Càlcul de la longitud sense rellotge

Autor:
Data de publicació: 24-08-2026

Càlcul de la longitud sense rellotge

La determinació de la longitud geogràfica a la mar va ser un dels reptes tècnics més grans de la història de la navegació. Abans que els cronòmetres de precisió esdevinguessin pràctics al segle XVIII, els navegants ja disposaven de diversos mètodes astronòmics per calcular la longitud, que van permetre als pilots ibèrics navegar amb precisió per l'Atlàntic, l'Índic i el Pacífic. Aquest article recull els principals mètodes, des de l'eclipsi de Lluna fins a les tècniques de la navegació per latituds, i desmenteix la creença popular que la longitud era indesxifrable abans d'Harrison.

1. Mètode de l'eclipsi de Lluna

El mètode més antic i conceptualment més senzill per determinar la longitud es basa en la simultaneïtat global dels eclipsis de Lluna. Un eclipsi lunar és visible des de qualsevol punt de la Terra on sigui de nit, i els seus moments (inici, màxim i fi) són els mateixos per a tots els observadors, independentment de la seva longitud.

Procediment: L'observador mesura l'hora local (mitjançant l'altura del Sol o d'una estrella) en què es produeix un esdeveniment de l'eclipsi (per exemple, l'inici de la totalitat). Compara aquesta hora local amb l'hora prevista per a aquell mateix esdeveniment a un meridià de referència (com el de l'illa de Ferro o el de Greenwich), que es pot trobar tabulada en efemèrides o almanacs. La diferència d'hores, convertida en graus (15° per hora), dóna la longitud de l'observador.
Ús històric: Cristòfor Colom va utilitzar aquest mètode durant el seu quart viatge (1503-1504) a l'illa de Jamaica. Va predir un eclipsi de Lluna per al 29 de febrer de 1504 basant-se en les taules de l'astrònom alemany Regiomontanus (publicades pòstumament el 1496). Comparant l'hora local de l'eclipsi a Jamaica amb l'hora prevista per al meridià de Nuremberg (d'on era originària l'obra de Regiomontanus), Colom va poder estimar la seva longitud.
Limitacions: El mètode només és aplicable durant un eclipsi, que és un fenomen poc freqüent. A més, l'hora local havia de mesurar-se amb instruments com el quadrant, amb una precisió limitada.

2. Mètode de Ferrer de Blanes i la navegació per latituds

A finals del segle XV, el navegant i cartògraf català Jaume Ferrer de Blanes va descriure un mètode per calcular la distància navegada i la diferència de longitud que suposava un salt qualitatiu respecte a la navegació per estima tradicional.

Context: la Tauleta de marteloio: La navegació medieval al Mediterrani es basava en la Tauleta de marteloio, un mètode d'estima que permetia calcular la distància navegada a partir del rumb (magnètic) i la distància recorreguda (mesurada amb l'ampolleta). Era útil per al cabotatge, però no per a l'oceà obert, perquè depenia de la velocitat estimada i no tenia en compte els corrents.
La innovació de Ferrer de Blanes: En una carta enviada al Cardenal Mendoza el 1493 (trobada dins del llibre Sentències catòliques del diví poeta Dant), Ferrer de Blanes proposa un mètode basat en la mesura astronòmica de la latitud i el rumb navegat. El seu sistema, que més tard s'anomenaria Regiment de llegües o Punt d'esquadria, es fonamenta en un triangle rectangle.

El triangle rectangle de Ferrer de Blanes:

* L'increment de latitud (mesurat per l'altura del Sol o de l'Estrella Polar) és el catet oposat.
* El rumb respecte a l'equador (o a l'est-oest) és l'angle conegut.
* La distància navegada és la hipotenusa.
* La diferència de longitud (apartament o desplaçament est-oest) és l'altre catet.

Així, amb la trigonometria plana, es podia calcular la distància navegada i la variació de longitud sense dependre de l'estima ni de la mesura de la velocitat. Com diu el mateix Ferrer a la carta:

> "No es pot calcular la distància recorreguda navegant en un rumb paral·lel a l'equinoccial (...).
> Si teniu algun dubte [sobre aquest sistema] pregunteu-li a l'Almirall que en sap molt més que jo."

Això demostra que Colom coneixia perfectament aquest mètode, i l'havia d'emprar a la força

3. El Regiment de llegües i l'esquadria

El sistema de Ferrer de Blanes va ser perfeccionat al segle XVI i es va consolidar amb el nom de Regiment de llegües. Rodrigo Çamorano (1585) i Juan Pérez de Moya (1564) el van descriure en els seus manuals de navegació com el mètode per obtenir el punt d'esquadria, en contraposició al punt de fantasia (estima).

