

EL GPS ESTELAR

José Luis GUTIÉRREZ SACRISTÁN
Ingeniero de Telecomunicación
Cuerpo de Ingenieros Técnicos de Arsenales
de la Armada

Sergio BORRALLO TIRADO



Introducción



LOS Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS) (1) proporcionan a los marinos los medios más rápidos y precisos existentes en la actualidad para determinar su posición en la mar; sin embargo, debido a la baja intensidad de la señal de radio que llega a los receptores, presentan el inconveniente de que son extremadamente vulnerables frente a interferencias intencionadas (*jamming*) o ataques de suplantación (*spoofing*), lo que está llevando a organismos civiles y militares de todo el mundo a plantearse la necesidad de disponer de sistemas de respaldo acordes a los requisitos modernos de precisión y confiabilidad.

En la búsqueda de sistemas alternativos a los GNSS, en este artículo realizamos un breve recorrido por los diversos procedimientos de navegación empleados desde la antigüedad hasta el presente, lo que nos conducirá a formular varias propuestas basadas en la observación de los astros mediante técnicas electrónicas (que podríamos denominar «GPS estelar»), cuyas prestaciones sometemos a examen frente a otras alternativas.

La navegación tradicional

Históricamente, han existido tres aproximaciones fundamentales, de diferentes naturalezas pero mutuamente complementarias, hacia la navegación marítima: la navegación costera (dependiente de la medición de ángulos de puntos

(1) *Global Navigation Satellite System.*



Octante Hadley perteneciente a Antonio de Ulloa, c. 1740. Precursor del sextante, el octante de reflexión fue presentado por el matemático y astrónomo inglés John Hadley en 1731. La principal novedad del instrumento fue la incorporación de un espejo que permitía superponer de forma estable las imágenes de dos objetos cuya separación angular se deseaba medir (normalmente el horizonte y un astro). Junto con el cronómetro marino, constituyó un avance tecnológico imprescindible para la determinación precisa de la posición en la mar.

(Museo Naval de Madrid)

proceso repetidamente lograremos calcular la posición de la embarcación con una exactitud destacable, limitada únicamente por la distancia entre los puntos de referencia y la precisión de nuestra alidada.

Cuando los marinos decidieron aventurarse en alta mar y la costa dejó de ser visible, se presentó un problema de base: sin puntos notables respecto de los cuales situarse no es posible aplicar las técnicas de la navegación costera. Frente a ello, se divisaron dos soluciones, compatibles entre ellas: la navegación de estima y la navegación astronómica.

notables visibles en la costa), la navegación por estima (tradicionalmente asociada a la brújula, la corredera y el reloj de arena) y la astronómica (más sofisticada que las anteriores, es la que ha vinculado el sextante, el cronómetro marino y los almanaques náuticos a los marinos ilustrados).

Navegación costera

Mientras las embarcaciones permanecían cerca de la costa, existía la posibilidad de situarse a vista de puntos notables. Disponiendo, por un lado, de una carta náutica donde dicho punto notable apareciese representado y, por otro lado, de un instrumento que permitiese medir ángulos aparentes entre dicho punto y el norte o la proa de la embarcación, entonces resulta trivial calcular la línea de demora o marcación de la embarcación. Dicha línea representa el lugar geométrico de las posiciones donde se puede encontrar el buque. Realizando este

Navegación de estima

Esta consistía en llevar un recuento aproximado de la cinemática del buque, esto es, su rumbo, velocidad y tiempo navegado. Por supuesto, esta información no era fácil de procesar cuando los medios y conocimientos de los que se disponía a bordo eran extremadamente rudimentarios. Según la tecnología fue avanzando, se desarrollaron instrumentos cada vez más complejos que permitieron conocer la cinemática del buque de manera más precisa, pero siempre con un inevitable error de considerable magnitud.

El principal inconveniente de esta técnica es que una embarcación en la mar se encuentra fuertemente afectada por elementos externos (viento, corrientes marinas, etc.) e internos (imprecisiones de los instrumentos de navegación y del propio piloto a la hora de mantener el rumbo), los cuales introducen un error significativo en la estimación de movimiento. Dicho error es además acumulativo, haciendo que la navegación de estima solo sea viable durante relativamente breves intervalos temporales.

Navegación astronómica

La navegación astronómica es el arte de determinar la posición del buque haciendo uso de las posiciones aparentes de los astros visibles, principalmente mediante la medición del ángulo entre el horizonte del observador y el propio cuerpo celeste. Con ese dato y algunos cálculos matemáticos, es posible obtener un círculo de altura, que no es más que un lugar geométrico que contiene, entre sus infinitos puntos, la situación del barco.

