5')]}$$

$$\tan R = -1,455880$$

$$R = \arctan(-1,455880)$$

Como la tangente es negativa

$180° - 55,5° = 124,5°$

$R = S124,5°W$ (ángulo de rumbo inicial)

$R_i = 180° + 124,5°$

$R_i = 304,5°$

Si utilizamos la fórmula del seno cuadrdado de la mitad del ángulo, estas operaciones no son necesarias efectuarlas, por cuanto el valor de 124,5° da directo como veremos posteriormente.

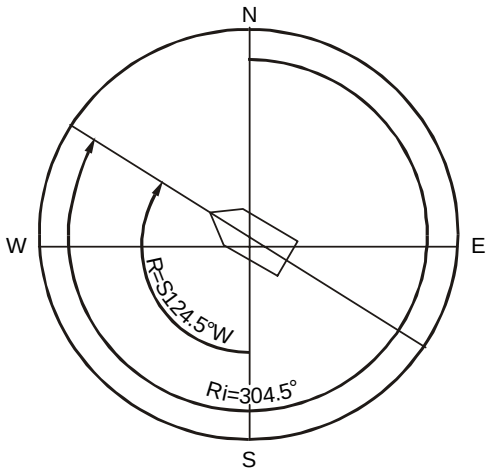


Fig. 353

Este rumbo es tangente al arco de círculo máximo que pasa por el punto de salida y llegada. Si se de sea navegar por la cuerda se procede como sigue: .

a) Se determina la corrección ortodrómica ψ_1; para lo cual sobre el rumbo inicial calculado (tangente al círculo máximo) se traza una distancia igual a 300 millas en una carta Mercator (Fig. 357) y se toma las coordenadas de este punto (φ'_1= 39°50,0'S, λ'_1=13°25,0'E) y se calculan los argumentos:

$\Delta\lambda = \lambda'_1 - \lambda_1$ y $\varphi_m = 1/2(\varphi'_1 - \varphi_1)$

φ'_1=39°50,0'S, λ'_1=13°25,0'E

φ_1=33°53,3'S, λ_1=18°22,1'E

$\Delta\lambda$ = 13°25,0'–(+18°23,1')

$\Delta\lambda$ = +4°58,0'

b) Calculemos la corrección ortodrómica por la fórmula $\psi_1 = 1/2(\lambda'_1 - \lambda_1)\text{sen}\varphi_1$ (por ser la $\Delta\lambda \leq 30°$)

ψ_1=1/2(4,966°) sen33'88°

=1/2x4,966°x 0'557576

ψ_1=1,38°

$R_{LOX} = R_1 + \psi_1$

=304,5°+1,4°

R_{LOX}=306°

A continuación expondremos las acciones a realizar durante la determinación del rumbo inicial y distancia empleando la calculadora científica (con el ejemplo anterior).

Cálculo de la distancia por ortodrómica d=cos-¹[sen(-33°53'18") sen40°27'06"+ cos33°53'18"cos40°27'06"cos 92°12'30"		
Datos a Introducir	OPERACION	Presentacion en Pantalla
sen(-33°53'18")	MODE MODE 1 sen ((-) 33 °''' 53 °''' 18 °''' = X	-0,557576088
sen 40°27'06"	sen 40 °''' 27 °''' 06 = STO M+	-0,361758911
cos 33°53'18"	cos 33 °''' 53 °''' 18 °''' = X	0,830125836
cos 40°27'06"	cos 40 °''' 27 °''' 06 °''' = X	0,631687205
cos 92°12'30"	cos 92 °''' 12 °''' 30 °''' = M+	-0,024340895
	RCL M+ = SHIFT cos⁻¹	-0,386099806
	=	+112 ,71203406°
	°'''	+112° 42'43,3"S
	112 x 60+42,7	6762,7 millas

Fig. 354

Cálculo del Rumbo Inicial

$$R = \tan^{-1}\frac{\text{sen}(-92°12{,}5')}{(\cos 33°53{,}3' \tan 40°27{,}1') - [\text{sen}(-33°53{,}3') \cos 92°12{,}5']}$$

cos 33°53'18"	cos 3 3 . 5 3 ▢ 1 8 ▢ = X	0,830125836
tan(-40°27'06")	tan ▢ - 4 0 ▢ 2 7 ▢ 0 6 °''' = STO	-0,707784223
	M+	
sen 33°53'18"	sen 3 3 °''' 5 3 °''' 1 8 °''' = X	0,557576088
cos 92°12'30"	cos 9 2 °''' 1 2 °''' 3 0 °''' = SHIFT M+	-0,02148516
sen 92°12'30"	sen 9 2 °''' 1 2 °''' °''' 3 0 °''' = ÷ RLC M+	0,999257322
	=	-1,456008577
R	SHIFT tan = + 1 8 0	-55,51836454
R	=	124,4816355
R		S124,5 W
RI	124,5+180	304,5°

Fig. 355

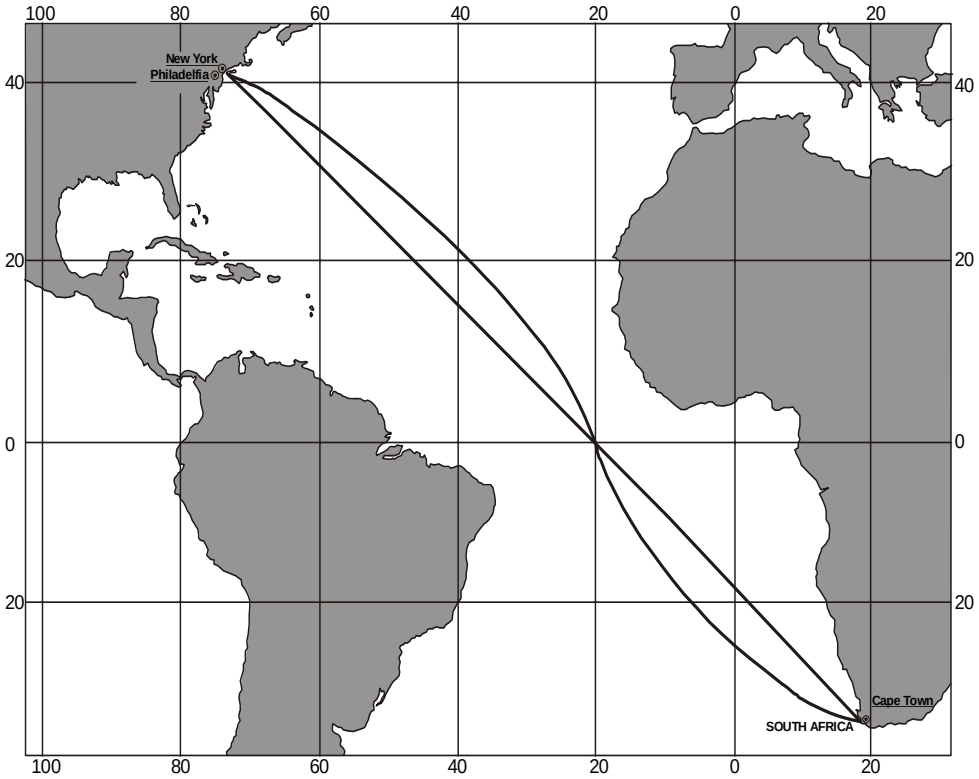


Fig. 356 Derrota por circulo máximo entre Cabo de Buena Esperanza y Nueva York

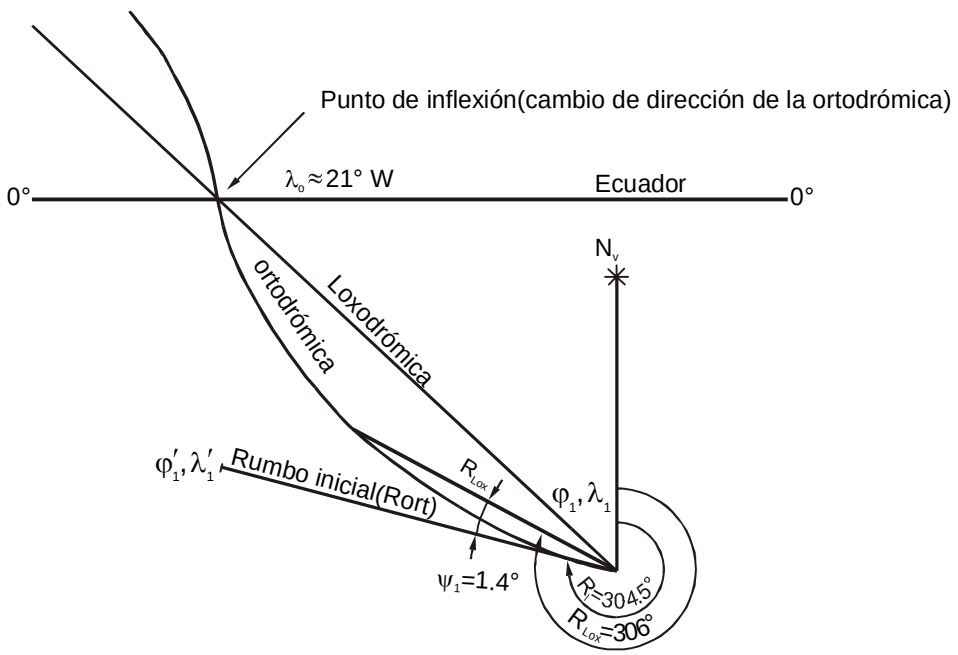


Fig. 357 Cálculo de la corrección ortodrómica para navegar por la cuerda de circulo máximo

Nota: En el gráfico el ángulo de la corrección ortodrómica (ψ_1) está algo exagerado.

Cálculo del rumbo inicial por la fórmula (429).

$$\operatorname{sen}^2\frac{R}{2} = \frac{\operatorname{sen}^2\frac{\operatorname{col}\varphi_2}{2} - \operatorname{sen}^2\frac{(d \sim \operatorname{col}\varphi_1)}{2}}{\cos\varphi_1 \operatorname{sen} d}$$

Solución. 1) Determine $\operatorname{col}\varphi_2$ (Colatitud del punto de llegada) y ($d \sim \operatorname{col}\varphi_1$).

- $\operatorname{col}\varphi_1$ – colatitud de punto de salida

1) $\operatorname{col}\varphi_2 = 90° - \varphi_2$ si φ_1 y φ_2 son del mismo signo y $(90° + \varphi_2)$ si son de signos contrarios.
2) ($d \sim \operatorname{col}\varphi_1$), es siempre la diferencia entre d y $\operatorname{col}\varphi_1$

φ_1 =33°53,3'S
φ_2 = 40°27,1'N
$\operatorname{col}\varphi_2 = 90 + \varphi_2 = 40°27,1' + 90° = 130°27,1'$
$\operatorname{col}\varphi_2 = 130°27,1'$
$\operatorname{col}\varphi_1 = 90 - \varphi_2 = 89°60' - 33°53,3' = 56°06,7'$
$\operatorname{col}\varphi_1 = 56°06,7'$
$d \sim \operatorname{col}\varphi_1 = 112°42,4' - 56°06,6' = 56°35,7'$
$d \sim \operatorname{col}\varphi_1 = 56°35,7'$

Sustituyendo valores:

Argumentos

φ_1 =33°53,3'S
d =112°42,4'
d ~ colφ_1=56°35,7'
colφ_2= 130°27,1'

$$\text{sen}^2\frac{R}{2} = \frac{\text{sen}^2\frac{130{,}452°}{2} - \text{sen}^2\frac{56{,}595°}{2}}{\cos 33{,}888° \text{sen} 112{,}706°}$$

$$= \frac{0{,}824405 - 0{,}224723}{0{,}830129 \text{x} 0{,}922497} = 0{,}7783087$$

$$\text{sen}\frac{R}{2} = \sqrt{0{,}7783087}$$

$$\frac{R}{2} = \text{sen}^{-1} 0{,}884922$$

$$\frac{R}{2} = 62{,}242°$$

$$R = 124{,}484°$$

$$R = S124{,}5°$$

$$R_I = 304{,}5°$$

Observe que el ángulo de rumbo dio directamente sin tener en cuenta el signo de la función trigonométrica. En el caso anterior la tangente era negativo, por eso se tuvo que restar el valor obtenido de 180°.

CALCULO DEL RUMBO INICIAL

$$\text{sen}^2\frac{R}{2} = \frac{\text{sen}^2\left(\frac{130°27'06''}{2}\right) - \text{sen}^2\left(\frac{56°35'30''}{2}\right)}{\cos 33°53'18'' \text{sen} 112°42'43{,}3''}$$

$\text{sen}^2\left(\frac{130°37'06''}{2}\right)$	(1 3 0 °''' 2 7 °''' 0 6 ÷) = 2	0,907966507
	X = STO M+	0,824403178
$\text{sen}^2\left(\frac{56°35'30''}{2}\right)$	sen (5 6 °''' 3 5 °''' 3 0 ÷ 2) =	0,474024177
	X = SHIFT M+	0,224698921
cos 33°53'18''	cos 3 3 °''' 5 3 °''' 1 8 °''' = X	0,830125836
sen 112°42'43,3''	sen 1 1 2 °''' 1 2 °''' 4 3 ' 3 °''' = ÷ RLC M+	0,765755437
$\text{sen}^2\frac{R}{2}$	= sen X = 2	0,784597296
$\text{sen}\frac{R}{2}$	=	0,884959756
$\frac{R}{2}$	SHIFT sen = X 2	62,246556929
R	=	124,4931386
R	+ 1 8 0	S124°,5W
RI	=	304,55°

Fig. 358.

3. Cálculo de la latitud y longitud de ambos vértices

a) Cálculo de la latitud

$$\cos\varphi_v = \cos\varphi_1 \operatorname{sen} R$$
$$= \cos 33°53'18'' \operatorname{sen} 124°28'53{,}8''$$
$$= 0{,}0830125836 x 0{,}824307932 = 0{,}684279312$$
$$\varphi_v = \arccos 0{,}684279312 = 46°49'15{,}76''$$
$$\varphi_v = 46°49{,}3'$$

b) Cálculo de la longitud

$$\operatorname{sen}\Delta\lambda_v = \frac{\cos R}{\operatorname{sen}\varphi_v}$$
$$= \frac{\cos 124°28'53{,}8''}{\operatorname{sen} 46°49'16''}$$
$$= \frac{-0{,}566141707}{0{,}72922744} = -0{,}776358206$$
$$\Delta\lambda_v = \operatorname{arcsen}(-0{,}776358206)$$
$$\Delta\lambda_v = 50°55{,}7'$$
$$\lambda_v = \lambda_1 + \Delta\lambda_v$$
$$= 18°23{,}1' + (+50°55{,}7')$$
$$\lambda_v = 69°18{,}8'$$
$$\varphi_{v1} = 46°49{,}3'S \quad \lambda_{v1} = 069°18{,}8'E$$
$$\varphi_{v2} = 46°49{,}3'N \quad \lambda_{v2} = 110°41{,}2'E \quad (180° - \lambda_{v1} = 180° - 069°18{,}8' = 110°41{,}2').$$

4. Cálculo de la distancia desde el punto de salida hasta cada vértice

Utilice la ecuación (421).

$$\operatorname{sen} d_{v1} = \cos\varphi_1 \operatorname{sen}\Delta\lambda_v$$
$$\operatorname{sen} d_{v1} = \cos 33°53'18'' \operatorname{sen} 50°55'42''$$
$$= 0{,}830125836 x 0{,}776358187$$
$$= 0{,}64447499$$
$$d_{v1} = \operatorname{arc\,sen} 0{,}64447499$$
$$= 40°07'34{,}76''$$
$$= 40° x 60 + 9' = 2400' + 7{,}6'$$
$$= 2407{,}6 \text{ millas}$$

Para el segundo vértice:

$$\begin{aligned}
\text{sen}d_{v2} &= \cos 33°53'18''\text{sen}(180° + 50°55'42'') \\
&= \cos 33°53'18''\text{sen}(230°55'42'') \\
&= 0{,}830125836(-0{,}776358187) \\
&= -0{,}64447499 \\
d_{v2} &= \text{arcsen}(-0{,}64447499) \\
&= 180° - 40°07{,}6' \\
&= 139°52{,}4' \\
&= 139x60 + 52{,}4' = 8392{,}2' \\
d_{v2} &= 8392{,}2\text{millas}
\end{aligned}$$

5. Determinar la longitud del punto de corte con el ecuador λ_0.

Para esto utilicemos la fórmula (395):

$$\tan\left(\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2} - \lambda_0\right) = \tan\left(\frac{\lambda_2-\lambda_1}{2}\right)\frac{\text{sen}(\varphi_2+\varphi_1)}{\text{sen}(\varphi_2-\varphi_1)}$$

Argumentos

$$\frac{\lambda_2-\lambda_1}{2} = \frac{-92°12'30''}{2} = -46°06'15''$$

$$\varphi_2+\varphi_1 = 40°27{,}1' + (-33°53{,}3') = +6°33{,}7' = +6°33'42''$$

$$\varphi_2-\varphi_1 = 40°27{,}1' - (-33°53{,}3') = +74°24{,}4' = +74°24'24''$$

$$\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2} = \frac{-73°49{,}4' + (+18°23{,}1')}{2} = -27°43{,}2' = -27°43'12''$$

$$\tan\left(\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2} - \lambda_0\right) = \tan\left(\frac{-92°12'30''}{2}\right)\frac{\text{sen}6°33'42''}{\text{sen}74°24'24''}$$

$$= (-1{,}039305014)\frac{0{,}114272515}{0{,}96319385} = -0{,}12330228$$

$$\begin{aligned}
\frac{\lambda_2+\lambda_1}{2} - \lambda_0 &= \arctan(-0{,}12330228) \\
\lambda_0 &= -27°43{,}2' + 7°1{,}8' \\
&= -20°41{,}4' \\
\lambda_0 &= 20°41{,}4'\ W.
\end{aligned}$$

12.6 Cálculo del rumbo loxodrómico (R_{Lox}) y distancia (S_{Lox}) entre los puntos de salida y de llegada.

Al inicio de este capítulo se expresó que la menor distancia entre dos puntos en la superficie terrestre era el menor arco de círculo máximo que los une (navegación ortodrómica) desde el punto de vista

cuantitativo, sin embargo para justificar su empleo es conveniente realizar un análisis comparativo con la navegación siguiendo la línea de rumbo (navegación loxodrómica) cuya ventaja fundamental, es que ésta corta a los meridianos bajo un mismo ángulo (Rv = constante) y se puede representar en la carta de proyección Mercator como una línea recta. Para esto sólo es necesario calcular el espacio loxodrómico y compararlo con el ortodrómico y finalmente determinar si la ganancia en millas de distancia merita utilizar la navegación siguiendo el círculo máximo (navegación ortodrómica) o la línea de rumbo (navegación loxodrómica).

Para el cálculo del espacio y rumbo loxodrómico emplearemos las fórmulas de la estima analítica (para más detalle ver capitulo XI):

$$\tan R_{LOX} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta PM} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{PM_2 - PM_1}$$

$$S_{LOX} = \Delta\varphi \sec R_{LOX} = (\varphi_2 - \varphi_1)\sec R_{LOX}$$

Para rumbos loxodrómicos próximos a 90°, es conveniente utilizar las fórmulas:

$$\cot R_{LOX} = \frac{\Delta PM}{\Delta\lambda} = \frac{PM_2 - PM_1}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

$$S_{LOX} = \frac{\rho}{\operatorname{sen} R_{LOX}} = (\lambda_2 - \lambda_1)\cos\varphi_m \operatorname{csc} R_{LOX}$$

Disponiendo, de esta forma de las fórmulas necesarias, se puede calcular la diferencia de distancia entre la ortodrómica y la loxodrómica $\Delta S = S_{LOX} - S_{ORT}$ entre los puntos de salida y llegada.

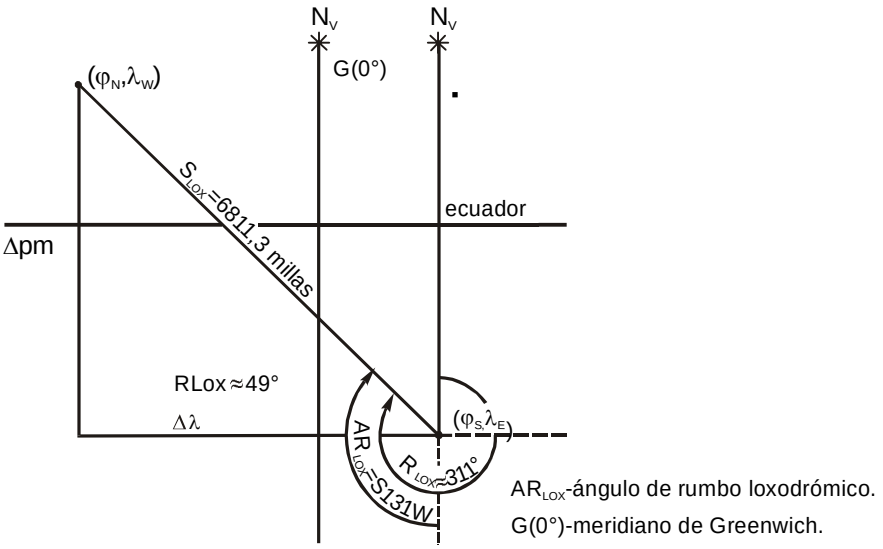


Fig. 359.Representación del rumbo loxodrómico en la carta de proyección Mercator

Ejemplo. Calcular el rumbo loxodrómico y la diferencia de distancia (ΔS) entre el espacio loxodrómico (S_{LOX}) y el espacio ortodrómico (S_{ORT}) entre los puntos de salida y llegada si:

φ_1=33°53,3'S, λ_1=018°23,1'E

φ_2=40°27,1'N, λ_2=073°9,4'W

Solución. 1) Cálculo del rumbo loxodrómico por la fórmula:

$$\tan R_{LOX} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta PM}$$

Para mayor comprensión y control de los cálculos está representada esquemáticamente la loxodrómica en la carta Mercator.

$$\text{Para } \varphi_2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots PM_2 = 2643{,}2$$

$$\text{Para } \varphi_1 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots PM_1 = 2150{,}2$$

$$\Delta PM = 4793{,}8$$

$$\lambda_2 = 073°49{,}4'W$$

$$\lambda_1 = 018°23{,}1'E$$

$$\Delta\lambda = -\,073°49{,}4' - (+\,18°23{,}1') = -\,92°12{,}5'$$

$$\Delta\lambda = -\,92°12{,}5' = 92°12{,}5' \quad (92x60+12{,}5' = -5532{,}5')$$

$$\tan R_{LOX} = \frac{-5532{,}5}{4793{,}8} = -1{,}154094873$$

$$180° - R_{Lox} = \arctan 1{,}154094873 = 49°05'30''$$

$$180° - R_{Lox} = 49{,}1° \Rightarrow R_{Lox} = 180° - 49{,}1° = S130{,}9°W$$

$$R_{Lox} = 310{,}9°$$

2. Cálculo del espacio loxodrómico

$$S_{LOX} = \Delta\varphi \sec R_{LOX}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = -\,40°27{,}1' - (+\,33°53{,}3') = -\,74°24{,}4'$$

$$= -\,74x60 + 24{,}4 = -\,4440 + 24{,}4$$

$$\Delta\varphi = -\,4460{,}4'$$

$$S_{Lox} = \Delta\varphi \sec R_{Lox} = \frac{\Delta\lambda}{\cos R_{Lox}}$$

$$= \frac{-4460{,}4}{\cos 13054'30''} = 6811{,}32'$$

$$S_{Lox} = 6811{,}32 \text{ millas}$$

Comparando S_{LOX}, con S_{ORT} = 6762,6 millas calculado anteriormente, entre los mismos puntos A y B, encontramos que su diferencia es igual a:

$$\Delta S = S_{Lox} - S_{Ort}$$

$$= 6811{,}3 - 6762{,}7 = 48{,}6$$

$$\Delta S = 48{,}6 \text{ millas}$$

12.7 Cálculo del rumbo inicial y distancia mediante tablas especiales

La solución del triángulo esférico (triángulo ortodrómico), con el fin de determinar sus elementos incógnitos a partir de los conocidos, puede realizarse por medio de tablas especialmente concebidas con este fin. Estas son las mismas tablas que se utilizan en el cálculo de la altura y azimut (para más detalle ver epígrafe IX - 3 Cap. IX. Cuaderno de Astronomía 2002).