Procediment del Regiment de llegües:

1. Es mesurava la latitud per observació astronòmica (altura del Sol al migdia o de l'Estrella Polar).
2. Es coneixia el rumb seguit (per la brúixola).
3. Amb aquestes dues dades, es consultava una taula precalculada (generada mitjançant identitats pitagòriques) que donava directament la distància navegada i l'apartament (diferència de longitud) per a cada grau de latitud.
4. El pilot marcava la nova posició sobre la carta amb el compàs de puntes.

Taula de les 8 quartes (exemple):

Quarta (Rumb)Angle respecte a l'equadorDistància navegada per 1° de latitudApartament / Dif. Longitud

1a quarta
11,25°
1,0196
0,1989

2a quarta
22,50°
1,0824
0,4142

3a quarta
33,75°
1,2027
0,6682

4a quarta (Mestral)
45,00°
1,4142
1,0000

5a quarta
56,25°
1,8000
1,4966

6a quarta
67,50°
2,6131
2,4142

7a quarta
78,75°
5,1258
5,0273

8a quarta (Oest/Est)
90,00°
Infinit (paral·lel)
Sense canvi de latitud

Importància: El Regiment de llegües permetia als pilots operar amb precisió a l'Atlàntic, l'Índic i el Pacífic. Va ser essencial per substituir la cartografia portolana (basada en rumbs i distàncies) per la cartografia per latituds, que era més adequada per a la navegació oceànica.

4. La contribució de Mendoza y Ríos

José de Mendoza y Ríos va publicar el 1797 les seves Tablas necesarias para la navegación, que suposaven una millora substancial en el càlcul de la longitud per distàncies lunars. La seva gran innovació va ser tabular els valors del haversine (semiversinus) i del coversinus per a tots els angles necessaris.

Aquesta tabulació prèvia reduïa dràsticament el nombre d'operacions a bord. En lloc de les 30 operacions aproximades que requerien altres mètodes (com els de Tobias Mayer i Nevil Maskelyne), el sistema de Mendoza y Ríos en necessitava només 7, la qual cosa el feia molt més pràctic i ràpid per als navegants.

5. Per què es van deixar de publicar les taules de distàncies lunars el 1905?

La publicació de les taules de distàncies lunars, essencials per al càlcul de la longitud a la mar, va cessar definitivament l'any 1905. Aquesta fita no es deu a un avenç en la precisió dels cronòmetres, sinó a un canvi tecnològic radical: l'arribada de la radiotelegrafia.

La clau: la sincronització horària per ràdio: El 1901, Guglielmo Marconi va aconseguir transmetre el primer senyal de ràdio a través de l'Atlàntic, des de Poldhu (Cornwall) fins a St. John's (Terranova). Això va obrir la porta a un mètode nou i revolucionari per conèixer l'hora exacta a bord d'un vaixell. En lloc de dependre d'observacions astronòmiques complexes i càlculs laboriosos per obtenir l'hora de Greenwich, els vaixells podien rebre senyals horaris per ràdio des d'estacions terrestres que disposaven de rellotges de precisió. Això permetia sincronitzar els cronòmetres de bord amb una precisió i una regularitat sense precedents.
De Cook a Marconi: Es podria dir que el principi era el mateix que feia servir el Capità Cook al segle XVIII: "corregir de tant en tant el rellotge amb observacions lunars". La diferència és que la ràdio ho feia infinitament més ràpid, precís i disponible en qualsevol condició meteorològica. Un cop la ràdio va permetre sincronitzar els rellotges a bord, les taules

de distàncies lunars van perdre la seva raó de ser. El mètode, que havia estat la via més pràctica per a la longitud durant més de cent anys, va quedar obsolet de la nit al dia per a la navegació pràctica.

6. La "mitja veritat" de Dava Sobel

El llibre de Dava Sobel Longitude (1995) és una obra divulgativa apassionant que narra la vida de John Harrison i la seva lluita per guanyar el premi de longitud amb els seus cronòmetres marins. Amb més de 5 milions d'exemplars venuts, ha creat un relat popular que ha esdevingut un tòpic: "abans de Harrison, no es podia calcular la longitud".