Esta idea tan simple e intuitiva cuenta con un indeseable inconveniente, y es que los astros se mueven (aparentemente) de manera continuada alrededor de nosotros. Este hecho insalvable conlleva dos consecuencias: a) que es necesario conocer la posición aparente de los astros para poder situarnos respecto de ellos. Por fortuna, el estudio de la astronomía nos permite predecir con excelente exactitud las posiciones relativas (pasadas, presentes y futuras) de los cuerpos celestes, recoger dichas predicciones en almanaques náuticos y, por tanto, disponer de antemano de las posiciones aparentes de los astros que emplearemos como referencia en alta mar; y b) que debido al continuo movimiento de los astros es necesario (2) conocer el momento exacto en el que se está observando el astro. Como es sobradamente conocido, el desarrollo de un reloj que pudiera ser utilizado de manera fiable a bordo de un buque fue uno de los

(2) Para determinar la longitud, aunque hay técnicas alternativas que permiten aproximar la longitud sin disponer de una hora exacta a bordo —por ejemplo, mediante la observación de ocultaciones lunares—, en la práctica estas carecen de exactitud suficiente.

retos tecnológicos más complicados y apasionantes de la Edad Moderna. Los marinos de antaño, disponiendo, por tanto, de los instrumentos astronómicos necesarios para medir las alturas de astros (el sextante y precursores), de almanaques náuticos que les indicaran las posiciones aparentes de los astros en cada momento, de una hora a bordo suficientemente precisa y fiable, y haciendo uso de diferentes técnicas de cálculo de navegación astronómica, eran capaces de calcular su posición en la mar con un margen de error más que aceptable.

Por supuesto, la navegación astronómica presentaba importantes desventajas que limitaban severamente su uso y efectividad. Además de la propia dificultad de los cálculos, la eficacia de la navegación astronómica se encontraba francamente supeditada a las condiciones meteorológicas. Un cielo cubierto o un mero oleaje fuerte restringían su uso, o al menos disminuían indeseablemente su precisión. Pero, dado que la observación de astros fue la única alternativa para el cálculo de la situación del buque en alta mar durante siglos, la navegación astronómica reinó de manera indiscutible hasta que la tecnología avanzó lo suficiente como para permitir el desarrollo de medios electrónicos de ayuda a la navegación.

La navegación electrónica

Los sistemas electrónicos de navegación modernos se pueden dividir, en términos generales, en tres grandes familias: a) los sistemas de radionavegación con infraestructura emisora terrestre, basados en los mismos principios geométricos que la navegación costera (aunque habitualmente midiendo distancias en vez de ángulos); b) los que emplean satélites artificiales; y c) los sistemas de navegación inercial (en ocasiones complementados con instrumentos gravimétricos, magnetométricos o batimétricos), los cuales van de la mano con la navegación de estima.

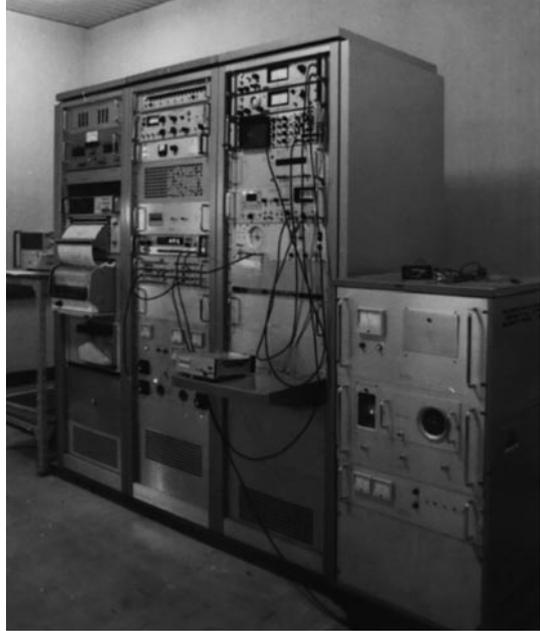
Sistemas de radionavegación de base terrestre

La idea fundamental, en términos generales, de las técnicas de navegación basadas en señales de radio es que permiten «hacer visibles los faros más allá de la costa». Los primeros sistemas de este tipo fueron precisamente instalados cerca de faros, en forma de estaciones emisoras de radio de gran potencia, que permitían medir directamente demoras y marcaciones desde grandes distancias, mucho más allá del alcance visual (3).

(3) Un ejemplo prominente es el conocido como *Very high frequency Omni-directional Range* (VOR). Fue inaugurado en 1946 y llegó a convertirse en el sistema estándar de navegación aérea en todo el mundo.