Cálculo del rumbo inicial y distancia mediante tablas NP-401

La distancia por círculo máximo entre dos puntos cualquiera en la superficie esférica de la Tierra así como el rumbo inicial pueden ser hallados relacionando el problema a la solución del triángulo de navegación cuya solución siempre está disponible en estas tablas. Entrando en la misma con la latitud como **latitud de salida,** latitud de llegada como **declinación** y diferencia de longitud como **ángulo horario local**, la altura y el azimut pueden ser extraídos y convertidos en distancia y rumbo inicial.

El ángulo azimutal (o su suplemento) se convierte en ángulo de rumbo inicial, rotulado N ó S por la latitud del punto de salida y E u W, en dependencia de la diferencia de longitud, el cual posteriormente se convierte en rumbo inicial.

Si todos los argumentos de entrada son grados enteros, la altura y el ángulo azimutal son obtenidos directamente de la tabla, sin interpolación. Si la latitud de destino no está en grados entero, la interpolación por los minutos adicionales de latitud están dados como en la corrección de latitud para cualquier incremento en declinación; si tanto la latitud de salida como la diferencia de longitud o ambos no están en grados enteros, utilice la interpolación gráfica usando los **diagramas** A, B y C y aplique esta corrección adicionalmente, como corrigiendo la latitud para cualquier posición de estima u otra posición seleccionada.

Como, en la solución de la distancia por círculo máximo, la latitud de llegada se convierte en la declinación de entrada y todas las declinaciones aparecen en cada página, la distancia puede ser siempre hallada en el volumen que cubre la columna de latitud que contiene la latitud de destino. La solución del círculo máximo corresponde a una de las cuatro siguientes categorías. Siempre es conocido si las latitudes de salida y llegada son el mismo o de nombres contrarios. En estos casos cuando no es conocido si la distancia por círculo máximo es menor o mayor de 90° (5400 millas náuticas), aplique el primero el **Caso I** para latitudes del mismo nombre y el **Caso II** para latitudes de nombre contrario.

Hallando la solución por estas reglas, considere los **Casos III y IV** respectivamente.

1er Caso. Las latitudes de salida y llegada son del mismo nombre y la distancia inicial por círculo máximo es menor de 90°

Entre en la tabla con la latitud de salida como latitud, la latitud de llegada como declinación y la diferencia de longitud como ángulo horario local; la altura obtenida réstela de 90°, ésta será la distancia por círculo máximo deseada. El ángulo azimutal es el ángulo de rumbo inicial. Si con tales argumentos no son halladas las incógnitas, entonces la distancia es mayor de 90°.

2do Caso. Las latitudes de salida y llegada son de nombres contrarios y la distancia por círculo máximo es menor de 90°

Entre en la tabla con la latitud de salida como latitud de entrada y la latitud de llegada como declinación de entrada de nombre; contrario y la diferencia de longitud como ángulo horario local; extraiga la altura tabulada, la cual es restada de 90° el resultado dará la distancia requerida. El ángulo azimutal es el ángulo de rumbo inicial. Si con estos argumentos no se hallan las incógnitas, la distancia es mayor de 90°.

3er Caso. Las latitudes de salida y llegada son del mismo nombre y la distancia por círculo máximo es mayor de 90°

Entre en la tabla con la latitud de salida como latitud de entrada, latitud de llegada como declinación de entrada de nombre contrario a la latitud de llegada, y 180° menos la diferencia de longitud como ángulo horario local; extraiga la altura, adicionándole 90°, será la distancia requerida. El ángulo de rumbo inicial es 180° menos el ángulo azimutal.

4to Caso. Las latitudes de salida y llegada son nombres contrarios y la distancia por círculo máximo es mayor de 90°

Entre en la tabla con la latitud de salida como latitud de entrada, latitud de llegada como declinación de nombre contrario a la latitud de salida, y con 180° menos la diferencia de longitud como ángulo horario local; tome la altura obtenida y adiciónele 90°, ésta será la distancia requerida. El ángulo de rumbo inicial es 180° menos el ángulo azimutal.
Los dos siguientes ejemplos de rumbo inicial y distancia, punto con sus soluciones, ilustran el 1er y 4to Caso.
Ejemplo 1). Se requiere la distancia y rumbo inicial desde Fremantle φ_1=32°03'S, λ_1=115°45'E hasta Durban φ_2=29°52'S, λ_2=031°45'E.

Solución. Entre en la tabla con 32° como argumento de latitud, la diferencia de longitud entre 115°45'E y 31°04'E es 84°41'W "$\Delta\lambda = 31°04 - (+115°45')$" , use 85° como el argumento AHL, y 29° como argumento de declinación (del mismo nombre), (Fig. 362.

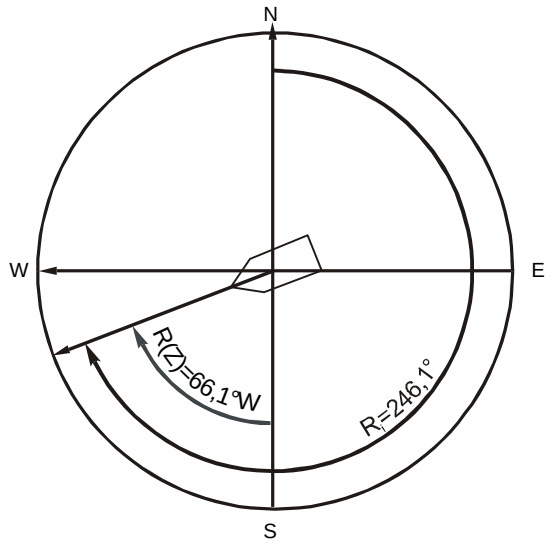


Fig. 360.

		hc(Hc)	d	Z(R)	
De la página 172					
AHL(LHA)=85°,φ(Lat)=32°,δ(Dec)=29°		18°45,4'	(+27,0)	S 66,1°W*	
Inc. dec.(Dec.Inc.) 52', d+27	1^{RA}parte	(+)17,3		180°+ 66,1°=246,1	
	2^{DA}parte	(+) 6,0			→ (Fig. 360)
Interpolado por inc.dec		19°08,8'		A=246,1°	
* Interpolado por declinación				R$_I$=246,1°	

Utilizando los diagramas A, B y C para interpolar por incremento de latitud y águlo horario local (diferencia de longitud), la corrección que se debe aplicar a hc es +15,8', por lo que la altura corregida será Hc=19°24,6', por lo tanto la distancia (90°-hc)=70°35,4'=4235,4 millas náuticas y el rumbo inicial Ri=246,1°(R=S 66,1°W = 66,1°+180°).

Ejemplo 2. Determine la distancia y rumbo inicial desde San Francisco φ_1=37°49'N, λ_1=122°25'W hasta Gladstone φ_2=23°51'S, λ_2=151°15'E.

Solución. Entre en la tabla con latitud 38 como argumento de latitud, la diferencia de longitud entre 122°25'W y 151°15'E es 86°20', use 86° como argumento AHL, y 23° como argumento de declinación

(de nombre contrario). Se puede observar que estos argumentos no están disponibles, por lo que se debe hallar el suplemento 180° - AHL ($\Delta\lambda$) = 93°40' (use 94°) como argumento del AHL, con la declinación cambiada al mismo nombre (Fig. 363).

		Hc (Hc)	d	Z(R)
De la página 357				
AHL(LHA)=94°,φ(Lat.)=38°,δ(Dec.)=23°		18°45,4'	(+35,9)	68,6°*
Inc. dec.(Dec.Inc.)51',d+35,9	1RA parte	(+)25,5		180°-Z=N111,4°W
	2DA parte	(+) 5,1		
Interpolado por inc.dec		11°27,6'		A=248,6°
* Interpolado por declinación				R_I=248,6°

$\longrightarrow$ (Fig. 361)

Utilizando los diagramas A, B y C para interpolar por incremento de latitud y águlo horario local (diferencia de longitud) – en el ejemplo la interpolación es por AHL=93°40' – ; la corrección a hc es +10,7', por lo tanto la altura corregida es hc=11°38,3', y la distancia será igual a 90°+11°38,3'=101°38,3'=6098,3 millas náuticas y el rumbo inicial es Ri=248,6°(360°-111,4°).

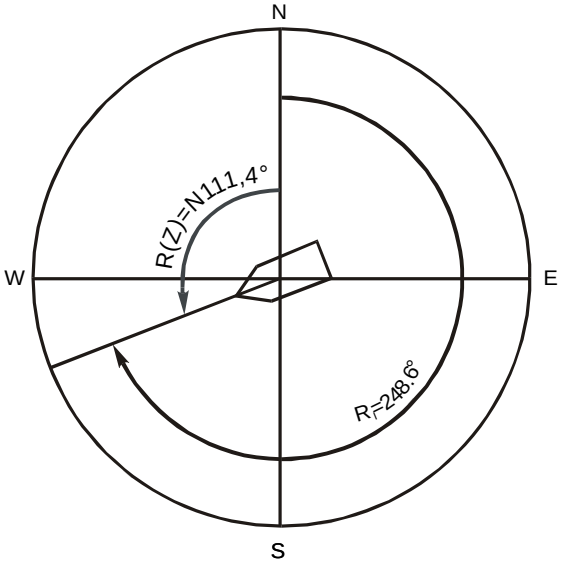


Fig.361

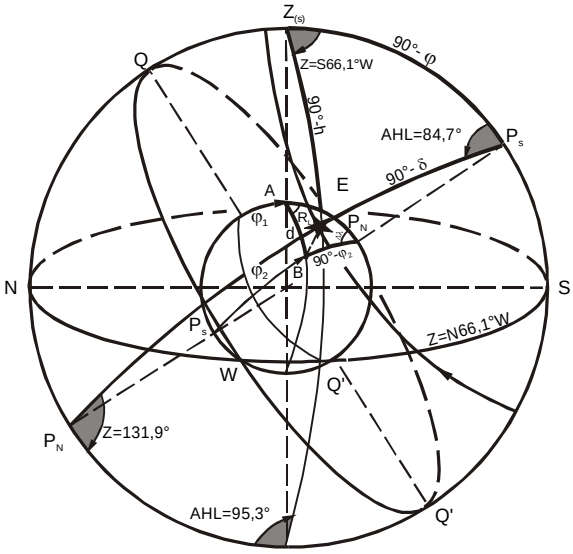


Fig.362

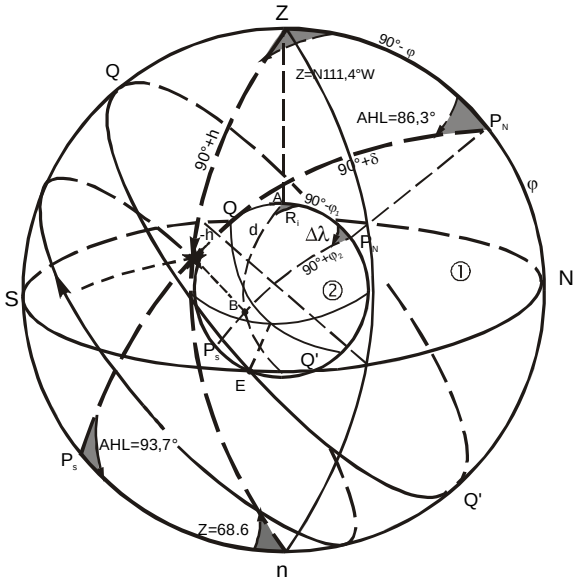


Fig. 363

Cálculo del rumbo inicial y distancia ortodrómica por las tablas condensadas de reducción de la observación (consise sight reduction tables – contenida en el Almanaque Náutico 2001, 2003.....)

Para más detalles sobre el uso de estas tablas vea el epígrafe VIII-4 del Capítulo VIII del Cuaderno de Ejercicio de Astronomía Náutica.

Para mostrar el empleo práctico de dichas tablas utilizaremos los datos del ejemplo anterior.

Ejemplo 2. En la derrota por círculo máximo desde San Francisco 37°49'N, 122°25'W hasta Gladstone 23°51'S, a51°15'E se requiere determinar Ri y Sort.
Solución:

1er Paso: asumiendo la latitud de punto de salida (φ_1) como latitud (φ)

- Latitud del punto de llegada (φ_1) como declinación (δ)
- Diferencia de longitud ($\Delta\varphi$) como ángulo horario local (AHL).

2do Paso: primera entrada en la tabla principal (para calcular A, B, Z).

$(\varphi_1, \Delta\lambda) = 38°,86°$ $A = 51°49'$ $A° = 52°$ $A' = 49$ (-se aproxima al grado entero más cercano y A' es el número de minutos de A).

$B = +\ 5°49'$ $Z_1 = +\ 6{,}5°$ AHL<90° (+)

$\delta = -23°51'$

3er Paso: F = B + δ $F = -\ 18°45'$ $F_0 = 18$ $F' = 45'$

4to Paso: segunda entrada en la tabla principal (para determinar H, P, Z_2).

$(A^0, F^0) = 52°,18°$ $H = 11°34'$ P=36°27' P - se aproxima al grado entero más próximo(P^0=36°).

$Z_2 = 74{,}8°$ $Z^0_2 = 75°$

5to Paso: primera entrada a la tabla auxiliar (para determinar la 1ra corrección de H – $Corr_1$).

$(A'P°) = 45',36°$ $corr_1 = -\ 9$ (la correción es "-" por ser F<90° y F'>29')

$H_1 = 11°25'$

6to Paso: segunda entrada a la tabla auxiliar (para determinar la segunda corrección de H – $Corr_2$)

$(A'P°_2) = 49',75°$ $corr_2 = +\ 3$ (la correción es "+" por ser A'>30')

$H_2 = 11°28'$

Aplicando la corrección por latitud y ángulo horario local ($\Delta\lambda$) utilizando los diagramas A, B y C de la tabla NP – 401 obtenemos que H_2 = 11°28' + 10,7° = 11°38,7'.
Como F tiene signo " – " , H_2 " – " por lo que estamos en presencia del Caso IV.

Por consiguiente el espacio ortodrómica será:

Sort = 90° + 11°38,7' = 101°38,7' = 101x 60 + 38,7

Sort = 6098,7 millas

7mo Paso: Cálculo del rumbo inicial:

Primera componente Z_1= + 6,5° (Z_1 "+" por tener B signo "+")

Segunda componente 180°-- Z_2= +105,2° (F "-")

(Z_2= 74,8°) 111,7°

Angulo de rumbo inicial = N111,7W R_i =248,3°

12.8 Navegación mixta o compuesta

La navegación por el menor arco de círculo máximo siempre es posible. En casos particulares la ortodrómica trazada en la carta, puede pasar una parte de ésta a través de peligros a la navegación – bajos, cayos, islas, etc. (Fig. 364). Pero en tales casos no se debe desaprovechar las ventajas que presenta la navegación ortodrómica, aunque sea en parte de la travesía, si ésta ventaja es sustancial.

Por lo tanto, en el caso como se indica en la Fig. 364, se puede establecer el paralelo límite (por ejemplo φ_{Lim} = 59°N, el cual el buque no debe sobrepasar.

En el caso dado es conveniente navegar desde el punto de salida A hasta el paralelo límite por ortodrómica, después por loxodrómica y finalmente por ortodrómica hasta el punto de llegada B.

Si el navegante dispone de cartas de proyección gnomónica del ploteo y cálculo es sencillo, aunque éstos son aproximados. Si no existe este tipo de carta, los cálculos son necesarios efectuarlos por las fórmulas, cuyas deducciones las realizamos sobre la base de la Fig. 364. Previamente observemos, que las trayectorias más cortas desde el punto de salida A y el de llegada B hasta el paralelo límite serán los arcos de círculos máximos, que tangentean a estos paralelos. Por consiguiente, en el paralelo estarán los vértices v, y v_2 de ambas ortodrómicas incógnitas, o sea $\varphi_{v1} = \varphi_{v2} = \varphi_{Lim}$, siendo $AP_N v_1$ y $BP_N v_2$ triángulos esféricos rectángulos.

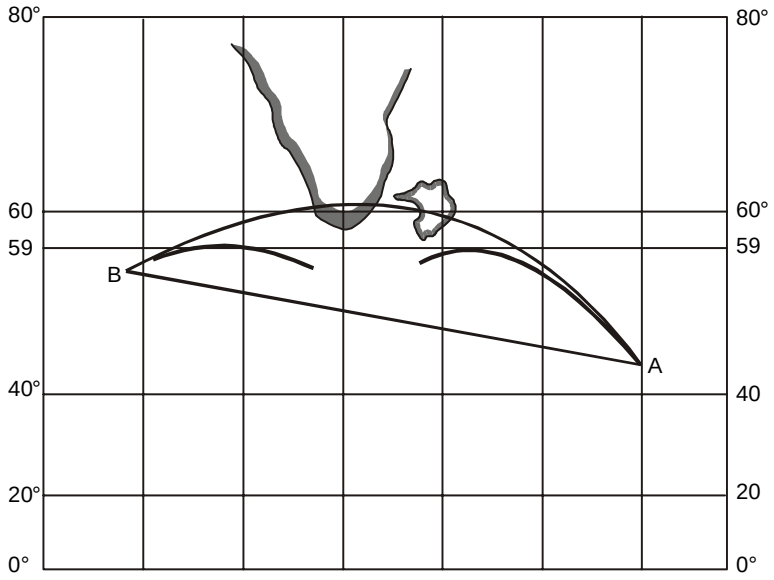


Fig. 364 Derrota mixta

Hallemos las longitudes de los vértices de la ortodrómica.

Aplicando la primera regla de Napier – **el seno de la parte media es igual al producto de tangente de las partes adyacentes-,** en el triángulo $AP_N v_1$ obtenemos que:

$$\text{sen}\overline{\Delta\lambda} = \tan\overline{(90° - \varphi_1)}\tan\overline{(90° - \varphi_{v1})}$$

$$\cos\Delta\lambda = \tan\varphi_1 \text{coo}\varphi_{v1}$$

Como λ_1 es conocida, entonces:

$$\lambda_{v1} = \lambda_1 \pm \Delta\lambda_1$$

De forma análoga del triángulo $BP_N v_2$ obtenemos:

$$\cos\Delta\lambda_2 = \tan\varphi_2 \cot\varphi_{v1}$$

$$\lambda_{v2} = \lambda_2 \pm \Delta\lambda_2$$

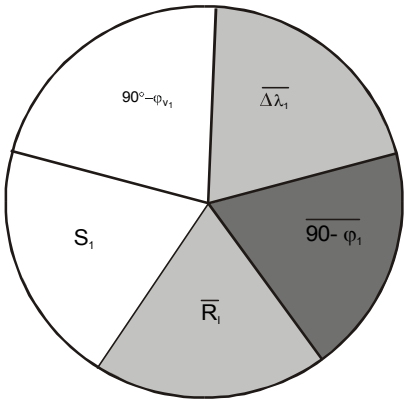


Fig. 365

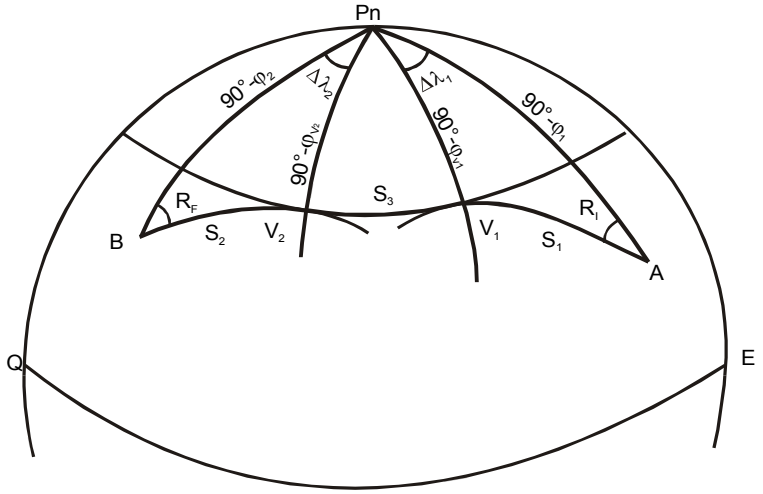


Fig. 366

Conociendo las coordenadas de los puntos de salida, llegada y de los vértices v_1, v_2 de forma habitual se calculan los elementos de la ortodrómica R_1, R_2, pero teniendo en cuenta que el rumbo final de la ortodrómica AV, es igual a 270° (navegación por el paralelo).