Aquesta afirmació és una mitja veritat que ha calat profundament en l'imaginari col·lectiu i que, malauradament, ha esborrat de la memòria popular segles de navegació astronòmica reeixida. Però a més de ser incompleta, la narrativa de Sobel conté errors de fet i contradiccions internes que la debiliten.

L'error sobre els eclipsis

Al llibre, Sobel afirma: > "Podríen usar-se els eclipsis de les llunes de Júpiter (OK) per a aquest propòsit, o fins i tot els eclipsis solars (FALS) o lunars (OK), ja que aquestes determinacions no es necessiten més que amb una freqüència llunyana."

Aquesta afirmació és científicament falsa. Mentre que un eclipsi de Lluna és visible des de tota la meitat fosca de la Terra i es produeix al mateix instant per a tots els observadors (un fet que els terraplanistes no poden explicar amb el seu model), un eclipsi de Sol és un fenomen molt localitzat. La franja de totalitat d'un eclipsi solar és estreta (d'uns pocs centenars de quilòmetres) i l'eclipsi es produeix a hores diferents al llarg de la Terra. Per tant, els eclipsis solars no serveixen per determinar la longitud perquè no hi ha un instant de referència comú i universal.

La contradicció amb el Capità Cook

La mateixa Sobel, en un altre passatge del seu llibre, cita el Capità James Cook, que en tornar del seu segon viatge (1772-1775) es va desfer en elogis cap al cronòmetre de Larcum Kendall (una còpia del H4 de Harrison). Cook va escriure: > "El rellotge del senyor Kendall (que costa 450 lliures) supera les expectatives del seu més entusiasta defensor, i 'al ser corregit de tant en tant amb observacions lunars, ha resultat el nostre guia més fidel al llarg de les vicissituds dels climes."

Aquesta cita, que Sobel reprodueix, contradiu directament el seu propi relat simplista. Cook no confiava cegament en el cronòmetre; el corregia contínuament amb el mètode de les distàncies lunars. És a dir, el cronòmetre era útil, però necessitava la comprovació periòdica de l'astronomia. Això demostra que, fins i tot després de Harrison, els mètodes astronòmics eren indispensables.

La qüestió de la "triple redundància"

Un altre aspecte que Sobel no esmenta és que, a la pràctica, cap navegant sensat es refiava d'un sol rellotge. Els cronòmetres de l'època eren instruments delicats i cars que podien aturar-se, patir errors o desajustar-se amb els canvis de temperatura i humitat. La pràctica habitual a bord era portar tres cronòmetres (triple redundància) per poder detectar i corregir errors. Si dos rellotges marcaven la mateixa hora i el tercer no, es podia identificar l'error. Aquesta precaució, que Sobel obvia, posa de manifest que la fiabilitat dels cronòmetres no era absoluta i que la verificació astronòmica (o la redundància mecànica) era essencial.

En resum, la "mitja veritat" de Sobel no només és incompleta, sinó que conté errors de fet i es contradiu amb les seves pròpies fonts. La navegació astronòmica no va desaparèixer amb Harrison; va coexistir amb els cronòmetres i va ser essencial per a la seguretat i la precisió de la navegació durant molt de temps.

7. Jaume Joan, Francesc Gali i el càlcul de la longitud al Pacífic

Aquesta història il·lustra perfectament com la recerca de la longitud era un problema global, i com la Corona espanyola finançava missions científiques per resoldre'l, molt abans del cronòmetre de Harrison.

Els seus protagonistes, Francesc Gali i Jaume Joan (o Jayme Juan), són un exemple de la col·laboració entre un navegant expert i un astrònom instrumentalista.

L'expedició de Francesc Gali

Francesc Gali (també escrit Galí), nascut a Sevilla vers el 1539, va ser un mariner, explorador i cartògraf que va fer diversos viatges a les Filipines i al Pacífic.

La ruta del tornaviaje: Al segle XVI, la ruta del tornaviaje, que connectava les Filipines amb Mèxic, era crucial per al comerç de la plata. Gali va millorar la ruta original d'Urdaneta, descobrint un camí més ràpid i segur aprofitant el corrent de Kuroshio, que fluïa cap al nord-est de les Filipines i el Japó.
La hipòtesi de l'estret d'Anián: Basant-se en l'observació d'aquest corrent profund i permanent, de les onades i de la presència de balenes i tonyines (que ell va comparar amb les de l'Estret de Gibraltar), Gali va postular l'existència d'un passatge o estret que separava Amèrica d'Àsia. La recerca d'aquest mític Estret d'Anián va ser una de les obsessions geogràfiques del moment.