La siguiente iteración la constituyeron los denominados «sistemas hiperbólicos», basados en el principio de la medición de la diferencia de las distancias entre la embarcación y las estaciones emisoras situadas en tierra (la hipérbola es el espacio geométrico de los puntos cuya diferencia de distancia respecto a dos focos es constante). Estos sistemas son en su funcionamiento totalmente autónomos e independientes de los GNSS, razonablemente precisos y la calidad del posicionamiento que ofrecen no sufre degradación con el tiempo. Además, son difíciles de interferir en comparación con el GPS.

De entre ellos destacamos: el sistema eLoran, muy preciso y actualmente en servicio en Corea del Sur (Son, 2020); su precursor, Loran-C, cuyas estaciones base transmisoras han sido clausuradas recientemente en gran parte del mundo, con las notables excepciones de Arabia Saudí, China e India; y el sistema ruso Chayka, muy similar a Loran-C.



Receptor Loran-C de marca Lorchron y otros instrumentos electrónicos (entre los que destaca un reloj atómico de cesio Ebauches Oscillatom B5000) instalados en el Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA) en 1972. Debido a la estrecha relación entre posicionamiento y cronometría, además de su uso para navegación, la señal Loran-C permitió la comparación diaria de diversas escalas de tiempo con una gran precisión. (© ROA)

Sistemas de navegación por satélite

Los reyes de esta categoría son los GNSS, basados en el principio geométrico de la trilateralización (4) a partir de la medición del retardo de propagación de señales de radio especialmente codificadas, emitidas por varios satélites artificiales dotados de relojes atómicos y situados en órbita terrestre media

(4) Resolución de un triángulo conocidas las longitudes de algunos de sus lados, en contraposición con la triangulación, que depende de la medida de ángulos.

(MEO) (5) o geosíncrona. En este grupo se incluyen el sistema americano GPS, el europeo Galileo, el ruso GLONASS y el chino BeiDou, así como los regionales indio NavIC y japonés QZSS.

Desde el comienzo de la era espacial han existido sistemas de navegación por satélite fundamentados en otros principios diferentes, entre los que destacan los basados en el efecto Doppler, como por ejemplo Transit (6) (disponible entre 1964 y 1996). Estos generalmente empleaban satélites artificiales de órbita baja (LEO) (7), lo que, junto con una mayor simplicidad en el tipo de señales emitidas, permitía ofrecer una mejor resistencia frente a la interferencia electromagnética.

En la actualidad se han desarrollado métodos Doppler similares, como el servicio STL (8) ofrecido por la empresa Satelles empleando señales de los satélites de comunicaciones Iridium; también se está discutiendo la posibilidad de dotar de capacidades similares a otras grandes constelaciones de satélites de comunicaciones situadas en LEO, como OneWeb o Starlink.

Sistemas de navegación inercial

Los dispositivos que emplean acelerómetros lineales y giróscopos para hacer un seguimiento continuo de la posición, orientación y velocidad de una plataforma se conocen como Sistemas de Navegación Inercial (INS), por su dependencia en la primera Ley de Newton o Ley de Inercia.

Estos sistemas son prácticamente inmunes a acciones de sabotaje o ataque externo por su naturaleza autocontenida; sin embargo, debido a la inevitabilidad del ruido instrumental y de los errores sistemáticos que se acumulan con el tiempo, en la actualidad su uso como método de navegación independiente de los GNSS se limita a unas pocas horas (en función de la exactitud requerida) (9), aunque pueden combinarse con cualquier otro sistema que proporcione de forma independiente datos absolutos de orientación, posición o velocidad (10).

(5) *Medium Earth Orbit*. Son las órbitas cuyo período orbital está comprendido entre 2 y 24 horas, con altitudes correspondientes entre 2.000 y 35.786 kilómetros.

(6) También conocido como *Navy Navigation Satellite System* (NAVSAT/NNSS).

(7) *Low Earth Orbit*. Normalmente definidas como aquellas órbitas con un período orbital de 128 minutos o menos, lo que se corresponde con una altitud por debajo de 2.000 kilómetros.