Por la primera regla de Napier – **el seno de una parte media es igual al producto de los cosenos de las partes opuestas-**, obtenemos la fórmula para calcular los espacios ortodrómicos:

$$\cos S_1 = \text{sen}\varphi_1 \csc\varphi_{v1}$$

$$\cos S_2 = \text{sen}\varphi_2 \csc\varphi_{v2}$$

$$S_3 = \Delta\lambda_3 \cos\varphi_{Lim}$$

$$\Delta\lambda_3 = (\lambda_2 - \lambda_1) - (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2)$$

La distancia total se halla por la fórmula:

$$S = S_1 + S_2 + S_3$$

En estos casos el cálculo del rumbo inicial se simplifica, ya que viene dado por la fórmula $\text{sen}R_i = \cos\varphi_v \sec\varphi$ (Esta fórmula puede ser deducida del triángulo esférico rectángulo $P_N v$, A aplicando la II regla de Napier).

Ejemplo. En la derrota ortodrómica que va desde Nueva York (φ_1=40°15',λ_1=074°00') a Vigo (φ_1=42°15',λ_1=008°43') no se quiere rebasar el paralelo 45°N. Calcular las coordenadas de los puntos de tangencia, las distancias de cada una de las partes de la derrota.

Solución:

1.Cálculo de la diferencia de longitud

a) $\cos\Delta\lambda_1 = \tan\varphi_1 \cot\varphi_{v1}$

ó

$$\cos\Delta\lambda_1 = \frac{\tan\varphi_1}{\tan\varphi_{v1}}$$

$$\cos\Delta\lambda_1 = \frac{\tan 40{,}716°}{\tan 45°} = \frac{0{,}860641}{1{,}000000} = 0{,}860641$$

$$\Delta\lambda_1 = \arccos 0{,}860641$$

$$\lambda_1 = 30°36{,}7'E$$

$$\lambda' = \lambda_1 + \Delta\lambda_1$$

$$= -74° + (+30°36{,}7') = -43°23{,}3'$$

$\lambda' = 43°23{,}3'W$ (Primer punto de tangencia)

b) $$\cos\Delta\lambda_2 = \frac{\tan\varphi_2}{\tan\varphi_{v2}}$$

$$\cos\Delta\lambda_2 = \frac{\tan 42{,}3°}{\tan 45°}$$

$$= \frac{0{,}909929}{1{,}000000} = 0{,}909929$$

$$\Delta\lambda_2 = \arccos 0{,}909929 = 24°43{,}4'\,W$$

$$\lambda'' = \lambda_2 + \Delta\lambda_2$$

$$= -8°43' + (-24°43{,}4') = 33°26{,}4'$$

$\lambda'' = 33°26{,}4'\,W$(Segundo punto de tangencia)

Las coordenadas de los puntos de tangencia son:

$\varphi_v = 45°N$, $\lambda_1 = 43°23{,}3'W$

$\varphi_v = 45°N$, $\lambda_2 = 33°26{,}3'W$

2. Cálculo de la distancia

La derrota queda dividida en tres segmentos:

a) Ortodrómica desde Nueva York a A_1

b) Loxodrómica entre A_1 y B_1

c) Ortodrómica desde B_1 a Vago

1. Distancia Nueva York – A_1

$$\cos S_1 = \frac{\operatorname{sen}\varphi_1}{\operatorname{sen}\varphi_{v1}}$$

$$\cos S_1 = \frac{\operatorname{sen} 40{,}716°}{\operatorname{sen} 45°} = \frac{0{,}652318}{0{,}707106} = 0{,}922505$$

$$S_1 = \arccos 0{,}922505$$

$$S_1 = 1362{,}3 \text{millas}$$

2. Distancia A_1 – B_1

$$S_3 = \Delta\lambda_3 \cos\varphi_{Lim}$$
$$\Delta\lambda_3 = (\lambda_3 - \lambda_1) - (\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2)$$
$$= 8°43' - (-74°00') - [+30°36,7' + (-24°43,3')]$$
$$= 9°57'$$
$$\Delta\lambda_3 = 597'$$
$$S_3 = 597\cos 45°$$
$$= 597 x 0,707106$$
$$S_3 = 422,1'$$

3. Distancia B_1 – Vigo (España)

$$\cos S_2 = \frac{\operatorname{sen}\varphi_2}{\operatorname{sen}\varphi_{v2}}$$
$$\cos S_2 = \frac{\operatorname{sen}42,25°}{\operatorname{sen}45°} = \frac{0,62366}{0,707106} = 0,950870$$
$$S_2 = \arccos 0,950870$$
$$S_2 = 1082 \text{ millas}$$

El cálculo del rumbo inicial R_I se simplifica en estos casos ya que viene dado por la fórmula:

$$\operatorname{sen} R_i = \cos\varphi_v \sec\varphi$$

12.9. Navegación por la derrota más ventajosa

Durante la planificación de la derrota en largas travesía (océanos), además de la distancia entre los puntos de salida y llegada es necesario tener en cuenta una serie de factores, entre los cuales podemos citar como ejemplo:

- tiempo de navegación

- distancia de navegación del buque

- autonomía del buque

- posibilidad de aparición de témpanos de hielo

- vientos predominantes, oleaje y visibilidad

- la presencia de corriente

- existencia de peligros y zonas prohibidas a la navegación, etc.

Una de las tareas fundamentales del navegante es la preparación multilateral meticulosa ante una próxima travesía. Sin una preparación y un análisis previo exhaustivo puede ocurrir que la derrota más corta, por ejemplo, la trayectoria por el arco de círculo máximo, aunque por la distancia sea la más larga, sin embargo puede resultar menos cómoda para la navegación por otras circunstancias.

Por eso durante la preparación para la travesía es necesario sobre la base de un análisis detallado de todas las circunstancias, que pueden influir en la navegación; seleccionar tal derrota, durante la cual la situación no sólo obstaculice sino por el contrario, que contribuya a realizar travesía.

Para facilitar la selección de la derrota del buque en las condiciones hidrometeorológicas más favorables en una serie de países se editan cartas especiales (Pilot chart,) y atlas con itinerarios recomendados, donde se dan indicaciones detalladas para seleccionar la derrota en diferentes épocas del año, dirección del movimiento del buque y su tipo.

Durante el estudio de estas ayudas a la navegación para planificar la travesía más ventajosa hasta el último momento se tiene en cuenta fundamentalmente la representación gráfica y la apreciación cualitativa de las particularidades hidrometeorológicas de determinadas zonas específicas en diferentes épocas del año.

12.10 Cálculo de la derrota ortodrómica por la computadora

Además de los métodos tradicionales para calcular la ortodrómica (logaritmos, tablas, calculadoras científicas, etc.), el Capitán de Corbeta Ingeniero Jorge Martín Ferrer, Ms.Procesamiento, Almacenamiento yTransmisión de Señales, ha elaborado un Software que permite calcular todos los elementos necesarios para garantizar la navegación ortodrómica y la mixta en un espacio de tiempo considerablemente menor que el empleado en calcular los mismos elementos que los métodos tradicionales que se utilizan actualmente.

A continuación se muestran los gráficos donde aparecen las ventanas de los cuadros de diálogos donde se introducen los datos iniciales (coordenadas del punto de salida), datos finales (coordenadas anteriormente (derrota de CapeTown – New York), así como la representación gráfica de la travesía en el plano. También se reflejan los resultados de la derrota mixta de New York – Vigo (España).

Ejercicios propuestos:

1. La motonave Taíno parte de Luanda, Angola con destino a Jacksonville (Estados Unidos). El Capitán decide navegar por círculo máximo desde φ_1=30°23', λ_1=081°40'hasta , φ_2=08°48', λ_2=13°14'

Se requiere:

a) Rumbo inicial

b) La distancia por círculo máximo

c) La longitud de ambos vértices

d) Determine la longitud del punto de corte con el ecuador.

Respuesta

a) R_i = 299,6°
b) d = 5918,3 millas
c)φ_{v1}= 30° 46,8' S , λ_{v1}= 088°10,1'
φ_{v2}= 30° 46,8 N , λ_{v2}= 091°49,9'
d) λ_0=001° 50' W

2. Un buque va a navegar desde Valparaíso, Chile, hasta Wellington, Nueva Zelandia. El Capitán desea utilizar la navegación mixta desde φ_1=32° 58,0' S, λ_1= 71° 41,2' W, a la altura del Faro Punta Los Angeles, hasta φ_2= 42° 00,0' S, λ_2= 175° 0' E, cerca de Cabo Palliser, latitud límite máxima 50° S.

Se requiere:

a) La longitud en el cual el paralelo límite es alcanzado

b) La longitud en el cual se debe dejar el paralelo límite

c) Rumbo inicial en el círculo máximo

d) La distancia total

Respuesta:

a) λ_{v1}=128° 42,9 W
b) λ_{v2}= 144° 04,3 W
c) R_i = 230,0°
d) d = 5 024,6 millas.

3) Determinar las latitudes de los puntos de salida, en los cuales el arco de círculo máximo corta los meridianos cada 5°, si las coordenadas del punto (A) φ_1 = 25°50'N λ_1=77°00'W y punto de llegada (B) φ_2= 49°40'N, λ_2= 79°50'W.

Respuesta: (Ver tabla 12.2).

Tabla 12.2

No	λ_i	λ_0	$(\lambda_i - \lambda_0)$	R_0	φ_i
1	76°11'W	-101°11'	25°	40°14,3'	26°32,4'
2	71°11'W	-101°11'	30°	40°14,3'	30°34,7'
3	66°11'W	-101°11'	35°	40°14,3'	34°07,9'
4	61°11'W	-101°11'	40°	40°14,3'	37°13,3'
5	56°11'W	-101°11'	45°	40°14,3'	39°53,0'
6	51°11'W	-101°11'	50°	40°14,3'	42°09,3'
7	46°11'W	-101°11'	55°	40°14,3'	44°04,2'
8	41°11'W	-101°11'	60°	40°14,3'	45°39,8'
9	36°11'W	-101°11'	65°	40°14,3'	46°57,9'
10	31°11'W	-101°11'	70°	40°14,3'	47°49,8'
11	26°11'W	-101°11'	75°	40°14,3'	48°46,8'
12	21°11'W	-101°11'	80°	40°14,3'	49°19,7'
13	16°11'W	-101°11'	85°	40°14,3'	49°39,3'
14	11°11'W	-101°11'	90°	40°14,3'	49°45,8'