La contribució de Jaume Joan

Jaume Joan (o Jayme Juan) era un astrònom, cosmògraf i constructor d'instruments valencià. La seva participació en l'expedició de Gali va ser clau per als objectius científics de la Corona.

L'objectiu de Felip II: El rei Felip II estava molt interessat a determinar amb precisió la longitud de les possessions espanyoles a l'Imperi, com Mèxic i Manila.
El mètode: Es creu que Jaume Joan i Gali van projectar el viatge des de Manila fins a Acapulco per mesurar la longitud de la ruta del Pacífic. Per a aquest propòsit, el cosmògraf valencià va dissenyar i fabricar nous instruments, incloent-ne un de destinat a mesurar la declinació de la brúixola.
Els seus diaris: Malauradament, Jaume Joan va morir de febres durant l'expedició. Les notes del viatge, però, són un tresor. El diari de Gali, on explicava les seves observacions astronòmiques i de corrents, va ser enviat al virrei. Més tard, el manuscrit va ser robat o copiat pel navegant holandès Jan Huygen van Linschoten, que el va publicar a Amsterdam el 1596, convertint el coneixement espanyol en un secret compartit per les potències rivals d'Europa.

Aquesta història demostra que la determinació de la longitud a la mar era un objectiu tècnic i estratègic de primer ordre, i que els navegants i científics espanyols del segle XVI estaven provant mètodes complexos, usant tant l'astronomia (amb instruments de Jaume Joan) com l'observació pràctica de fenòmens naturals (com les corrents marines de Gali), molt abans que les cronologies populars situïn la solució d'aquest problema.

8. Contribucions d'Andrés Ruiz González

Andrés Ruiz González és un investigador i expert en navegació que ha realitzat contribucions significatives a la teoria i la pràctica dels algorismes de navegació.

Cercle d'altura igual: El seu treball sobre el cercle d'altura igual (*Circle of Equal Altitude*) ha proporcionat solucions vectorials per al problema de la intersecció de dos cercles d'altura igual. Aquest problema és fonamental per a la navegació astronòmica, ja que la intersecció de dos cercles d'altura determina la posició del vaixell.
Recta d'altura: També ha treballat en el desenvolupament i la millora dels mètodes per a la recta d'altura, incloent-hi les

tècniques de Marcq St-Hilaire i el mètode de la sàtura de Sumner. Les seves solucions algorítmiques han modernitzat els càlculs clàssics.
Publicacions: Ruiz González ha publicat els seus resultats en revistes especialitzades com el Journal of Navigation de Cambridge, on va presentar una "Vector Solution for the Intersection of Two Circles of Equal Altitude" (2008), que resol el problema de manera elegant i eficient.

9. Fórmula de l'Haversine

La fórmula del haversine (o semiverseno) és una equació fonamental en la trigonometria esfèrica que permet calcular la distància entre dos punts d'una esfera a partir de les seves coordenades geogràfiques. És especialment útil en navegació perquè evita problemes d'inestabilitat numèrica per a distàncies petites, a diferència de la fórmula del cosinus esfèric.

La fórmula s'expressa tradicionalment com: > haversin(?) = sin²(?/2)

On ? és l'angle central entre els dos punts. Per a la distància entre dos punts (?1, ?1) i (?2, ?2) a la superfície terrestre, l'haversine de l'angle central es calcula com: > h = haversin(?2 - ?1) + cos(?1) * cos(?2) * haversin(?2 - ?1)

La distància s'obté llavors com: > d = 2 * R * arcsin(?h), on R és el radi de la Terra.

La tabulació d'aquests valors, com va fer Mendoza y Ríos, simplificava enormement els càlculs de navegació astronòmica.

Vegeu també

Navegació astronòmica
Regiment de llegües
Punt d'esquadria
Història de la longitud
Fórmula de l'haversine

Referències

Sobel, Dava (1995). Longitude: The True Story of a Lone Genius Who Solved the Greatest Scientific Problem of His Time.
Ruiz González, Andrés (2008). "Vector Solution for the Intersection of Two Circles of Equal Altitude". Journal of Navigation, 61(2), Cambridge University Press, 355–365.
Mendoza y Ríos, José de (1797). Tablas necesarias para la navegación.
[Referència a la carta de Ferrer de Blanes al Cardenal Mendoza, 1493].
[Referència a les taules de Regiomontanus, Ephemerides, 1496].
[Referència al diari de Francesc Gali i a la publicació de Linschoten].