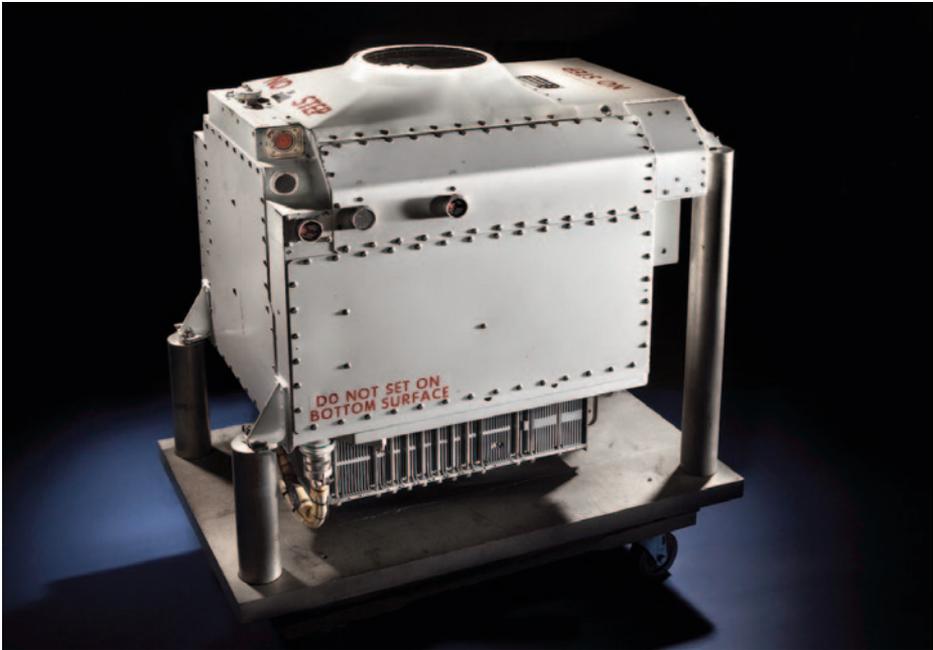
(8) *Satellite Time and Location*.

(9) Las tecnologías empleadas para construir estos sistemas están mejorando constantemente. Avances tales como la interferometría atómica de tipo cuántico es posible que permitan en un futuro próximo garantizar una navegación de precisión durante días de forma completamente autónoma.

(10) Entre los que se incluyen los sistemas batimétricos (basados en la exploración del perfil del fondo marino mediante ultrasonidos), magnetométricos (una versión mejorada de la brújula,

Del sextante al *star-tracker*: ¿el regreso de la navegación astronómica?

Por alguna razón, el uso generalizado de los GNSS ha relegado la navegación astronómica al oscuro baúl de las técnicas consideradas obsoletas (11). Nótese la ausencia en el apartado anterior de cualquier referencia a sistemas electrónicos que aprovechen las técnicas de navegación astronómica. Esta situación es particularmente sorprendente si tenemos en cuenta que desde hace décadas se han empleado Sistemas de Navegación Inercial Ayudados por Astros (CAINS) (12), también conocidos como Sistemas de Navegación Astroinercial (ANS) (13), en



Sistema de navegación Nortronic NAS-14V2, desarrollado en la década de 1960. Dispone, en la misma empaquetadura, de una plataforma inercial y de un dispositivo óptico capaz de obtener secuencialmente referencias angulares precisas de varias estrellas. Ejemplar perteneciente al Museo Nacional del Aire y el Espacio de Washington. (© Smithsonian Institution)

capaz de aprovechar el conocimiento preciso de las anomalías del campo magnético terrestre) y gravimétricos (medición precisa del campo gravitatorio terrestre).

(11) A pesar de que, como bien sabe todo marino, en caso de fallo de los sistemas electrónicos de navegación en alta mar, la dependencia en el sextante, el cronómetro y el almanaque náutico es absoluta, razón por la que no debe menospreciarse la necesidad de dominar su manejo.

(12) *Celestial Aided Inertial Navigation System*.

(13) *Astroinertial Navigation System*.

ciertas aeronaves (14) (su principio de funcionamiento lo explicaremos unos párrafos más adelante), o que los satélites artificiales, casi sin excepción, disponen una versión electrónica, autónoma y autocontenida del sextante, conocida como *star-tracker* (seguidor o rastreador de estrellas) (15).

Antes de plantear algunas aproximaciones técnicamente viables para la automatización de la navegación astronómica, es imprescindible enumerar los requisitos generales para el uso de Sistemas de Navegación Astronómica (CNS) (16) en buques de guerra como respaldo en caso de indisponibilidad de los GNSS: a) operatividad en todo momento, independientemente de las condiciones meteorológicas y de la mar; b) disponibilidad global completa en las zonas navegables; c) funcionamiento autónomo, con mínima o nula intervención humana; d) cota de incertidumbre en el posicionamiento garantizada en el orden de pocas decenas de metros (17), que no sufra degradación con el paso del tiempo.