Ejemplo 1

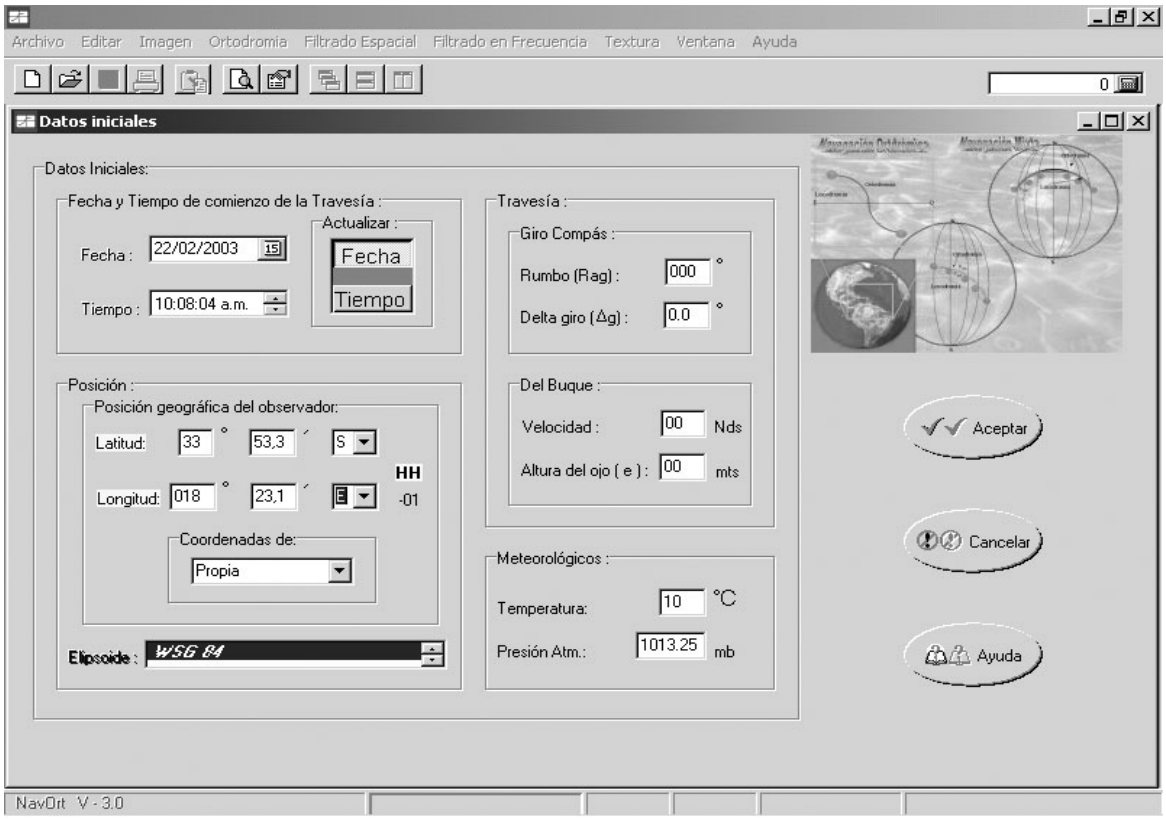


Fig. 367 Datos iniciales

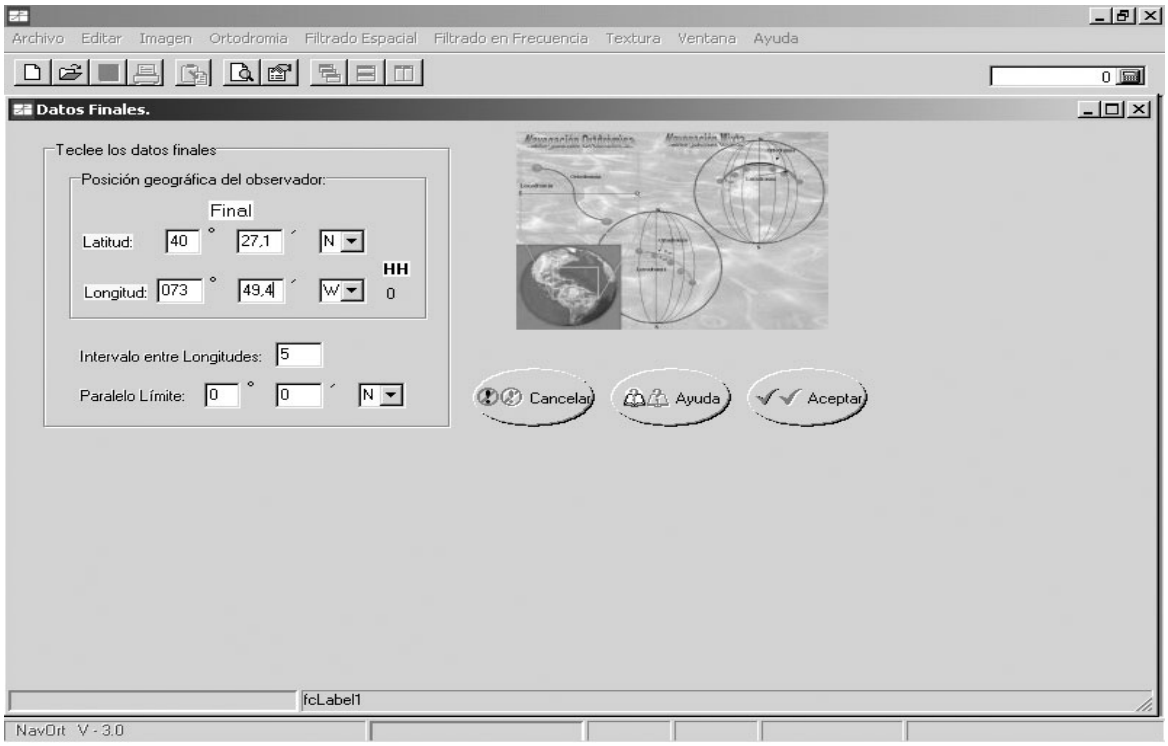


Fig. 368 Datos finales

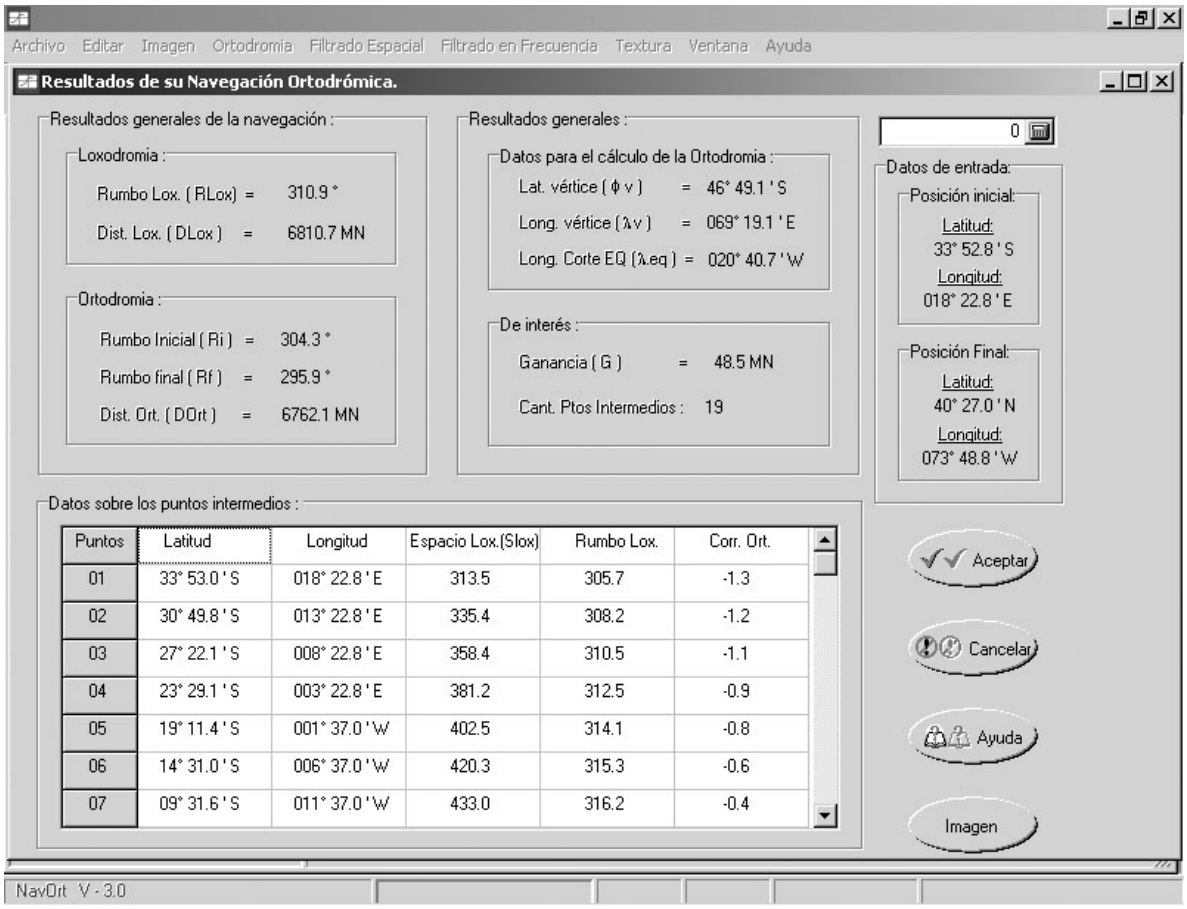


Fig. 369 Respuesta de la Derrota Ortodrómica

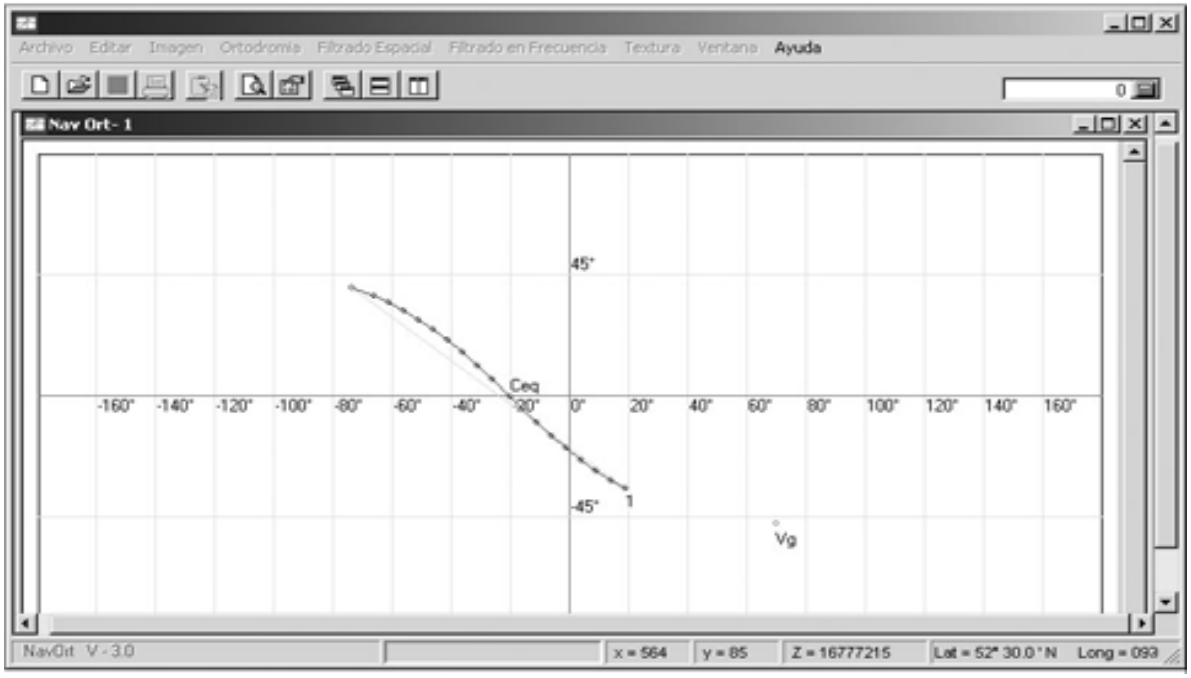


Fig. 370 Imagen del gráfico de la travesía

Ejemplo 2

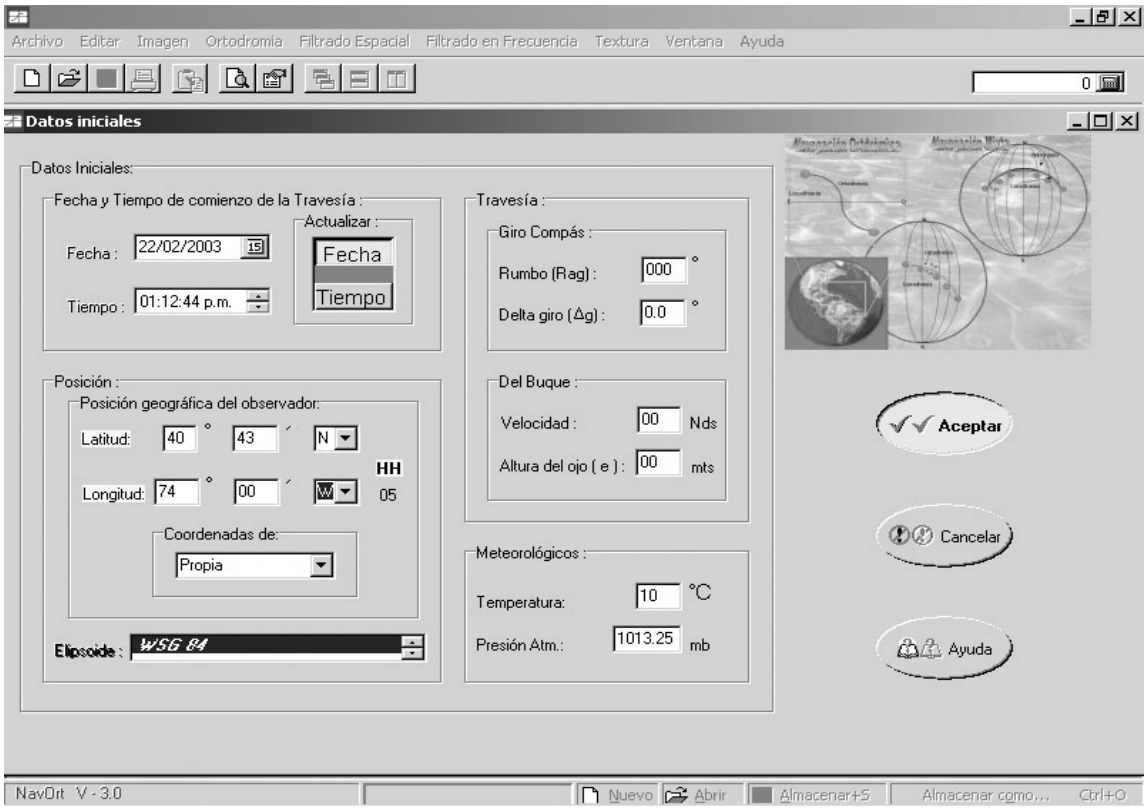


Fig. 371. Datos Iniciales.

Fig. 372. Datos finales.

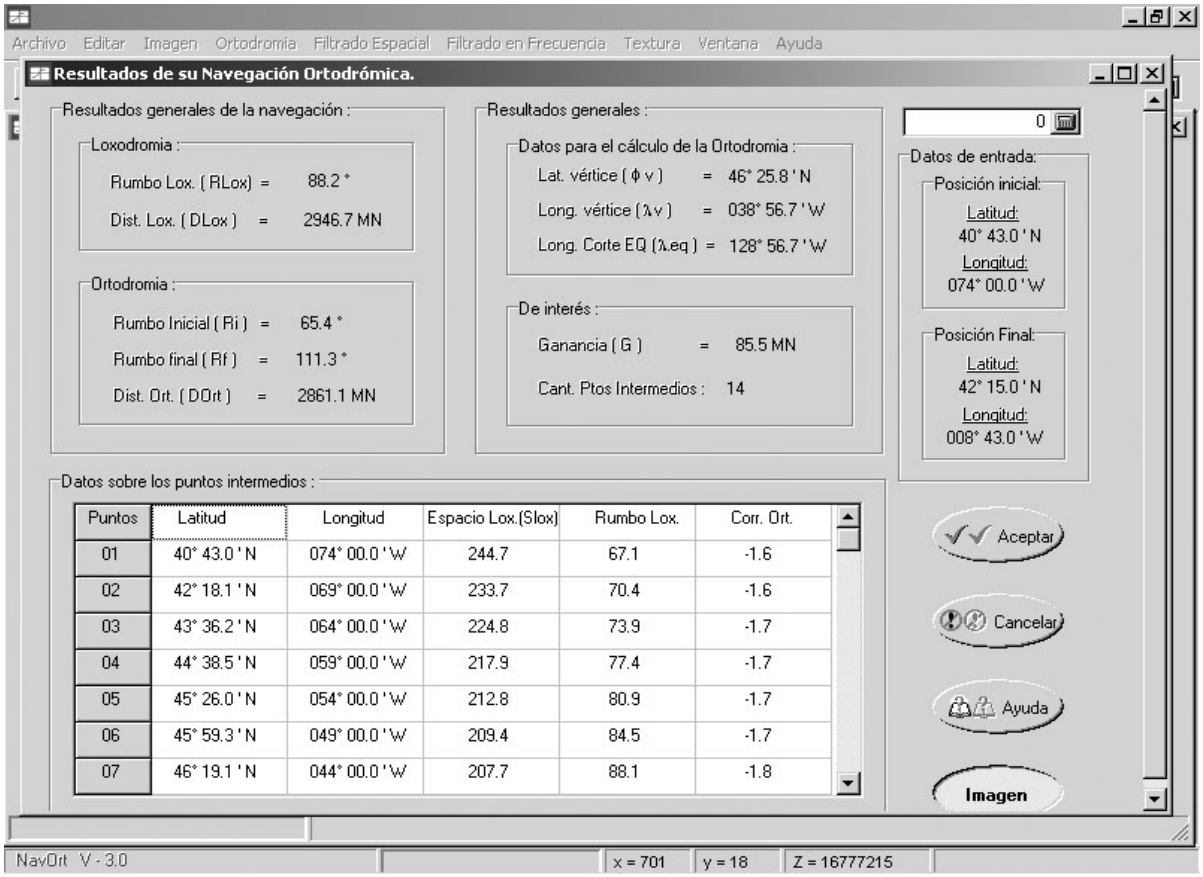


Fig. 373. Respuesta de la Derrota Ortodrómica.

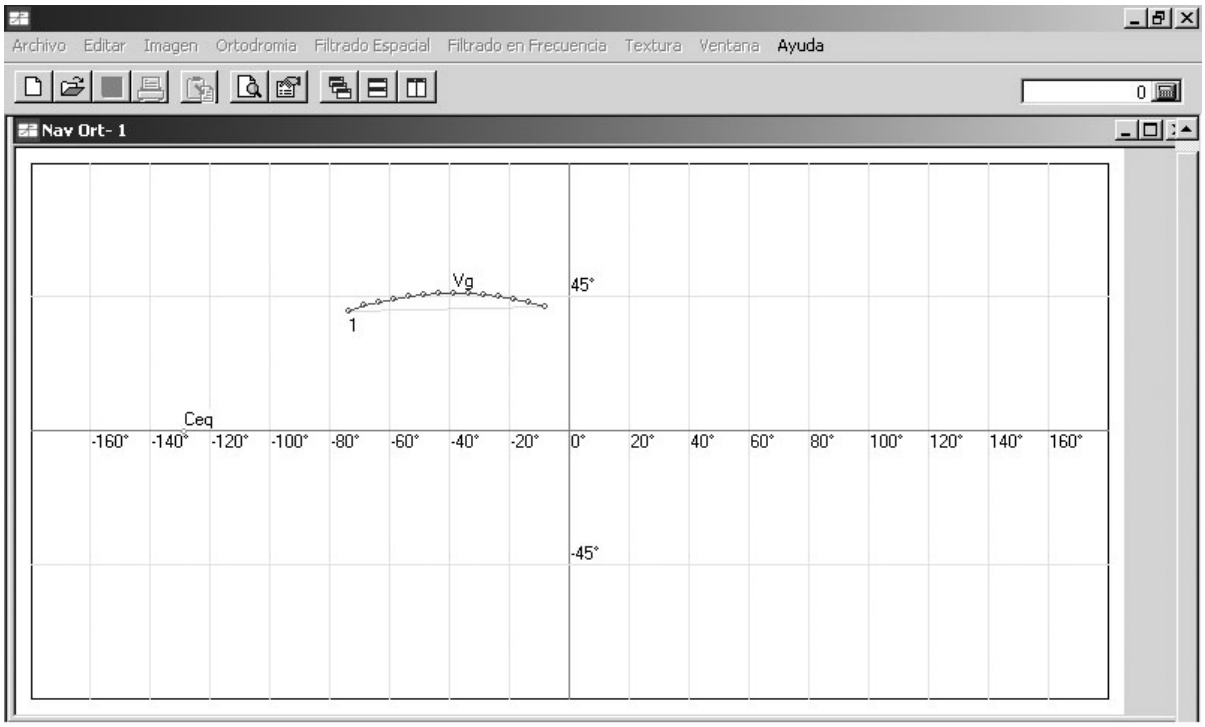


Fig. 374 Imagen del gráfico de la travesía

CAPITULO XIII

NAVEGACIÓN EN CONDICIONES ESPECIALES

Capítulo XIII

NAVEGACIÓN EN CONDICIONES ESPECIALES

13.1 Generalidades

Se denominan condiciones especiales al conjunto de factores exteriores que influyen sobre la derrota del buque.

Estos factores pueden ser:

1.Geográficos

2.Hidrometeorológicos

3.Hidrográficos

4.Tácticos-operativos

1.Factores Geográficos

Los factores geográficos comprenden:

a) La posición de la región de navegación con respecto a las zonas climáticas (glaciar, templada y tórrida), lo cual determina las características climatológicas de la zona por la que se navegará, la duración de los crepúsculos, del día y la noche, y, por tanto, las posibilidades de la utilización de los astros para los fines de la navegación.

b) Las características geográficas de la región de navegación:

1.Configuración y características de las costas

2.Puntos notables en las costas

3.Relieve submarino

Estas características determinan las posibilidades de su utilización para los fines de la navegación.

2.Factores Hidrometeorológicos

Estos factores comprenden:

- Vientos
- Corrientes
- Precipitaciones atmosféricas
- Marejadas
- Mareas, etcétera.

3. Factores Hidrográficos

Los factores hidrográficos comprenden:

- Cartas, derroteros, manuales, tablas y publicaciones en general, sobre la zona de navegación.

- Ayudas electrónicas a la navegación para medir sus parámetros y con esto determinar la posició del buque en la carta.

4. Factores tácticos - operativos

Responden a la situación táctico - operativa que presenta el teatro de operaciones marítimas (intenso tráfico, maniobras navales, obstáculos de minas, DST, VST, etc).

Los métodos estudiados en navegación de estima, costera y electrónica, corresponden a condiciones normales de navegación. Sin embargo, cuando se navega por lugares circundados de peligros que afectan la seguridad de la navegación, resulta imposible utilizar muchos de los métodos estudiados, siendo entonces necesario aplicar métodos especiales, de acuerdo a las condiciones específicas de la navegación en cada zona determinada.

Dichas condiciones especiales de navegación pueden ser:

- Navegación en aguas restringidas (cerca de la costa, poca profundidad, canales, estrechos, etc.)

- Navegación con poca visibilidad.

- Navegación por los hielos.

- Navegación fluvial (ríos, lagos, etc.)

- Navegación polar.

- Navegación ortodrómica (por círculo máximo).

En este capítulo solamente se estudiará la navegación en aguas restringidas y en condiciones de visibilidad limitada, así como las particularidades y métodos empleados en cada una de ellas.

13.2. Características de las aguas restringidas.

Se denominan **aguas restringidas** a las zonas de mar limitadas por los peligros a la navegación, en las cuales los buques están obligados a navegar por canales estrechos y sinuosos o aguas poco profundas y al realizar cambios bruscos de rumbo.

Las aguas restringidas se caracterizan por:

1 Muchos peligros sumergidos o que velan.

2.Cambios bruscos de profundidades, así como regiones de poca profundidad.

3.Mareas pronunciadas, con sus correspondientes corrientes de flujo y reflujo.

4.Corrientes temporales producidas por vientos fuertes.

5.Canales muy sinuosos.

Las aguas restringidas pueden encontrarse en:

1.Fiordos.

2.Cayerías.

3.Entradas a puertos, muelles, fondeaderos, etcétera.

4 Bahías

5.Canales.

13.3. Particularidades de la navegación en aguas restringidas

Requisitos al navegar por aguas restringidas

- Llevar ininterrumpidamente con gran exactitud la estima del buque, en una carta de punto mayor.

- Usar los métodos de situación más convenientes de acuerdo a las condiciones dadas, a fin de determinar la posición del buque con rapidez y exactitud.

- Realizar los cambios de rumbos en el momento oportuno, y con precisión.

- Determinar exactamente el abatimiento y la deriva, teniendo en cuenta que, a bajas velocidades el buque abate y deriva una gran distancia.

- Emplear frecuentemente las enfilaciones (naturales o artificiales) y si es posible navegar sobre ellas.

- Haber desarrollado un estudio previo del área de navegación a través de los materiales existentes.

13.4 Aspectos que comprende la navegación por aguas restringidas

-Preparación para la navegación

-Trabajo del navegante.

Preparación para la navegación

Durante la navegación por aguas restringidas el navegante no dispone del mismo tiempo que cuando navega en condiciones normales, por lo tanto necesita preparar con anticipación todo lo relacionado con la navegación en esta zona; es decir, el éxito de la navegación en aguas restringidas depende en gran parte de la preparación que haya realizado el navegante. La preparación para la navegación comprende:

1.Preparación del buque

2.Preparación de la derrota y sus elementos.

3.Preparación del navegante.

Preparación del buque

La preparación del buque incluye el trabajo de varios departamentos y servicios del buque, pero solamente estudiaremos lo referente a los elementos evolutivos del buque y las correcciones de los equipos.

Antes de salir a navegar se deben determinar los datos evolutivos del buque. Si éstos están determinados, se deben comprobar, excepto, si han sido determinados recientemente.

Estos datos y correcciones son:

1.Corrección del girocompás.

2. Desvíos del compás magnético.

3.Tablas de revoluciones - velocidad.

4.Diámetro táctico

5. Inercia

6.Corrección de la corredera.

7.Radio desvío.

8.Correcciones del radar.

9.Correcciones del sondador acústico.

10.Abatimiento.

Preparación de la derrota y sus elementos

La preparación de la derrota y sus elementos debe corresponder a un plan preparado al efecto, en el cual se deben incluir las siguientes medidas:

1. Selección de las cartas y materiales de navegación.
2. Estudio de la travesía.
3. Preparación de las ayudas electrónicas a la navegación.
4. Preparación de las cartas seleccinadas.
5.Comprobación del sistema de gobierno.
6. Preparación del personal.
7. Preparación de los oficiales.

En la selección de las cartas y materiales de navegación se deben corregir los cuarterones y planos que se van a utilizar, y recopilar la información existente sobre la zona de navegación (derroteros, libro de señales marítimas, radiofaros y otras publicaciones).

Durante el estudio de la travesía se debe prestar especial atención a las profundidades existentes, objetos prominentes que puedan utilizarse para situarse, sistema de balizamiento, etc.

Después de dicho estudio debemos:

a) Marcar con lápiz de color (que no tape la información de la carta) las isobatas límites de navegación (de 10 metros para un calado menor de 5 metros y la de 20 metros para un calado mayor de 5 metros).
b) Se deben tomar en consideración las mareas.

c) Marcar con un triángulo los puntos notables utilizados para los fines de la navegación, (faros, señales, construcciones, etc.).

d) Señalar los objetos fácilmente detectables con el radar (resaltar con un color).

e) En caso de existir radiofaros, escribir en la carta, cerca de su posición las características para su rápida sintonización e identificación (tiempo de funcionamiento, frecuencia, señal de identificación, etc.).

f) Se traza la derrota con la mayor exactitud posible.

Los rumbos se deben trazar de modo que pasen a suficiente distancia de los peligros a la navegación.
Se deben trazar las marcaciones utilizables para cada giro del buque.
Se deben elegir enfilaciones naturales (aparezcan en las carta).

Así mismo, deben trazarse las marcaciones, ángulos horizontales y distancias peligrosas.
Determinar la " línea de no retorno " (será aquella línea perpendicular al Rv a partir de cual ya no es posible maniobrar con el buque a la entrada de estrechos o canales - es decir no se puede cancelar la maniobra).

Como resultado del estudio detallado de la travesía, su trazado debe responder a:

a) La situación operativa de la zona de navegación o de captura.

b) Conocimiento y estudio de la zona de navegación.

c) Calidad de las cartas y materiales existentes.

d) Ayudas de la navegación existentes en la zona.

e) Características táctico - técnicas del buque.

f) Ayudas electrónicas a la navegación existentes a bordo del buque.

g) Nivel de preparación de la tripulación.

Durante la preparación de las ayudas electrónicas a la navegación además de determinar sus correcciones, se deben completar las piezas de repuesto.

Otra cuestión importante es la comprobación del sistema de gobierno del buque y los telégrafos de máquinas.

Preparación del Navegante

El navegante, después de preparar el buque y la derrota, debe estudiar detalladamente la travesía, estima del buque y los métodos para determinar la posición del buque, así como organizar el trabajo de la derrota debiendo establecer una estrecha coordinación con el departamento de máquinas.

Trabajo del Navegante

Acercamiento a las costas (estrechos)

El momento más importante durante la navegación en aguas restringidas, es cuando nos acercamos a la costa, estrechos o cayerías. Si el buque antes estas circunstancias, navega durante un tiempo prolongado por estima, entonces se acumulan grandes errores al acercarse a la costa, disminuyendo la seguridad de la navegación, dificultándose la identificación de la misma.

A fin de ayudar al reconocimiento de la costa es recomendable:

a) Poner proa, durante la aproximación, a un punto de referencia tal que al descubrirlo, nos ayude a identificar la costa.

b) Si existe algún faro, se debe hacer la aproximación al amanecer, pues es cuando la luz que emite, se puede avistar a mayor distancia.

c) Poner a funcionar el radar y reconocer la costa, conectar el sondeador acústico y comprobar las profundidades medidas con las de la carta. Conectar el radiogoniómetro.

d) Determinar la posición del buque por todos los métodos posibles.

Después de reconocida la costa, se toma un rumbo perpendicular a la línea de la costa y a las isobáticas. Al llegar a la isobatas límites, se pone un rumbo paralelo a ellas.

Cuando navegamos cerca de las costas, los rumbos deben trazarse libre de los peligros a la navegación y un poco divergentes con respecto a éstos, pero a una distancia tal, que con buena visibilidad, sean observables los puntos de referencia, a fin de podernos situar con precisión.

La comparación de las indicaciones de los equipos y de la posición de estima puede contribuir a determinar la dirección más probable hacia el punto de referencia.

El movimiento del buque hacia la costa debe conformarse por las condiciones de navegación del litoral y realizarse con la observación de las medidas de precaución necesarias. Especial atención en este caso adquiere el sondador cuyo trabajo ininterrumpido permite precisar, y durante la ubicación, favorable de las isobatas determinar la posición del buque.

El sondador, además, da la posibilidad a su vez de variar la dirección y velocidad de movimiento, cuando sea detectada la isobata de seguridad.

Si ante un peligro no se puede determinar la posición en el instante, esto se debe efectuar anticipadamente, con el objetivo de acercarse al peligro llevando la estima con la máxima exactitud, teniendo en cuenta en esta travesía los elementos hidrometeorológicos reales, determinados como resultado de la observación.

Al acercarse a una costa poco conocida es muy importante reconocer y utilizar los puntos de referencias; que se encuentren en el campo visual a medida de que el buque se vaya desplazando. Para esto durante la determinación de la posición por los puntos de referencia conocidos es necesario a su vez tomar marcaciones (distancias) a los puntos de referencia desconocidos que aparezcan a proa del buque tales como puntos o salientes, cayos, rocas, instalaciones etc.

Al navegar por enfilaciones las señales o puntos de referencias deben ser detectados con antelación para que al paso de la nueva enfilación sea examinada y preparada.
La mantención del buque a un solo punto notable en presencia de corriente o abatimiento es inadmisible. En este caso el buque gradualmente se desvía del rumbo (imperceptible para el timonel), pudiendo encallarse (Fig. 375), ya que el timonel continúa manteniendo la proa del buque hacia el punto notable.

Cuando existe una corriente o abatimiento la dirección del timón debe llevarse por el compás teniendo en cuenta la deriva (abatimiento) del buque.

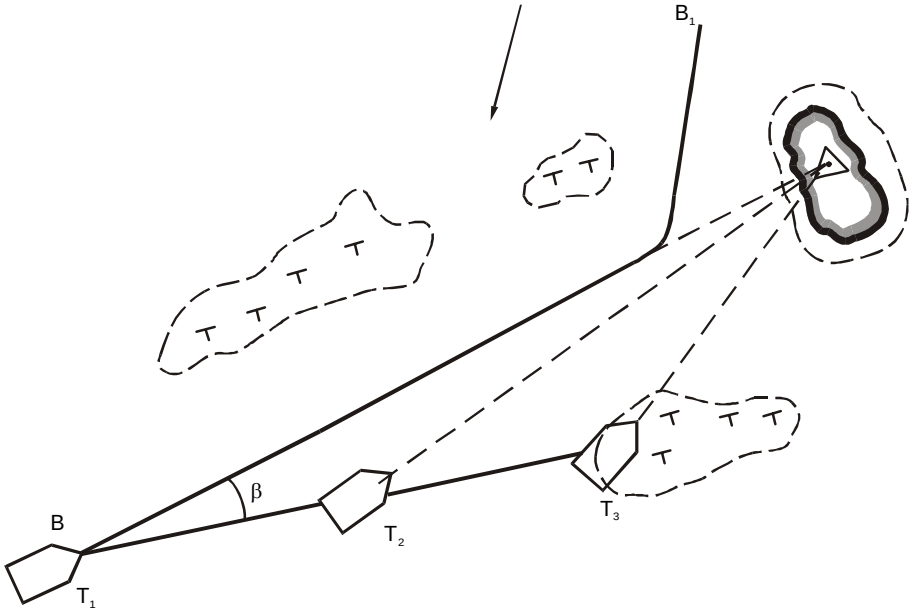


Fig. 375 Aproamiento del buque a un punto notable

En la línea del rumbo efectivo en la carta se debe anotar las lecturas de la corredera y las horas cuando las señales marítimas; puntos de referencias prominentes, así como los medios de señalización de peligros aislados estén por el través.

El tiempo en la estima se debe considerar con una exactitud de 0,1 min., ya que incluso para una velocidad igual a 10 nudos, el buque en 0,1 min. recorre aproximadamente de 30 metros, los cuales no se consideran durante la navegación por estrechos.

Al navegar en regiones peligrosas, no sólo es importante calcular los rumbos anticipadamente y las marcaciones de giro sino que se debe realizar el giro correctamente, para que al finalizar éste, el buque realmente se encuentre en la prolongación de la línea del nuevo rumbo (derrota).

Los giros en los estrechos, aguas poco profundas etc., deben realizarse con gran exactitud y ser calculados preliminarmente. Para cumplir este objetivo se realiza el siguiente procedimiento.

Supongamos que el buque navega, por la línea Rv_1 (Fig. 376), y debe caer a la línea Rv_2. De la tabla del círculo de evolución de acuerdo al ángulo de giro $\alpha = Rv_2 - Rv_1$ determinamos la distancia al nuevo rumbo d, y la trazamos desde el punto D en la línea Rv_1. Desde el punto C obtenido, en sentido opuesto al movimiento del buque, trazamos la distancia CB que es el intervalo muerto del buque. Obtenemos el punto donde se debe dar la voz de mando al timonel (B). Por el punto de referencia P se traza la línea de marcación paralela a la línea del rumbo verdadero Rv_2. Calculamos el tiempo de navegación desde el punto de intersección de esta marcación con la línea Rv_1 hasta el punto B: $t = \frac{AB}{V}$.

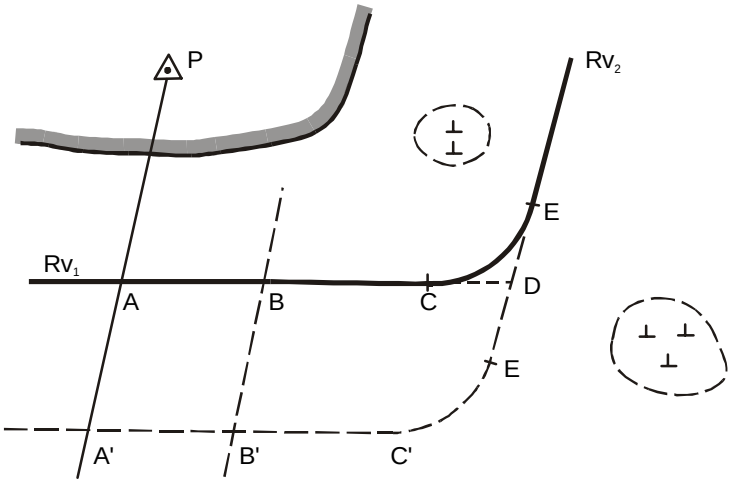


Fig.376. Giro hacia la línea de nuevo rumbo.

En la figura 376 se observa, que independientemente de que el buque se encuentre exactamente en el punto A donde se observa la marcación PA', o en cualquier otro punto sobre la línea de esta marcación (por ejemplo en el punto A') en todos los casos cuando se de la orden al timonel, el buque se encontrará en la línea BB', el giro comenzará en la línea CC' y terminará en la línea Rv_2E o en su prolongación.

Medidas de seguridad a observar por el navegante:

Al acercarnos a lugares muy peligrosos o poco conocidos, debemos tomar precauciones especiales:

a) Asumir la velocidad de seguridad según concepto de RIPA.

b) Mantenerse sobre la derrota planificada.

c) Utilizar ininterrumpidamente el sondador acústico.

d) Poner el ancla en pendura dos o tres metros por debajo del casco.

e) En caso de oleaje, tener en cuenta la profundidad, para evitar que un balanceo excesivo haga que el casco toque fondo.

f) En los lugares de mareas o de corrientes, debemos tenerlas en consideración, a fin de no apartarnos de la derrota planificada.

g) No confiar ciegamente en las boyas o balizas, pues sólo representan una ayuda; puesto que la

seguridad de la navegación depende de la exactitud del trazado y de la frecuencia con que se determine la posición del buque.

h) Si no estamos seguros de la posición, fondear.

Líneas isométricas de seguridad.

Las líneas isométricas de seguridad están determinadas para advertir al navegante sobre el acercamiento a un peligro, que se encuentra en las proximidades de la derrota prevista. Generalmente son líneas isométricas que corresponden a los parámetros de navegación: marcación, ángulo horizontal y distancia. **Marcación de seguridad**, se emplean con más frecuencia que las otras líneas isométricas debido a su sencillez y posibilidad de observarla en la práctica ininterrumpidamente con ayuda de la alidada.

Los puntos notables para la toma de la marcación se seleccionan a distancias, que no sobrepasen el alcance de visibilidad.

En la figura 377 se muestra el principio de utilización de la marcación de seguridad.

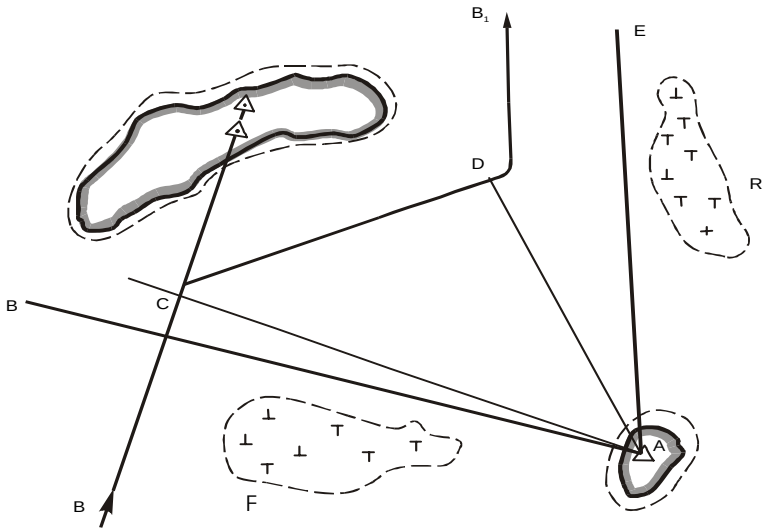


Fig. 377 Marcación de seguridad

El buque debe pasar por el estrecho representado desde el punto C al D. En el ploteo previo se traza la derrota del buque BCDB. La parte de la derrota BC se traza por la línea de enfilación. En el punto C el buque debe cambiar de rumbo a estribor y en la parte CD pasar a la distancia de seguridad del banco de arena **F'** y del peligro a la navegación **P**. Para que el buque contornee sin obstrucción el peligro P, debe caer a estribor después que rebase la línea que limita este peligro (marcación AB al punto de referencia A.

En la práctica se procede de la siguiente forma. Se convierte la marcación verdadera BA en marcación aguja magnética, aplicándole la corrección total del compás. Al seguir la línea de enfilación BC el navegante con la ayuda de la alidada observa las marcaciones al punto notable A. El giro a estribor será seguro cuando la marcación observada al punto de referencia sea mayor que la marcación ploteada en la carta. En el trayecto CD la posición del buque se controla por las observaciones. El giro en este último trayecto de la derrota DB, debe efectuarse con suficiente antelación para que después de finalizado el giro el buque no corte la marcación peligrosa EA, que limita el peligro de navegación R. El rumbo del buque en el último trayecto hasta el paso del peligro tampoco debe cortar la marcación peligrosa EA. También se puede notar, que en el tramo BC la línea de enfilación no sólo es la línea del rumbo efectivo sino que al mismo tiempo sirve como línea isométrica límite del peligro de navegación P. Por eso el desvío del buque respecto a la línea de enfilación a estribor hasta cortar la marcación peligrosa BA es inadmisible.

Ángulo horizontal de seguridad se utiliza también con gran frecuencia ya que el navegante fácilmente sin ayudantes con un sextante puede controlar la posición del buque respecto al peligro.

Sin embargo la utilización de la circunferencia (línea de ángulos iguales) como línea isométrica es imprescindible la existencia como mínimo de dos puntos notables distribuidos correspondientemente respecto a los límites de los peligros. Si el buque tiene que pasar por la línea del rumbo efectivo BB_1 (Fig. 378) próximo a los peligros de navegación F y P, entonces es conveniente utilizar la ubicación de los puntos notables A y B en el campo de visibilidad del buque para trazar las líneas isométricas peligrosas (circunferencia que limitan los peligros F y P).

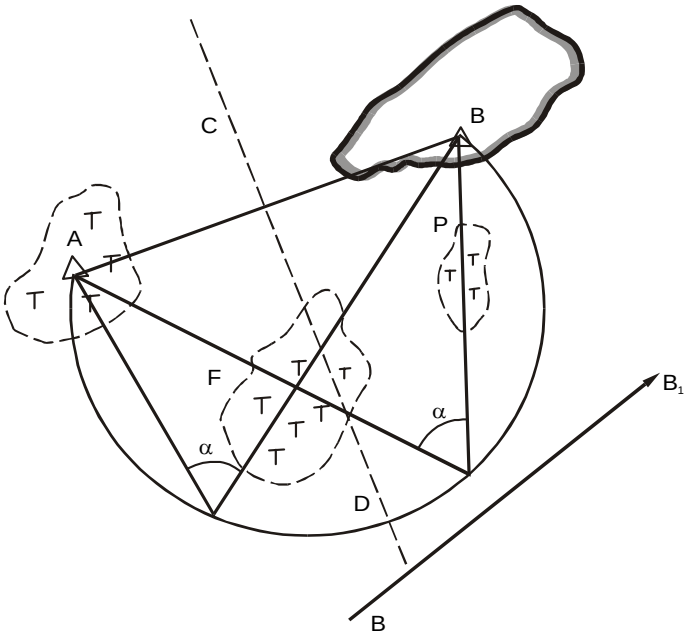


Fig. 378. Ángulo horizontal de seguridad.

La circunferencia se traza de forma habitual: la base AB se divide en dos partes iguales y en su centro C se levanta la perpendicular CD. Sobre la perpendicular por el método de tanteo se halla el centro 0 y se traza una circunferencia de tal forma, que esta pase por los dos puntos notables A, B y que limitan (con determinado margen) los peligros A y B. Este ángulo es el **ángulo horizontal de seguridad**. El ángulo α se introduce en el sextante, permitiendo al navegante observar su variación al pasar por el peligro. La seguridad estará garantizada, si durante el movimiento del buque próximo al ángulo horizontal de seguridad de los puntos de referencia A y B no es mayor que el ángulo α.

Distancia de seguridad, se emplea al encontrarse en la región de navegación de puntos notables, cuya distancia puede ser medida con ayuda de medios radiotécnicos o instrumentos.

Si el buque debe pasar por la línea del rumbo efectivo (Fig. 379) cerca del bajo F y P, por lo que para garantizar la seguridad del buque se debe utilizar el punto notable A, situado a poca distancia. Para esto desde el punto A – posición del punto de referencia como centro – se traza una circunferencia de radio D que limita con determinado margen los peligros F y P.

El paso del buque será seguro, si con frecuencia o ininterrumpidamente se mide la distancia desde el buque hasta el punto notable A y ésta no sea menor que D. La distancia se puede medir con ayuda de diferentes equipos o instrumentos, que se encuentran en el buque. Siendo lo más frecuente que la distancia se mida con el radar.

En algunos casos la medición de la distancia hasta el objeto puede ser efectuada indirectamente con ayuda del sextante, si es conocida la altura del punto de referencia observado. En este caso el ángulo vertical se calcula por la fórmula:

$$\alpha' = 1{,}86\frac{H}{D}$$

ó se selecciona de la tabla 29 TUN.

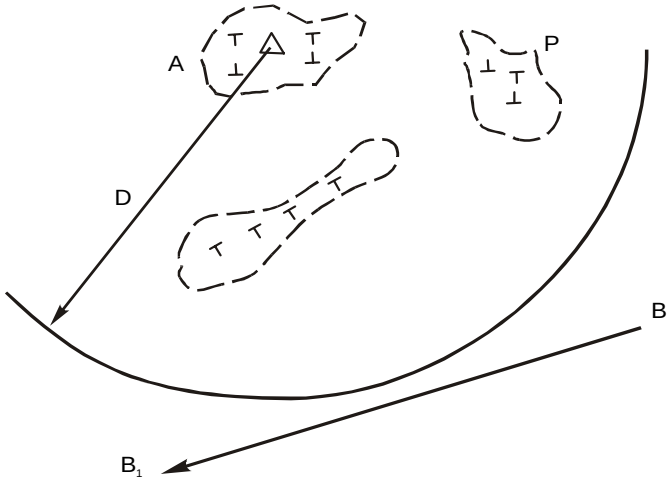


Fig. 379. Distancia de seguridad.

En lo sucesivo durante el seguimiento de la proximidad al peligro es necesario controlar el valor del ángulo vertical (su variación). Si el ángulo vertical es menor al calculado, el buque puede pasar libremente respecto al peligro. Si el ángulo vertical es igual al calculado, significa que el buque está en el límite de la distancia de seguridad y el navegante debe tomar las medidas de precaución pertinentes. Este ángulo vertical por analogía con lo anteriormente expuesto se denomina **ángulo vertical de seguridad**.

Las líneas isométricas peligrosas con cierto margen permiten a un buque dado realizar las maniobras necesarias (giro, parada) en caso de errores en la estima, detectado al cruzar las líneas isométricas peligrosas.

Por analogía con la marcación, distancia y ángulos peligrosos, con frecuencia, en la práctica de navegación se recurre a la **isobata de seguridad**. Al acercarse a la costa, cayería, estrechos, radas, etc. las indicaciones del sondador acústico advierten al navegante del peligro de cruce de la isobata de seguridad, cuyo valor numérico depende de las condiciones concretas de navegación, calado, velocidad y rumbo del buque así como las tareas a cumplir en la región dada al buque.

Red de líneas isométricas.

Para acelerar el proceso en la determinación de la posición del buque en el mar, es conveniente durante la preparación para la travesía, plotear la red de líneas isométricas en las zonas más peligrosas del itinerario.

En este caso, en el trayecto, se desprende la necesidad del ploteo gráfico de las líneas isométricas para obtener la posición. La posición observada se podrá obtener en el menor tiempo.

Las redes de líneas isométricas más utilizadas son las siguientes;

- estadimétricas (distancias)

- azimutales (marcaciones)

- goniométricas

- combinadas

La red estadimétrica (Fig. 380) representa dos (tres) redes de circunferencias trazadas desde sus puntos de referencia respectivos con un intervalo de 1, 2, 3 o 5 cables. Estos puntos deben estar situados de forma que la familia de las líneas isométricas estadimétricas que se encuentran en el itinerario del buque se corten con un ángulo mayor de 30° y menor de 150°. Las isoestadias se trazan con ayuda del compás y tiralíneas con líneas finas de colores, con tinta china. En dependencia del contenido de la carta, la densidad de las líneas isométricas puede ser diferente. Sin embargo el criterio fundamental sobre la cantidad de líneas isométricas debe ser la exactitud del ploteo de la posición, obtenida por distancias,

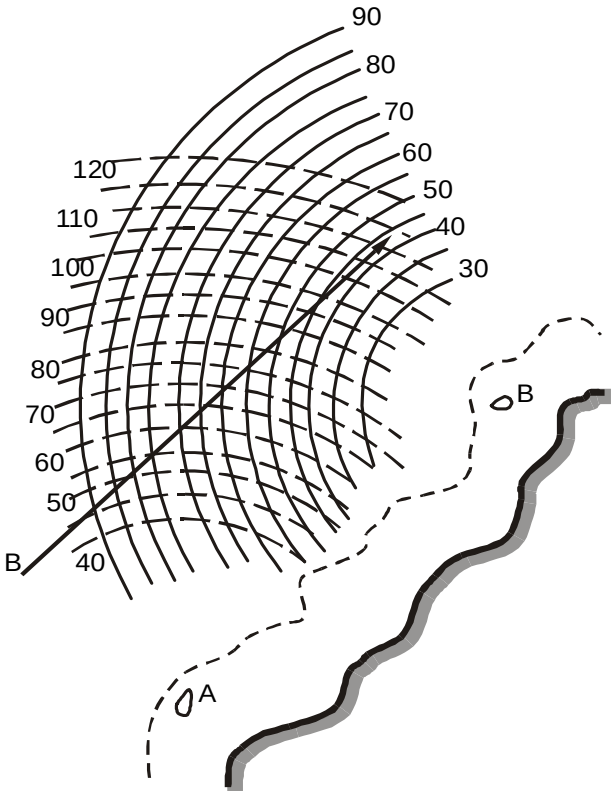


Fig. 380. Red estadimétrica.

Generalmente los arcos de circunferencia de la red estadiométrica se trazan con un intervalo de 15 – 20 mm, el cual garantiza la posibilidad de la interpolación lineal entre las líneas isométricas por simple inspección.

El rotulado de los arcos (distancia de los puntos de referencias en millas) debe efectuarse de forma queno impida ver los elementos de la carta, específicamente en la cercanía de la línea del rumbo efectivo.

La **red azimutal**, o redes de marcaciones en la carta exige la selección como mínimo de dos puntos notables. Estos puntos deben estar situado en lo posible cerca de la zona de navegación y que tenga buena visibilidad desde el itinerario del buque. Las líneas de marcaciones en ambos objetos en cualquier punto del canal deben cortarse en ángulos mayores de 30° y menores de 150° (Fig. 381).

Las líneas de marcaciones se trazan con líneas finas de tinta china en cada punto notable con su color.

Si no hay tinta china de diferentes colores, para diferenciar las líneas de marcaciones, se debe trazar por ejemplo, en uno de los objetos líneas continuas y en el otro líneas discontinuas. Las líneas de marcaciones de estos objetos se rotulan cada 5° correspondientemente con su valor numérico desde el mar.

Red goniométrica. Esta red se utiliza en los lugares más estrechos, sinuosos y de mayor peligro a la navegación. Aquí se emplea el método de determinación de la posición por dos ángulos horizontales, medidos entre dos pares de puntos notables. Este método exige la presencia en el lugar y en la carta no menos de tres puntos notables distribuidos de tal forma que en la parte más peligrosa de la zona de navegación los ángulos entre las líneas isométricas (circunferencias) sean mayores de 30° y menores de 150° (Fig. 382).

La construcción de las circunferencias fue objeto de estudio en el capítulo 5 (Punto5,3).

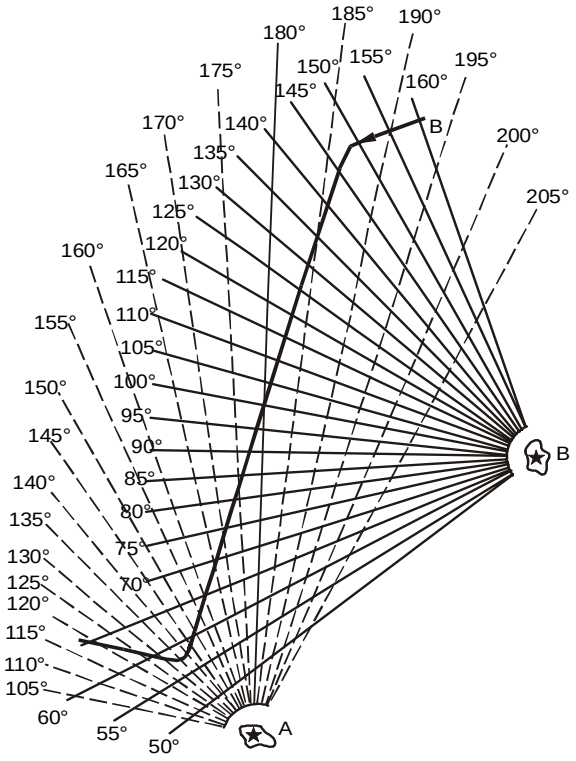


Fig.381 Red azimutal

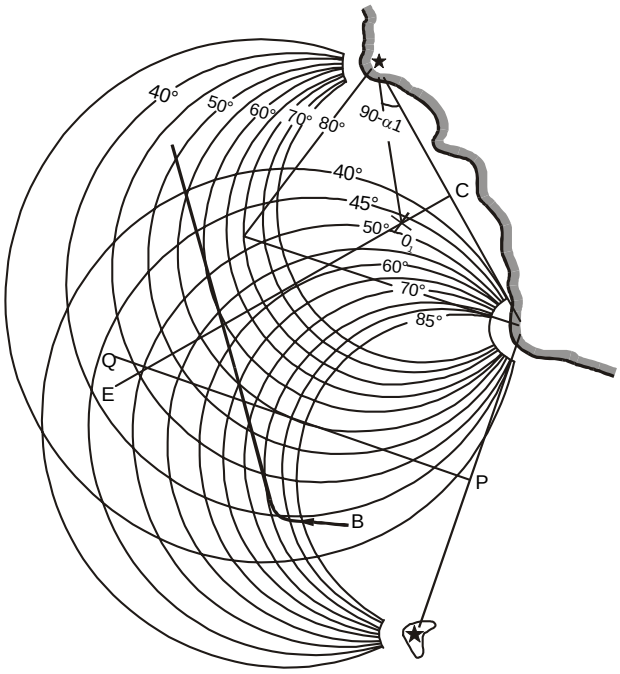


Fig.382 Red goniométrica

Para medir simultáneamente los ángulos son necesarios dos observadores con sextantes. Las observaciones pueden efectuarse prácticamente desde cualquier lugar del buque, esto amplia la posibilidad de elección de los puntos notables, pero exige del navegante en algunos casos considerar la situación del observador al plotear la posición del buque en cartas de grandes escalas.

Las circunferencias se trazan cada 15 - 20 mm, para que la mayor parte de la derrota sea garantizada con la máxima exactitud de la obtención de la posición del buque en la carta. En la figura 379 se observa que la distancia entre las circunferencias que pasa a través de igual número de grados (5°), no son iguales. El navegante debe considerar esto durante la preparación para la travesía y al trazar la red en la carta seleccionar la cantidad necesaria de las líneas (intervalo angular) para zonas específicas de la derrota del buque. Los intervalos angulares entre las circunferencias de la red en cada caso particular se selecciona de forma que las distancias entre las líneas isométricas no sean mayor de 15 - 20 mm en la travesía.

Los arcos de circunferencias de cada par de objeto se plotean con líneas finas de diferentes colores. El rótulo se efectúa con el mismo color que la circunferencia.

La red combinada se emplea cuando en el campo visual se encuentra solamente un punto de referencia o cuando en el buque no existe la posibilidad de medir dos magnitudes similares.

Se denomina **red combinada**, **al conjunto de líneas isométricas correspondiente a la marcación y ángulo horizontal, marcación y distancia**.

En la figura 383 está representada la red combinada, compuesta de líneas de marcación y distancias. La construcción de cada sistema de líneas isométricas ya analizado, no presenta ninguna dificultad en su construcción.

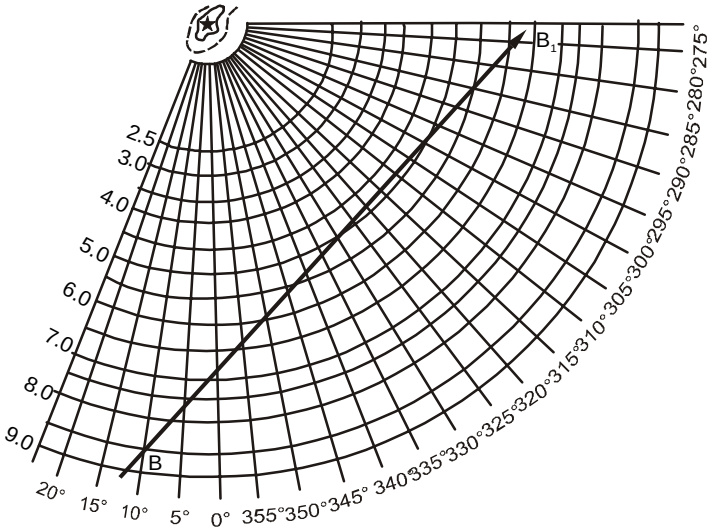


Fig. 383 Red combinada

13.5 Determinación de la posición de fondeo

Generalidades

Durante la navegación en aguas restringidas, el buque debe estar listo para fondear en cualquier momento, pero además del fondeo planificado con anticipación, puede surgir la necesidad del fondeo por causas imprevistas, como son:

1. Disminución considerable de la visibilidad (niebla, precipitaciones, etc.).

2. Cuando nos acercamos a un canal estrecho y avistamos otro buque que navegando por el canal, va a nuestro encuentro.

3. Cuando la posición del buque es dudosa, producto de varias posiciones inexactas, o por no haber podido reconocer la costa o las ayudas a la navegación, en una zona peligrosa.

4. Cuando se reducen considerablemente las características táctico - técnicas del buque, (rotura de equipo) que son fundamentales para asegurar la navegación en una zona determinada.

5. Cuando se reducen considerablemente las características de maniobra del buque (pérdida del gobierno).

En cualesquiera de estos casos, tanto previstos como imprevistos, el Capitán debe saber elegir un buen fondeadero y efectuar la aproximación a éste con la mayor exactitud posible.

Elección del punto de fondeo

La elección del punto de fondeo se debe realizar de acuerdo a todos los cálculos y medidas de seguridad exigidas para la navegación y en la práctica marinera. Asimismo, debe tomarse en consideración la situación táctica de la zona seleccionada como fondeadero.

Cuando seleccionamos un lugar como fondeadero, debemos tener en cuenta lo siguiente:

1. Profundidad del lugar y mareas existentes.

2. Tipo de fondeo.

3. Dirección y fuerza del viento.

4. Dirección y velocidad de la corriente.

5. Deben existir puntos de referencias cercanos para controlar la posición de fondeo mientras se está en el mismo lugar.

6. Las características del lugar para, en caso de necesidad, levar anclas rápidamente y realizar la salida al mar, sin peligro.

Los tipos de fondeos recomendables para el fondeo, en orden de calidad son:

1. Arcilla fangosa (fango duro).

2. Cebadal (fango arenoso).

3. Arena.

4. Piedra o laja.

Aproximación al fondeadero y fondeo del buque.

Una vez, elegido el fondeadero y el punto de fondeo, se deben trazar, en la carta o plano, los rumbos de aproximación al fondeadero.

Los métodos empleados para la aproximación varían en dependencia del lugar seleccionado para el fondeo, y de las ayudas a la navegación existentes en la zona.

Veamos a continuación algunos métodos de aproximación.

Fondeo sin enfilaciones.

Existen dos casos:

1. Cuando se puede aproar a una ayuda a la navegación.

En este caso se produce de la siguiente forma:

a) El punto de fondeo se selecciona en un punto (F) de una línea que pase por el punto de referencia A (Fig. 384).

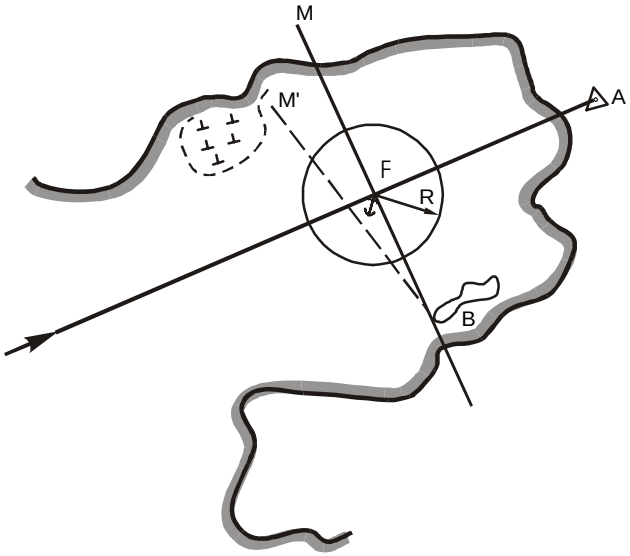


Fig. 384 Fondeo sin efilaciones (Por la proa aparece un punto notable)

b) El rumbo de aproximación se traza sobre la línea que pasa por el punto (F) y por el punto (A).

c) En el punto (F) se traza la circunferencia de borneo.

d) De acuerdo con la inercia del buque, se traza éste en sentido opuesto al rumbo de aproximación. Por este punto se traza la marcación verdadera (M'B).

2. Cuando no se puede aproar a una ayuda a la navegación.

En este caso se produce de la forma siguiente:

a) Después de seleccionado el punto (F) se traza un rumbo directo a él y se controla el rumbo por observaciones a los puntos de referencias existentes. (Fig. 385).

b) En el punto (F) se traza la circunferencia de borneo.

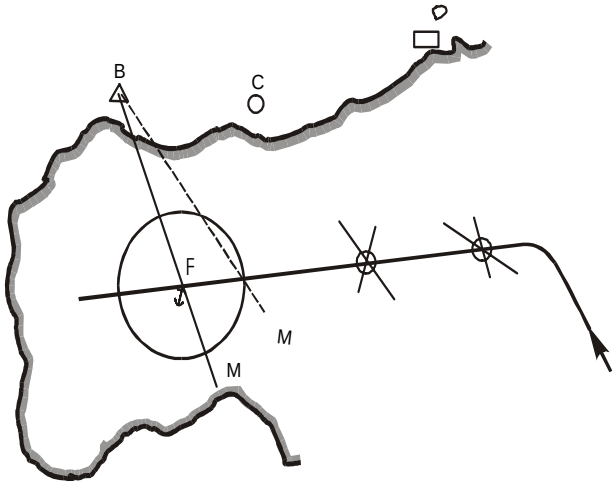


Fig. 385 Fondeo sin efilaciones(Por la proa no aparece punto notable)

c) De acuerdo a la inercia del buque, se traza ésta en sentido opuesto al rumbo de aproximación. Por este punto se traza la marcación verdadera (M'B).

d) A partir del punto de fondeo se traza la marcación verdadera (MB).

Durante este tipo de aproximación, el Capitán del buque pone proa al punto de referencia (A). Al llegar a la marcación (M'B) ordena parar máquinas, y en la marcación (MB) ordena: FONDO.

Fondeo con una sola enfilación

Se procede de la forma siguiente:

1. El punto de fondeo se selecciona en un punto (F) sobre la enfilación (AA').

2. El rumbo de aproximación se traza sobre la enfilación (AA').

3. En el punto (F) se traza la circunferencia de borneo.

4. De acuerdo a la inercia del buque, se traza ésta en sentido opuesto al rumbo de aproximación. Por este punto se traza la marcación verdadera (M'B).

5. A partir del punto (F), se traza la marcación verdadera (MB).
Durante este tipo de aproximación, el Capitán del buque pone proa a la enfilación (AA'). Al llegar a la marcación (MB') ordena FONDO (Fig. 386).

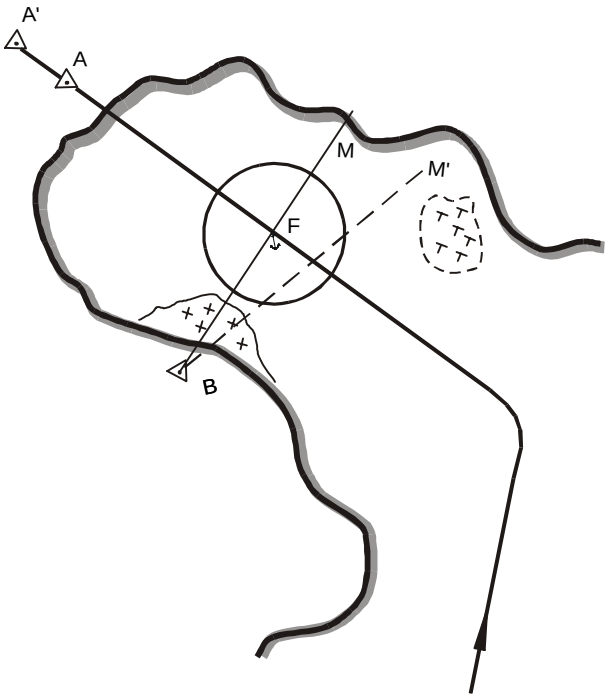


Fig. 386 Fondeo con una enfilación

Fondeo con dos enfilaciones.

Para acercarse al lugar de fondeo (punto F, fig. 384), el buque debe aproarse a la enfilación guía (); en el punto se para máquina, y en el momento de llegada a la línea de enfilación fondear el ancla En estas circunstancias se debe tener en cuenta dos cuestiones importantes. En primer lugar , durante la observación de la enfilación lateral (BB_1) se debe considerar la distancia del compás, con cuya ayuda se lleva la observación de la roda o escobén, y a través del cual pasa la cadena del ancla, En segundo lugar hacia el lugar de fondeo, el buque debe acercarse con la menor inercia en marcha avante.

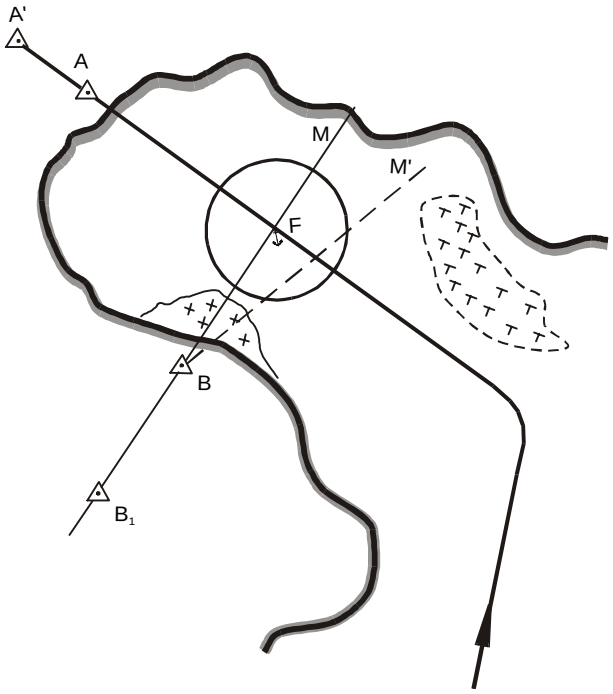


Fig. 387 Fondeo con dos enfilaciones

Medidas generales durante la aproximación al fondeadero

1. El buque debe llegar al punto de fondeo con la menor estrepada posible.

2. Si existen corrientes apreciables, la aproximación debe hacerse paralela a la corriente pero en sentido contrario a ésta.

3. Si existen vientos predominantes, debemos aproarnos a éstos.

4. Durante la aproximación al fondeadero debe utilizarse el sondador acústico.

Conclusiones

La selección del fondeadero y del punto de fondeo depende de una serie de factores tácticos y de navegación y son producto de un análisis minucioso y detallado.

La aproximación al fondeadero y el fondeo del buque deben hacerse con seguridad y exactitud.

13.6. Particularidades de la navegación con poca visibilidad.

Durante la navegación en una zona determinada, puede suceder que disminuya la transparencia de la atmósfera ocasionada por fenómenos meteorológicos como lluvia, niebla, etc. Esto trae como consecuencia que la visibilidad se reduzca desde varias millas a unos pocos cables e incluso a metros.

Cuando esto sucede es preciso tomar una serie de precauciones y de medidas de seguridad durante la navegación, así como el empleo de métodos especiales para determinar la posición del buque.

Sabemos que la distancia de visibilidad al horizonte depende de la transparencia de la atmósfera, y ésta a su vez de los fenómenos meteorológicos. Cuando en una zona determinada la visibilidad está comprendida entre 0 a 20 cables podemos decir que es una zona de poca visibilidad.

La navegación con poca visibilidad presenta las siguientes limitaciones:

1. Es imposible determinar la posición del buque por medio de observaciones a los astros.

2. Es imposible observar claramente las características y contornos de la costa, así como las ayudas a la navegación, existentes en la zona que nos rodea.

3. No se puede determinar la posición por los métodos visuales.

Estas limitaciones traen como consecuencia que disminuya, grandemente, la seguridad de la navegación en una zona de poca visibilidad.

Por lo tanto, el Capitán debe estar preparado para asegurar la navegación del buque, el cual debe estar equipado con los medios técnicos necesarios, y el navegante debe saber utilizarlos, en correspondencia con los métodos especiales que se pueden emplear, para determinar la posición o para orientar al buque.

Medios y métodos utilizados para la navegación con poca visibilidad

Cuando se detectan los primeros indicios de una disminución apreciable de la visibilidad, se debe:

1. Determinar la posición del buque.

2. Determinar la discrepancia.

3. El acercamiento a la costa debe hacerse con un rumbo perpendicular a las isobatas o a la costa y no rebasar las isobatas límites de seguridad. Así mismo durante la navegación cerca de la costa, se debe tomar un rumbo paralelo o un poco divergente a la línea de costa. (Fig. 384).

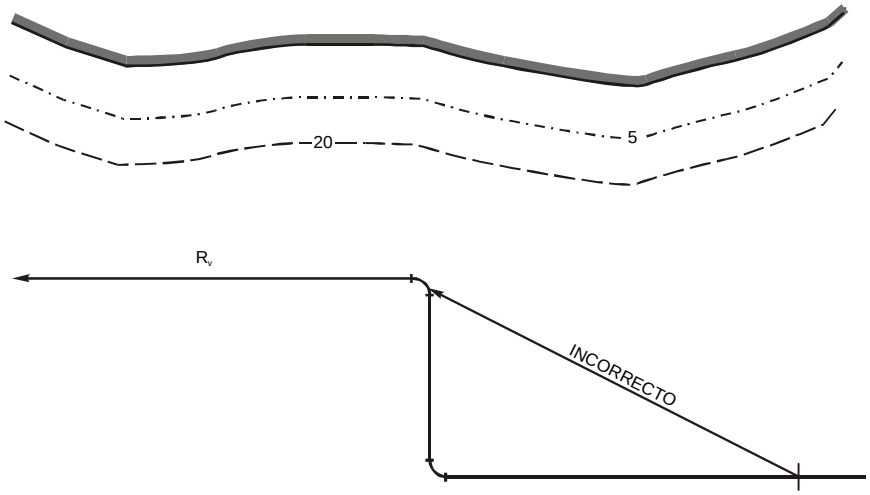


Fig. 388 Rumbos a realizar durante la navegación con poca visivilidad

4. Utilizar los medios electrónicos para determinar la posición del buque, pues los medios visuales no se pueden emplear en esta situación.

5. Se debe llevar un control riguroso de la estima del buque y analizar las discrepancias, teniendo en cuenta todos los factores que pueden influir en éstos. Sólo después se deben hacer cambios de rumbos o de velocidades.

6. Se deben comprobar las profundidades que marca el sondador con las de la carta.

Durante la navegación con poca visibilidad, además de las indicaciones antes mencionadas, se deben utilizar los siguientes métodos de orientación y de determinación de la posición del buque.

a) Orientación del buque por medio de las señales de niebla.

b) Orientación del buque por medio del sondador.

Las señales sonoras de niebla pueden ser: aéreas y submarinas. Son emitidas desde faros, buques - faros, boyas o desde instalaciones especiales situadas a la entrada de los puertos.

Los datos sobre éstas vienen indicados en las cartas, cuadernos de faros, derroteros, etcétera.

Para emitir las señales de niebla, se utilizan los siguientes medios:

1. *Sirena*. Es un equipo de acción neumática que emite sonidos agudos o graves. Tiene un alcance de 6 millas y se instala en los faros.

2. *Gong*. Se instala en los buques - faros, tiene un alcance de 2 millas.

3. *Campana*. Se instala en la proa del buque, a la entrada del puente, buques - faros, etc. Puede ser accionada eléctricamente o por la marejada, tiene un alcance de 0,5 a 1,5 millas.

4. *Chicharra*. Se instala en las boyas. Tiene un alcance de 0,5 millas.

5. *Cañón*. Da las señales por medio de disparos.

6. *Diafón*. Irradiador neumático de sonido, del tipo de pistón. Emite una señal continua de 3 a 5 *seg* de duración y de gran potencia. Tiene un alcance de 25 millas.

7. *Tifón*. Irradiador de sonidos de membrana neumática. Emite una señal de tono limpio. Tiene un alcance de 25 millas.

8. *Nautafón*. Irradiador de sonido de membrana eléctrica y accionado por electroimán. Tiene un alcance de 6 millas.

Las señales aéreas de niebla son señales preventivas, o sea, indican al navegante la aproximación de un peligro, o sobre la cercanía de la costa, puerto, etcétera.

Medidas de seguridad en condiciones de visibilidad limitada.

La navegación con poca visibilidad presenta la característica de que existen más peligros de varaduras o de colisión con otro buque, por lo que es necesario tener en cuenta las siguientes medidas de seguridad:

1. Se reduce la velocidad.

2. Se emiten las señales sonoras, de acuerdo al RIPA.

3. Se debe mantener silencio en la cubierta superior y en el puente de mando, a fin de que se puedan escuchar las señales sonoras de los buques que naveguen al encuentro, y de las ayudas sonoras a la navegación.

4. Se sitúan vigías en lugares apropiados (mástil, puente de mando, proa, etc.), en razón a que la visibilidad puede variar en dependencia de la altura sobre el nivel del mar.

5. Utilizar ininterrumpidamente las ayudas electrónica a la navegación para determinar la posición del buque y la profundidad.

Conclusiones.

Un buque que debe trasladarse de un lugar a otro en que haya niebla durante la navegación costera tendrá que:

1. Alejarse de la costa normalmente, después navegar paralelo a la misma y a la altura del lugar de recalada, poner un rumbo perpendicular a la costa.

2. Seguir la costa cercana para ver las señales de niebla o por lo menos oír las acústicas.

CAPÍTULO XIV

PREPARACIÓN DEL BUQUE PARA LA TRAVESÍA.

Capítulo XIV
PREPARACIÓN DEL BUQUE PARA LA TRAVESÍA

Las medidas que deben cumplirse para preparar el buque para la navegación, están dirigidas a garantizar la misma. La experiencia ha demostrado que una correcta preparación para la travesía disminuye las probabilidades de accidentes y contribuye al cumplimiento exitoso de la misión.

La preparación para la navegación debe realizarse minuciosamente, con el objetivo de que antes de salir al mar los navegantes conozcan con profundidad la zona de navegación y se hayan elaborado previamente todos los cálculos a utilizar durante la travesía, debiendo tener presente que cualquier error que cometamos durante esta fase puede originar posteriormente graves consecuencias, que pueden ir desde la inseguridad en la posición del buque en un momento dado, hasta la pérdida total de la unidad, producto de las averías.

La preparación minuciosa para la travesía desempeña un papel fundamental en la navegación costera y especialmente cuando se navega por lugares bajos y peligrosos (zonas de cayería, estrechos, canales, puertos, etcétera), en los cuales el oficial navegante tendrá muy poco tiempo para analizar la situación y realizar cálculos.

La preparación de un buque para emprender una travesía comprende tres aspectos a desarrollar:

- Preparación y estudio general de la travesía.

- Planificación y estudio detallado de la travesía.

- Preparación de los equipos e instrumentos.

14.1 Preparación y estudio general de la travesía

Durante la preparación y estudio general de la travesía se deben resolver las siguientes cuestiones:

a) Selección de todas las cartas náuticas y publicaciones correspondientes a la zona de navegación y su actualización.

b) Trazado de la derrota previa general y realización de los cálculos iniciales de planificación.

a) Selección de las cartas náuticas y publicaciones de la zona de navegación y su actualización

El oficial navegante con la ayuda del catálogo de cartas náuticas y la relación de los documentos y publicaciones de navegación reunirá las cartas generales y particulares, derroteros, libro de señales marítimas, etcétera, correspondientes a la zona de navegación.

Las cartas náuticas para la travesía se seleccionan cuidadosamente con la ayuda del catálogo sobre la base de la derrota probable.

Al seleccionar las cartas, debe tenerse en cuenta las escalas más convenientes de acuerdo al tipo de navegación a realizar, para garantizar la seguridad de la travesía. Es obvio que al emplear una escala en la carta de punto mayor, se incrementa la exactitud, no obstante para la selección de las escalas podemos tomar como referencia el modelo presentado en la tabla 4.2.
Tabla 14.1

ESCALAS	USO
Escalas 1:25 000 y mayores	Utilizada durante la entrada a bahía, puertos, zonas restri gidas ala navegación, aguas poco profundas y durante la llegada al punto de fondeo.
Escalas 1:30 000 y 1:75 000	Se emplean para la navegación en aguas muy poco profundas o restringidas por las cayerías interiores, pasas, etc.
Escalas 1:100 000 y 1:250 000	Para la na egación en los límites del alcance vis al y de radiolocalización.
Escalas 1:300 000 y 1:500 000	Para la navegación en los límites de alcances de los radiofaros circulares y otros SRN
Escalas entre 1:1000 000 y 1:5000 000	Navegación en zonas abiertas del mar o del océano . En estos casos también pueden usarse las cartas especiales u hojas de ploteo.

Las publicaciones de ayuda y consulta a la navegación para la travesía se relacionarán según la tabla 14.2 y en él se incluirán todos aquellos documentos que permiten un estudio detallado de la zona de navegación y sus características.

Esta relación, facilita al navegante la búsqueda de una información determinada sobre la zona de navegación durante la travesía y constituye también un anexo al plan gráfico.

RELACIÓN DE PUBLICACIONES DE AYUDA Y CONSULTA.

Tabla 14.2

N⁰	**Denominación de la publicación**	**Año edición y país**	**N⁰ artículos o páginas**	**Observaciones**
1	**2**	**3**	**4**	**5**
1	Libro de Señales Marítimas de las costas de Cuba	2002 Cuba	Pág. 3 -16 y 88 -100	Tramo Habana – Cienfuegos

Las columnas 4 y 5 se llenan durante el estudio detallado de la travesía.

Una vez elaboradas estas relaciones, se procede a la localización de todas las cartas y publicaciones náuticas previstas, su completamiento o sustitución.

A continuación se procede a comprobar la actualización de todas las cartas náuticas y publicaciones hasta el último aviso editado, garantizando que las mismas se encuentren corregidas antes de salir al mar.

En el caso de que el buque posea un SIVCE (Sistema de información visual por carta electrónica con cartas vectoriales) se introducen las correcionesinformados en los Avisos a los Navegantes.

b) Trazado de la derrota previa general y realización de los cálculos iniciales de planificación

La derrota previa general se traza en las cartas generales (de punto menor) con el objetivo de realizar los cálculos iniciales para la travesía, sobre la base de las órdenes e indicaciones recibidas del Capitán. Como resultado se conforma una idea general de los rumbos a realizar, las distancias a recorrer, los límites de tiempo para la navegación y otros cálculos básicos para el desarrollo de la misma.

Para el trazado de la derrota previa general se deben presentar los siguientes elementos:

- La situación actual en la región de travesía (litoral, pelugros a la navegación y otros obstáculos, etcétera).

- Las derrotas recomendadas en los derroteros y en otras publicaciones náuticas.

- Las informaciones que brindan las cartas y publicaciones sobre la zona de navegación (peligros a la navegación, características de las costas, etcétera).

- La existencia de medios de señalización marítima y sistemas de ayuda a la navegación (faros, radiofaros, SRN, etcétera).

- Los fenómenos hidrometeorológicos que afectan la zona de la navegación, (ciclones tropicales, nieblas, etcétera).

Una vez trazados los rumbos aproximados para la travesía, se procede a determinar la distancia total a recorrer y después la velocidad efectiva a desarrollar para lo cual el navegante tendrá en cuenta lo siguiente:

- Características del buque.

- Requerimientos para el desarrollo de la travesía (limitaciones de horarios de salida y llegada, situación de la región de navegación, tareas a cumplir, etcétera).

- Características hidrometeorológicas de la zona de navegación.

Sobre la base de estos datos, se calcula la duración máxima de la travesía y se determinan las horas de salida y llegada a los puertos, fondeaderos o lugares escogidos, así como los elementos necesarios para dotar al buque de la debida autonomía.

El ploteo en la carta general se desarrolla conjuntamente a un estudio preliminar generalizado, en el cual es necesario profundizar en algunos detalles, como: zonas costeras, archipiélagos y cayerías existentes a lo largo de la travesía, existencia de medios de ayuda a la navegación en la zona, lugares de recalada previstos y sus características generales.

En esta etapa se realizarán también los cálculos preliminares astronómicos (orto, ocaso, crepúsculos) y de mareas para los puntos de salida y arribo.

14.2 Planificación y estudio detallado de la travesía

La planificación y estudio detallado de la travesía comprende los siguientes aspectos:

a) Estudio detallado de la travesía.

b) Trazado de la derrota previa particular.

c) Preparación de las cartas náuticas.

d) Elaboración del plan gráfico de la travesía.

a) El estudio detallado de la travesía es el complemento necesario del estudio preliminar que se realiza durante la preparación y estudio general de la travesía y es la parte componente más importante de toda la preparación para la navegación.

Esta actividad tiene mayor importancia cuando los oficiales del buque no conocen la zona de navegación.

Para este estudio se utilizarán las cartas particulares y generales de la zona, así como las publicaciones de ayuda a la navegación seleccionadas.

Durante el estudio detallado los navegantes profundizan sus conocimientos sobre las características geográficas, hidrográficas y de navegación e hidrometeorológicas de la región de travesía mediante un examen detallado de la carta y la lectura simultánea del derrotero y otras publicaciones náuticas.

Este estudio permite comprobar la información que nos brinda las cartas con las que aparecen en las publicaciones de navegación y complementarlas, además posibilita encontrar posibles imperfecciones u omisiones y corregirlas.

La zona a navegar debe estudiarse con relación a las características técnicas del buque y las condiciones de navegación. Para ello se tendrán en cuenta:

- el calado, los elementos evolutivos (inercia, diámetro táctico, etcétera);

- los equipos de gobierno y orientación;

- existencia de zonas prohibidas y peligrosas a la navegación;

- características de los medios de señalización marítima (faros, boyas, enfilaciones, sistemas de navegación);

- características hidrográficas (profundidades, isobatas, canales, tipos de fondos, etcétera);

- lugares de abrigo y fondeaderos;

- características geográficas (puntos de referencias naturales, su identificación, etcétera);

- características hidrometeorológicas (vientos, corrientes, visibilidad, etcétera);

- horario de travesía y datos astronómicos (orto, ocaso, crepúsculo del sol y la luna);

Se estudiarán además, las reglas e instrucciones para navegar durante las recaladas, dentro de los puertos, por aguas interiores, por canales, etc., prestando especial atención al balizamiento.

Los resultados del cálculo de los datos astronómicos y de mareas para los puertos principales de la travesía se utilizarán en la confección de tablas de consulta a incluir en el plan gráfico según los modelos que aparecen en las tablas 14.3 y 14.4.

TABLA DE CÁLCULOS ASTRONÓMICOS **Tabla 14.4**

ZONA DE REFERNCIA:---------- LATITUD:---------- LONGITUD----------							
FECHAS **ELEMENTOS**					**CORREC. EN TIPO PARA LOS PUERTOS DE:**		
Hora del comienzo del crepúsculo náutico matutino.							
Hora del orto del sol.							
Hora del ocaso del sol							
Hora del comienzo del crepúsculo náutico vespertino.							
Hora del orto de la luna.							
Hora del ocaso de la luna.							
Edad o fase de la luna							

TABLA DE CÁLCULO DE LAS MAREAS **Tabla 14.5**

LUGARES	FECHA	HORAS Y ALTURAS DE LAS MAREAS							
		BAJAMAR		PLEAMAR		BAJAMAR		PLEAMAR	
		HR	ALT	HR	ALT	HR	ALT	HR	ALT

Además antes de salir al mar los navegantes organizarán con el resto de los oficiales que montan guardia de navegación, el estudio de los elementos fundamentales relacionados con la travesía y la zona de navegación.

Es obligación de cada oficial que participe en el aseguramiento a la navegación, estudiar y conocer la zona de navegación y sus particularidades.

b) El trazado de la derrota previa particular se realizará una vez concluido el estudio detallado de la travesía o simultáneamente al desarrollo del mismo y consiste en el traspaso de la derrota previa general a los cuarterones u otras cartas más detalladas y la puntualización de los cálculos y construcciones gráficas de navegación elaborados anteriormente.

Al trazar la derrota debemos cumplir las siguientes indicaciones:

- Los rumbos deben pasar a una distancia de los peligros de navegación que garantice la seguridad del buque y la misma estará en dependencia del cubrimiento cartográfico y las características de los medios de señalización marítima existentes, las AEN del buque y su confiabilidad y de las condiciones de navegación (estado del tiempo, horario de travesía, etcétera).

- Durante la navegación costera se recomienda una distancia mínima de entre 3 y 4 millas de las zonas peligrosas o de la costa.

- Las derrotas no deben trazarse siguiendo las sinuosidades de la costa, ya que de esta forma se gana poco camino y en cambio podemos encontrar graves peligros.

- Es necesario tener suficiente área de maniobra por estribor, para el caso de cruce con otro buque.

- Se deben evitar las zonas sin información hidrográfica de la carta, o sea aquellas que no tienen señaladas las profundidades, especialmente las próximas a lugares de bajo fondo o de fondos irregulares.

- Se deben evitar las zonas donde el fondo es muy irregular y sembrado de bajos, porque puede existir alguno no conocido, a menos que las profundidades sean numerosas y regulares.

- No se debe pasar sin necesidad la isobata de los 20 metros.

- Es conveniente navegar a una distancia de la línea costera que nos permite observar con claridad las señales, luces y otros puntos que nos sirvan de referencia para obtener la posición del buque de forma continua y exacta.

- Cumplir las normas y regulaciones establecidas para la navegación a través de los Dispositivos de Separación de Tráfico Marítimo.

- Leer atentamente las observaciones y advertencias que se anexan en las cartas náuticas.

Para el trazado de la travesía en las cartas náuticas se procederá de la siguiente forma:

- A partir del punto inicial se trazarán consecutivamente los rumbos que componen la derrota planificada, anotando al inicio de cada uno la hora oficial y la fecha en forma de quebrado.

- Sobre cada rumbo se anotará su valor (en grados) y la velocidad (en nudos) prevista y por debajo la distancia (en millas) calculada en la carta.

- En las posiciones de los cambios de rumbo y de carta se señalará la marcación verdadera y distancia

en millas con relación a un punto de referencia común , cuando las condiciones lo permitan; en caso contrario, se anotarán las coordenadas geográficas del lugar.

Al trazar los rumbos, principalmente en las zonas peligrosas, es necesario tener presente:

- Las recomendaciones de los derroteros, descripciones existentes, informes de los prácticos, etcétera.

- Que los mismos deben pasar por fuera de las líneas isométricas de seguridad trazadas en las cartas y su aproamiento debe coincidir en todo lo posible con enfilaciones naturales o artificiales que sean visibles.

- Que los cambios de rumbo se realicen por puntos de referencia bien determinados y que permitan situar el buque por métodos visuales y radar con la exactitud necesaria.

- La influencia del abatimiento, la deriva, el diámetro táctico del buque y su inercia en los cálculos de navegación.

El resultado de los cálculos realizados se emplea en la confección del plan de navegación, el cual se incluye en el plan gráfico y cuyos datos se anotan en el cuaderno de planes de navegación según las instrucciones que en él aparecen. Un ejemplo del modelo de este plan se muestra en la tabla 4.6.

Sobre la base de estos datos se calcularán las reservas necesarias para el período de navegación (combustible, víveres, agua, etcétera) y las necesidades de reabastecimientos para cada etapa de navegación.

Los cálculos realizados sobre la base de la derrota previa particular orientan al oficial navegante en el orden de su trabajo durante la navegación y son elementos fundamentales para garantizar la misma.

PLAN DE NAVEGACIÓN. **Tabla 14.5**

N^0	**HORAS**		**RUMBO**	**ESPACIO**	**TIEMPO A VELOCIDAD**			**OBSERVACIONES**
	OFIC.	**OPTVA.**			**12**	**18**	**24**	

El plan de navegación es el documento de planificación que garantiza, mediante el cumplimiento estricto del mismo durante la travesía, la seguridad del buque.

Por lo tanto, los cálculos elaborados en él, solo podrán ser sometidos a correcciones o variaciones, si esto se justifica por situaciones concretas y reales no previstas en la planificación y trazado de la derrota previa particular y solo con autorización del jefe que los aprobó por decisión del comandante del buque.

c) La preparación de las cartas náuticas de la zona de travesía se realiza con el objetivo de facilitar el trabajo del navegante en el mar y aumentar la seguridad de navegación.

Esta preparación consiste en la representación en las cartas náuticas de construcciones gráficas y la realización de anotaciones o su puntualización, en base a los cálculos y el estudio realizado.

Las cartas náuticas se preparán simultáneamente al trazado de la derrota previa y estudio detallado de la travesía.

La preparación de las cartas náuticas incluye:

- La actualización de la variación magnética existente en la zona de navegación sobre la base de los datos de la carta o bien utilizando las cartas magnéticas especiales.

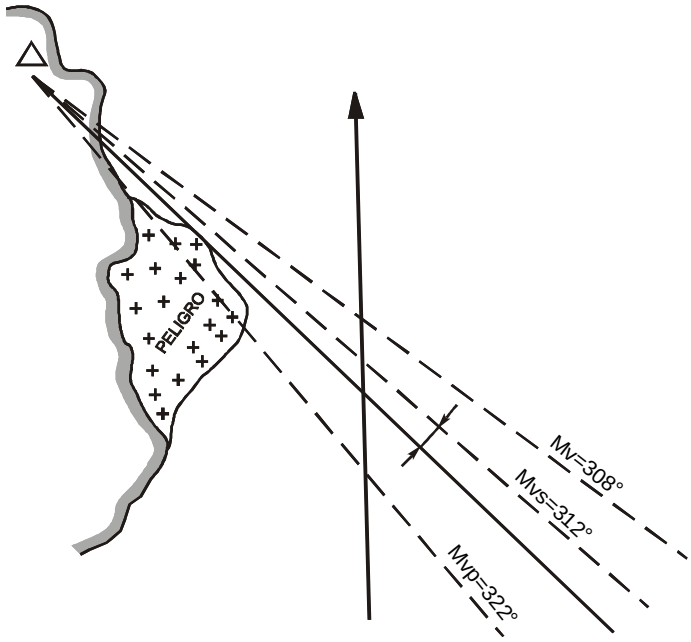
- Los nuevos datos y la fecha a que corresponden se anotan a lápiz al lado de los existentes en la carta.

- Resaltar en color rojo las zonas de profundidades peligrosas, contorno de líneas isobáticas y líneas de seguridad que no debe rebasar el buque, bajos aislados, arrecifes y todo aquello que pueda representar un peligro para la navegación.

- Es recomendable además, resaltar las líneas isobáticas que puedan utilizarse, mediante el empleo del sondador, para la determinación de la posición. Este aspecto tiene especial importancia cuando se navega por fondos, donde existen variaciones bruscas de las profundidades. Estas líneas isobáticas en la carta deben destacarse con color azul.

- El trazado en la carta de distancias, marcaciones y ángulos que indiquen los límites de seguridad en la navegación por aguas peligrosas. Sobre dichos trazados se anotarán los valores verdaderos de los mismos.

Marcación de seguridad, se trazan a partir de puntos de referencia notables en la costa y que estén representados en la carta, ya sean aislados o que formen enfilaciones artificiales o naturales, un ejemplo es mostrado en la figura 387.



Mvs - Marcación verdadera de seguridad
(Mvs = Mvp_{Lim} + m).

Mvp - Marcación verdadera peligrosa.

m - Error cuadrático medio de la marcación.

Mvp_{Lim} - Marcación verdadera peligrosa límite

Fig. 387 Marcación de seguridad

Distancias de seguridad, se trazan a partir de puntos notables de la costa; mediante segmentos de circunferencias que deben encerrar los peligros que queremos evitar, un ejemplo es mostrado en la figura 386.

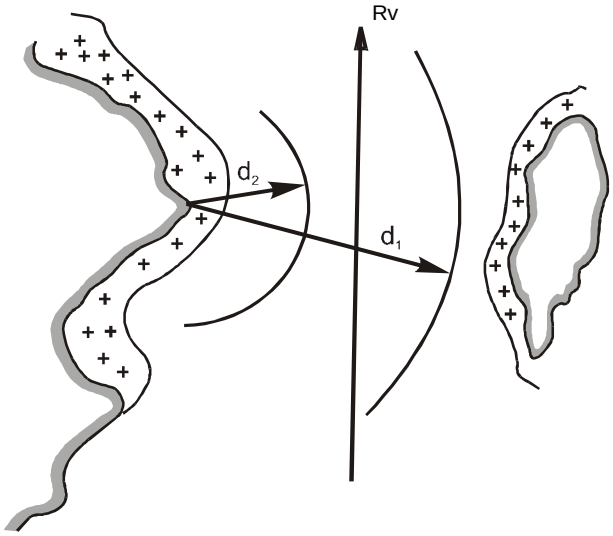
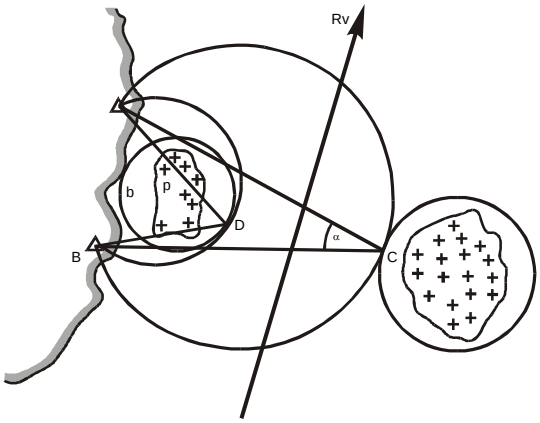


Fig. 388 Distancia de seguridad

Ángulos horizontales y verticales de seguridad, se trazan a partir de puntos notables representados en las cartas mediante la resolución de los cálculos para el trazado de los ángulos, un ejemplo es mostrado en la figura 389. y 390.



$\beta > Ahs > \alpha$

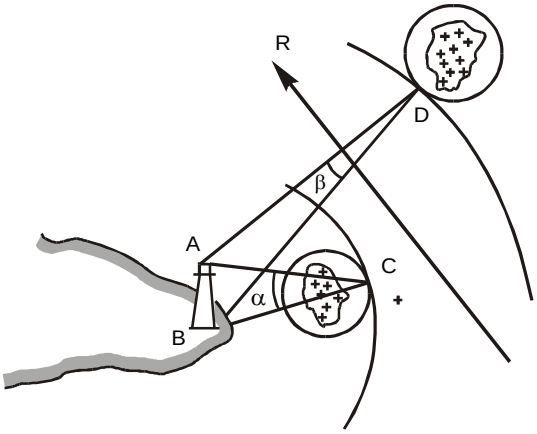


Fig. 389 Ángulo horizontal de seguridad (Ahs) **Fig. 390 Ángulo vertical de seguridad (Avs)**

El oficial de navegación debe además, tener presente que al trazar los rumbos por lugares peligrosos, se necesita tener en cuenta la exactitud requerida para navegar por dicha zona, que depende de los equipos y medios de navegación del buque, el cubrimiento cartográfico existente y las condiciones de navegación. Por ello deberá calcularse el error cuadrático medio en la exactitud de la posición y trazar este en la carta de forma tal que indique la franja por la que debe moverse el buque.

-Trazar las distancias de visibilidad de los faros, lugares o marcas notables, mediante arcos de circunferencias calculadas teniendo en cuenta la altura del ojo del observador en el buque.Cada luz debe ser estudiada en particular para determinar si su visibilidad está determinada por la potencia luminosa o por su altura.Si al trazar los segmentos de circunferencias, estos se cruzan, se deben diferenciar entre sí mediante el trazo de líneas continuas, discontinuas o de puntos.

Cuando en la carta no se encuentran indicadas todas las características de las luces, las mismas se complementarán extrayendo los datos de los Libros de Señales Marítimas (LSM) u otras publicaciones. Para mayor seguridad, se comprobarán las características de los LSM que aparecen en las cartas con los datos de las publicaciones y en caso de divergencias, se tomarán, como confiables los que aparecen en los documentos más recientes.

-Señalar los sectores donde se garantice la determinación de la posición por radiofaros, que pueden ser utilizados por sus características.

Para ello se trazará el arco del alcance del Radiofaro (RF) y junto a la señal se anotarán los datos fundamentales de la siguiente forma:

En el numerador la abreviatura que indique si es marítimo o aéreo -Radiofaro Naval (RFN) o Radiofaro Aéreo (RFA) - y el número de la señal que corresponde al libro de radioseñales y en el denominador se anotará el indicativo de transmisión, frecuencia y el alcance efectivo en millas. Ejemplo:

$$\frac{\text{RFA - 319}}{\text{ZZB - 396kHz - 300M}}$$

Si en la carta náutica aparecen varios radiofaros en un mismo grupo (frecuencia), deben colocarse de un mismo color, a fin de distinguirlos de los demás.

-Elegir y señalar en la carta los puntos de referencia notables, ya sean fáciles de identificar, con el objetivo de poder determinar con prontitud y con la exactitud requerida la posición del buque, ya sea por observaciones visuales o por radar. También deben ser consideradas las boyas, balizas u otras señales que puedan escapar a quien estudia la carta sin ayuda del derrotero y una lupa, sobre todo si son señales no lumínicas.

-Este elemento tiene mayor importancia durante la recalada y entrada a puerto, navegando por canales estrechos, zonas peligrosas, en los fondeaderos, etcétera.

-Determinar las horas de pleamar y bajamar para las diferentes zonas de interés y anotarlas a lápiz en forma de tablilla al lado de las mismas, de modo que nos sirva para conocer el movimiento de las corrientes de mareas y garantizar una cantidad de agua mínima bajo la quilla.

Tabla 14.6

CORRIENTES DE MAREA ZONA O PUERTO:		
00:00	250,0°	5,5
01:00	250,0°	3,12
02:00	-	-
03:00	-	-
04:00	070,0°	3,3
05:00	070,0°	5,2
06:00	070,0°	3,1
07:00	070,0°	1,2
08:00	-	-

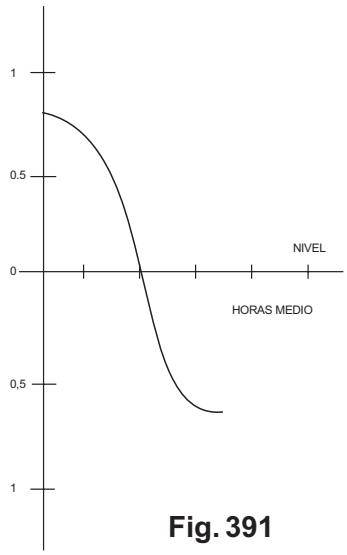


Fig. 391

Se deben trazar además, cerca del rumbo, la dirección y velocidad de las corrientes permanentes en la zona. Al navegar en aguas poco profundas con corrientes de marea se debe confeccionar el gráfico del cambio del nivel del agua por tiempo.

-Señalar en la carta las regiones prohibidas a la navegación a través de la derrota planificada (polígonos donde se efectúan prácticas de tiro, ejercicios militares, zonas especiales de pesca, etcétera), señalando el área, las fechas y horario de prohibición.

-Señalar sobre los rumbos calculados, los puntos en los cuales deben hacerse los cambios de la tensión eléctrica de los enrollados del sistema desmagnetizador, en aquellos buques que lo poseen.Los datos serán calculados sobre la base de las instrucciones especiales existentes al efecto, relacionadas con la latitud magnética y el aproamiento del buque en un momento dado.

-Trazar mediante una línea los límites de las aguas territoriales de los países extranjeros que se encuentran a lo largo de la derrota.

La derrota debe ser trazada a una distancia (D) de la costa igual o mayor a la suma del valor de las aguas territoriales (d), más el error cudrático medio de la posición del buque (M) que se obtenga de acuerdo a las características de la zona navegación y los Medios de Señalización Marítima axistentes, más 2 millas.

Se muestra un ejemplo en la figura 392.

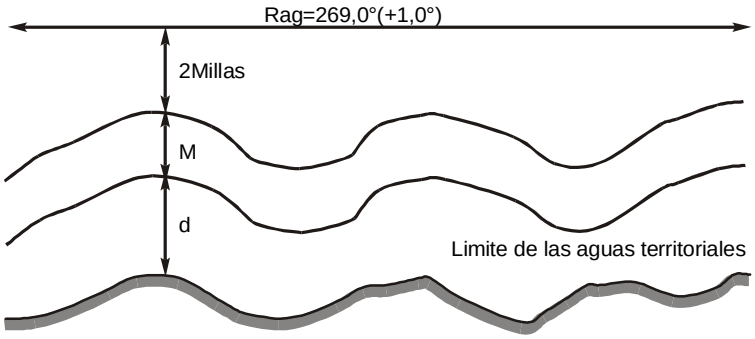


Fig. 392 Trazado de la derrota considerando el valor de las aguas territoriales, el error cuadrático medio de la posición del buque más un incremento de 2 millas

D = d + M + 2 Millas

d) Elaboración del plan gráfico de la travesía.

El plan gráfico de la travesía tiene como objetivo representar gráficamente en la carta náutica, la idea general de la planificación y organización de las tareas o misiones que deberán asegurarse durante la navegación.

Este plan permitirá que en los buques y las Empresas de Navegación se pueda llevar un estricto control sobre las actividades principales que se deben realizar de acuerdo a la tarea planteada.

El plan gráfico de la travesía comprende: la parte gráfica, la leyenda escrita y las tablas que corresponden a las medidas previstas para garantizar la navegación y las tareas encomendadas.

14.3. Preparación de los equipos e instrumentos.

La preparación de los equipos e instrumentos constituye un aspecto importante dentro de la preparación del buque para la travesía, ya que de ella depende en gran parte la exactitud de la navegación.

Los sistemas, equipos e instrumentos de navegación existentes no son perfectos, sus indicaciones generalmente contienen errores debido a diversos factores (constructivos, externos, etcétera). Estos errores influyen en la exactitud de la navegación y en ocasiones son considerables por eso es necesario determinarlos y compensarlos, reduciéndolos al mínimo.

Los elementos principales que incluye la preparación de los equipos e instrumentos son:

a) La compensación y determinación del desvío residual de los compases magnéticos y giromagnéticos.

En aquellos buques que tienen enrollados desmagnetizadores, se determinará el desvío electromagnético con los enrollados conectados y desconectados.

b) Comprobación de los parámetros del girocompás, la alineación de los repetidores (babor y estribor con el plano diametral del buque) y la determinación de la corrección del equipo.

c) Determinación de los elementos evolutivos (diámetro táctico, inercia, correspondencia entre las revoluciones de las máquinas y la velocidad verdadera de navegación) y de la influencia de los factores exteriores sobre el buque (abatimiento, deriva).

d) Regulación y determinación del error instrumental (Δ %) de la corredera.

e) Compensación y determinación de radiodesvío.

f) Comprobación y regulación del sondador.

g) Comprobación del sextante, su regulación y determinación de la corrección de índice.

h) Revisión y comprobación de los relojes y segundómetros.

i) Determinación de la corrección del Radar (ΔR) en cada escala de trabajo, así como su error en marcación.

j) Revisión del estado y funcionamiento del resto de los instrumentos que se utilizan como ayuda a la navegación.

Estas son en general las actividades dirigidas a garantizar la preparación del buque para la travesía en lo referente a la especialidad de navegación, pero ello no limita que se puedan tomar otras medidas con este propósito.

14.4 Control de la derrota durante la navegación

El oficial navegante llevará en la carta náutica mediante construcciones gráficas y simultáneamente se realizarán las anotaciones correspondientes en el Cuaderno de Guardia de Navegación, de acuerdo a las instrucciones del mismo.

Es obligatorio para todos los buques sin excepción, llevar la derrota cuando naveguen.

La derrota se llevará en forma minuciosa, con continuidad y exactitud a fin de tener en todo momento los elementos necesarios sobre la posición del buque.

El trazado de la derrota comienza a llevarse en la carta desde el momento del desatraque y finaliza en el momento de la llegada al punto de destino.

El oficial navegante llevará ininterrumpidamente la estima gráfica del buque sobre la derrota previa particular trazada en la carta.

La estima debe llevarse adelantada ("por la proa") para evitar ser sorprendidos por situaciones o peligros inesperados.

La posición del buque se controlará periódicamente, determinándola por diferentes métodos que se comparan entre sí y con la estima gráfica.

Durante la navegación costera (cerca de la costa o lugares peligrosos). El oficial navegante determinará la posición del buque, no menos de una vez cada 15 minutos.

Navegando fuera de la visibilidad de la costa y lejos de los lugares peligrosos, la posición se determinará:

- a velocidades menores de 12 nudos, cada una hora;

- a velocidades mayores de 12 nudos, cada media hora.

Estos plazos deben disminuirse cuando la condiciones de navegación (condiciones hidrometeorológicas, velocidad del buque, etcétera) y las características de la región así lo aconsejen.

Al navegar en aguas restringidas, estrechos, cayerías, así como dentro de puerto, el oficial navegante llevará la derrota en las cartas náuticas de escala grande o punto mayor y recomendará al Capitán los regímenes de marcha y rumbos. **En estos casos la posición del buque se determinará constantemente por los métodos más rápidos y seguros con que se cuente.**

Durante la navegación el Capitán del buque es quien designa el rumbo y velocidad a ejecutar y nadie puede cambiar lo dispuesto, excepto en situaciones en que peligre la integridad del buque y su tripulación y no haya tiempo para pedir autorización, en cuyo caso se procederá e informará de inmediato al mismo.

El oficial navegante (oficial de guardia de navegación) informará al Capitán del buque, con tiempo de antelación los cambios del rumbo y velocidades.

Cuando este tiempo no se designa de antemano por el Capitán, se establecerá:

- Primer informe: 5 minutos antes

- Segundo informe: 1 minuto antes

- Tercer informe: al comenzar la maniobra

El Capitán del buque, tiene la obligación de informar al oficial navegante (oficial de guardia de navegación), todos los cambios de rumbos y regímenes de trabajo de las máquinas que se produzcan.

El Capitán del buque controlará sistemáticamente el trabajo del oficial navegante durante la navegación y comprobará periódicamente la posición del buque, realizando las anotaciones correspondientes en el CGN.

Cuando la posición obtenida en el buque sea dudosa o sea imposible precisarla, el oficial navegante informará de inmediato al Capitán.

Al navegar por lugares peligrosos o cerca de éstos, el Capitán ordenará disminuir a mínima el régimen de la instalación energética propulsora y tomará las medidas de precaución necesarias. Cuando no hay seguridad en la posición del buque, si las condiciones lo permiten, se pararán las máquinas para precisar la posición.

14.5 Navegación en condiciones meteorológicas desfavorables.

En el cumplimiento de las tareas por los buques de la Marina (de Guerra, Mercante y de Pesca) se tendrá en cuenta el análisis de las condiciones meteorológicas, y qué influencia pueden ejercer los fenómenos hidrometeorológicos que se produzcan, los cuales en ocasiones por su magnitud pueden conducir no sólo al incumplimiento de las misiones, sino incluso a la pérdida total del buque.

La situación hidrometeorológica en los mares adyacentes a Cuba se caracteriza por frecuentes cambios en el estado del tiempo, cuyo pronóstico se hace difícil en ocasiones.

Por estas razones la navegación de los buques debe realizarse prestando máxima atención a los partes del tiempo, avisos ciclónicos y los cambios de la situación hidrometeorológica, que pueden ser obtenidos por partes especiales y las observaciones de a bordo.

1. Medidas de seguridad para navegar en condiciones meteorológicas desfavorables.

Durante la preparación para la salida al mar del buque y la navegación en condiciones meteorológicas desfavorables, para garantizar la seguridad de la navegación, es imprescindible un estricto cumplimiento de las medidas de seguridad que se plantean a continuación:

a) En la preparación del buque para la navegación debe comprobarse:

- El estado de los medios técnicos, en especial los de navegación, comunicaciones, radiolocalización, instalaciones energéticas, sistemas contra incendio y achique.

- El completamiento con personal, reservas de todo tipo, medios de control de averías y señales de emergencia.

- La correcta estiba de todos los pesos a bordo y su fijación, para evitar corrimiento durante la navegación.

Antes de salir al mar el Capitán verificará además que se haya recibido el parte del tiempo y el pronóstico para todo el tiempo de travesía e impartirá las instrucciones necesarias a la dotación sobre la navegación y su seguridad.

b) Durante la navegación:

Al recibir una advertencia, sobre un temporal u otro fenómeno hidrometeorológico peligroso para el

buque o al notar un cambio brusco de la situación el Capitán deberá:

- Controlar a través del Primer Oficial la correcta estiba y fijación de los medios y la carga a bordo.

- Controlar la hermeticidad de todas las puertas y escotillas que garanticen una buena estanqueidad del buque.

- Preparar los puestos de dirección del buque en caso de averías.

- Comprobar las comunicaciones interiores y en especial con el departamento de máquinas y el timón de respeto, así como con el mando superior.

- Mantener el control sobre la posición del buque y su estado.

- Alertar a la tripulación e impartir instrucciones sobre las medidas de seguridad.

- Analizar la situación hidrometeorológica y teniendo en cuenta las características del buque, el estado de las máquinas, el casco y los medios técnicos. Decidir (si no ha recibido indicaciones del mando superior) si busca abrigo, continúa la navegación o evade el área de peligrosidad.

Una vez tomada la decisión el Capitán debe:

- Hacer las anotaciones en el cuaderno de guardia de navegación e informar.

- Organizar la observación periódica sobre el estado del tiempo y anotarlo en el cuaderno de guardia de navegación.

- Poner en disposición los medios radiotécnicos de observación y las brigadas establecidas.

c) Durante la navegación en condiciones meteorológicas complejas el Capitán está obligado a:

- Elegir el rumbo y la velocidad más favorable para capear el temporal.

- Controlar personalmente la exactitud de la navegación, exigiéndole al navegante una buena estima y el máximo aprovechamiento de los auxilios a la navegación y los medios técnicos.

- Controlar que se realicen periódicamente la revisión de los compartimientos y sistemas del buque.

- Controlar el relevo de la guardia de navegación y la impartición de las indicaciones para el turno de guardia.

- Mantener una permanente observación con todos los medios con que cuenta el buque.

Durante la navegación en condiciones meteorológicas desfavorables al entrar a puerto y navegar en su interior hacer uso, con reserva y precaución, de los medios de señalización marítima flotantes, ya que estas señales pueden haber sido corridas de su estación (posición) por la marejada.

2. Fondeo en condiciones meteorológicas desfavorables.

Selección del punto de fondeo

Los puertos o lugares de posible abrigo en mal tiempo se seleccionan durante la planificación de la travesía y siempre que sea posible deben reunir las siguientes características:

a) poseer buenos fondeaderos, muelles o espigones que garanticen una estancia segura del buque;

b) estar señalizados;

c) ser un lugar conocido por el Capitán.

Cuando las características del puerto o del fenómeno meteorológico no permitan el atraque, debe seleccionarse el fondeadero más favorable, teniendo en cuenta que la principal exigencia que debe cumplir el mismo es asegurar la seguridad del fondeo.

Para garantizar la seguridad del punto de fondeo es necesario considerar: el área de maniobra, la profundidad del lugar y el tipo de fondo, la protección al viento, las corrientes existentes y la existencia de MSM efectivos.

3. Recomendaciones para el fondeo.

Al fondear el buque durante el mal tiempo deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones:

- La mayor parte del área de maniobra debe quedar a sotavento (a popa, ubicación del propulsor).

- **E**l **área de fondeo** se considera adecuada si el radio de la misma es igual a:

$R = L + L_c + \Delta L + Mmáx$

R - Radio de fondeo

L - Eslora del buque

L_c - Longitud de cadena del ancla filada

ΔL - Cantidad adicional de cadena del ancla que se puede filar si empeoran las condiciones del viento.

Mmáx. - Error máximo posible en la determinación de la posición del buque.

Las maniobras para el fondeo se deben realizar a barlovento de la posición de fondeo, y al fondear se pondrá proa al viento o se fondeará el ancla con poca estrepada atrás.

La estrepada atrás debe ser poca para evitar un socallazo fuerte que pueda virar el ancla, hacerla garrear o faltar, complicando la maniobra.

- **El largo de la cadena al fondear**, como norma general, no debe ser inferior a 5 veces la profundidad, debiendo tener en cuenta el peso del ancla en el agua, el coeficiente de agarre tomando como base el tipo de ancla y de fondo, la altura del escoben al fondo, la eslora del buque y las condiciones hidrometeorológicas reinantes entre otros aspectos.

A mayor largo de cadena filada es más seguro el fondeo, ya que una gran catenaria disminuye los tirones bruscos sobre el ancla y la tensión sobre el arganeo, se hace más constante y paralela al fondo.

- La profundidad mínima a fondear debe tener en cuenta el calado, la altura máxima de las olas y la reserva mínima de profundidad bajo la quilla (para fondo de buen tenedero se considera de 1 - 2 metros; para fondo de arrecife como mínimo 3 metros).

- El tipo de fondo a seleccionar para el fondeo debe ser preferiblemente de arcilla o fango duro; en su defecto utilizar fondos de arena con lino.

- El relieve del fondo debe ser plano, si tiene declive debe fondearse de forma tal que la mayor profundidad quede a barlovento (hacia proa) lo cual garantiza un mejor agarre del ancla.

- Durante la maniobra de fondeo el empleo de las máquinas debe hacerse, solo cuando sea imprescindible, manteniendo un régimen de revoluciones constante y de forma que no varíe el aproamiento del buque, ni se anule la tensión de la cadena.

Si con un ancla no es suficiente, pueden fondearse dos, perpendicularmente al viento y a barba de gato, fondeando primero la de barlovento y después la de sotavento.
Después de fondear el primer oficial debe:

a) Determinar la posición exacta del buque.

b) Elaborar un esquema del punto de fondeo donde represente las profundidades alrededor del buque, los puntos de referencia más convenientes y los vientos y corrientes reinantes.

c) Realizar las observaciones hidrometeorológicas.

d) Realizar las anotaciones establecidas en el cuaderno de guardia de navegación.

e) Informar al Capitán el cumplimiento de las tareas antes expuestas.

4. Guardia de fondeo

El Capitán una vez puntualizada la situación, ordena establecer la guardia de fondeo con el objetivo de garantizar la detección inmediata del garreo del ancla empleando los métodos siguientes:

a) Manteniendo la observación sobre el ancla;

- Si la cadena se tensa y se afloja con frecuencia puede significar que el ancla está garreando alternativamente.

- Si la cadena se mantiene floja se debe a que el ancla garrea ininterrumpidamente.

- Si no presenta tensión alguna es que ha faltado la cadena o cable del ancla.

b) por las marcaciones a tierra;
- Si las marcaciones de los puntos en tierra se mueven a proa del través, puede ser un índice de que el ancla garrea.

- Es preciso no confundirse con la variación de las marcaciones durante el borneo.
c) por enfilaciones naturales;

- Por las enfilaciones naturales en marcaciones cercanas al través y mantener la observación sobre ellas (este método es más preciso que el de las marcaciones y no necesita instrumentos para la medición).

d) observando los movimientos del buque;

- Generalmente cuando un buque garrea, disminuye notablemente el borneo y el campaneo.

e) mediante un escandallo;

- Al dejar caer un escandallo por la banda, se podrá apreciar la dirección del movimiento del buque por el lugar de donde llama el escandallo. Esto debe hacerse periódicamente a intervalos breves.

- La medición de la profundidad con este instrumento, también aporta datos de interés.

f) determinación de la posición del buque;

- En correspondencia con la situación existente del buque, se realiza continuamente, empleando todos los métodos posibles.

g) empleo del radar y el sondador acústico.

- Por variaciones de distancia y cambio de profundidad.

Todos estos métodos para determinar cuando garrea el ancla deben emplearse de forma combinada para evitar conclusiones erróneas.

Mientras el buque está fondeado debe estar listo para afrontar cualquier imprevisto, para lo cual debe preverse:

- Estar listo para levar urgentemente; largar la cadena o fondear la segunda ancla.

- Mantener funcionando el timón, el indicador de rumbo (girocompás), el sondador y el radar.

- Mantener listas las máquinas para el arranque inmediato y los motoristas en sus puestos de combate.

- Tener los medios contraincendios, de control de averías y achique listos.

La guardia de fondeo una vez establecida velará por el cumplimiento de las recomendaciones planteadas.

La composición de las brigadas de guardia estará en correspondencia con el libro de organización del buque y los cambios que se produzcan en la situación.

Las medidas a tomar cuando el ancla garrea o falta la cadena están en dependencia de la situación real existente.

Para tomar la decisión más acertada ante las situaciones que se presenten, el Capitán debe tener un profundo conocimiento de las características marineras de su buque, de la meteorología náutica y de las medidas antes expuestas.

El descubrimiento de América, los Grandes Viajes y su influencia en el desarrollo de la Navegación.

A finales del siglo XV, España y Portugal se encontraban en un momento histórico propicio para grandes empresas y aventuras.

Los resultados no se hicieron esperar y cristalizaron en forma del más grandioso descubrimiento de todas las épocas, que independientemente de su transcendencia histórica y universal, impulsaría definitivamente a la navegación, dándole su verdadera categoría de elemento primordial del comercio y relación entre los pueblos.

El 12 de octubre de 1492 Cristóbal Colón descubre tierras de lo que hoy es América y regresa a España el 15 de marzo de 1493, realizando posteriormente otros tres viajes, en los que explora y toma posesión de nuevas islas y territorios.

En el año de 1500 una flota de 13 navíos, al mando del Alférez Cabral, zarpa de Restelo con idéntico objetivo, pero a causa del mal tiempo arriba a las costas de Brasil, y toma posesión de aquellas tierras, compartiendo así con España el total dominio del nuevo mundo, y después prosigue el viaje, .

El coronamiento de todas estas empresas y otras muchas realizadas, culmina con la vuelta al mundo iniciada el 20 de Septiembre de 1519 por Fernando de Magallanes al mando de 5 naves (Trinidad, La Concepción, San Antonio, Santiago, La Victoria) y terminado por una sola, La Victoria, el 7 de Septiembre de 1522, capitaneada por Juan Sebastián Elcano que asumió el mando de la expedición luego de la muerte del primero a manos de los indígenas en el islote de Mactán, junto a la isla de Cebú. Este viaje, navegando hacia occidente, comprobó definitivamente la esfericidad de la tierra y abrió nuevos caminos al comercio.

Edimar

Agencia de Cartografía Náutica