Desgraciadamente, la navegación astronómica por sí sola no permite satisfacer todos estos requisitos. Será necesaria una combinación apropiada de sistemas de naturalezas diferentes para conseguir una solución apta. Para satisfacer el requisito (a), dado que la observación astronómica es críticamente dependiente de las condiciones meteorológicas, todas las propuestas incluirán el empleo conjunto de un INS junto con el CNS, siendo el inercial el agente principal de la navegación en el corto plazo.

A continuación, presentamos varios tipos de sistemas que combinan navegación astronómica e inercial, en orden creciente de complejidad. En los tres primeros casos (A - C) se emplean ciertos tipos de sextantes (18) para, esencialmente, determinar la altura de un número de astros respecto del horizonte. Conceptualmente, esto es equivalente a determinar la posición de la horizontal local respecto del sistema de referencia inercial de las estrellas fijas. Como cada medición está precisamente asociada al instante de tiempo en el que se ha realizado y la forma del geode (19) es conocida con gran precisión, este tipo de medidas permitirá estimar directamente la posición de la nave sobre la superficie

(14) El avión espía *Lockheed SR-71 Blackbird*, en servicio entre 1966 y 1999, disponía de un CAINS/ASN completamente autónomo (Nortronics NAS-14V2). El sistema ha evolucionado continuamente hasta la actualidad, siendo su iteración más reciente el modelo LN-120G (Northrop Grumman), probado en vuelo en 2006.

(15) Este dispositivo consiste en una cámara digital con una construcción mecánica muy estable frente a vibraciones y cambios térmicos, acompañada de un ordenador capaz de identificar y medir con una gran precisión la posición relativa de una o varias estrellas presentes en las imágenes.

(16) *Celestial Navigation System*.

(17) El valor concreto será el que se considere necesario para la navegación segura por canales libres de minas, la utilización segura de la artillería u otros supuestos escenarios.

(18) En principio, sería válido cualquier instrumento óptico que permitiese medir, con gran exactitud, el ángulo comprendido entre dos objetos lejanos ampliamente separados entre sí.

(19) Sobre las masas oceánicas, la superficie del geode coincide con el nivel medio del mar. Uno de los modelos más precisos del geode disponibles hasta la fecha es el EGM2008 (*Earth*

marítima. La posición obtenida mediante el CNS podrá utilizarse únicamente para corregir el error de posición acumulado por el sistema de navegación por estima propio de la embarcación, el cual puede contar con un INS, girocompás, corredera electrónica, etc. En los dos últimos casos propuestos (D - E), la presencia de un INS es imprescindible, empleándose las referencias ópticas de los astros o del horizonte obtenidas por el CNS para compensar la deriva propia del sistema inercial; se pretende así realizar un tipo de recalibración continua en alta mar (Gutiérrez, 2020).

Caso A: uso manual del sextante

En el caso más rudimentario, el buque cuenta con un sistema autónomo que proporciona una navegación de estima con la exactitud requerida durante unas pocas horas. Se toman alturas de astros de manera rutinaria (durante los crepúsculos y al mediodía, manualmente con la ayuda de sextante y cronómetro) y se introducen los datos de las mediciones (sin realizar cálculo ni manipulación alguna) en un ordenador de a bordo que tiene acceso a todos los instrumentos de navegación, incluyendo girocompás, corredera, INS (opcional), estación meteorológica, etc. La algoritmia adecuada se aplica automáticamente para encontrar una solución que satisfaga los márgenes de error del sistema de navegación y los de las mediciones realizadas con el sextante.

Se trata de una solución en apariencia rudimentaria, pero es eficaz y relativamente fácil de desarrollar; de hecho, es la aproximación seguida por el programa STELLA (20), disponible con exclusividad en las embarcaciones dependientes del Departamento de Defensa de Estados Unidos desde hace más de dos décadas.

Caso B: automatización del sextante

Igual que el Caso A, pero la altura de los astros es adquirida por un sextante automático, eliminando la posibilidad de error humano. Las mediciones pueden ser potencialmente más precisas, aunque eso no las libra de su principal fuente de error: la refracción atmosférica. Aun así, estas serán más consistentes y no será necesario tener en cuenta posibles sesgos introducidos por diferentes personas en la adquisición de los datos. Dado que la cronometría de la captura es

Gravitational Model, 2008), elaborado mediante esfuerzos conjuntos internacionales y publicado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial de los Estados Unidos.

(20) *System To Estimate Latitude and Longitude Astronomically*. Programa desarrollado por el Departamento de Aplicaciones Astronómicas del Observatorio Naval de los Estados Unidos. Autores: Kaplan, G. H., Bangert, J., Oliverson, N.

más precisa, se pueden tomar secuencias mucho más largas de datos, potencialmente miles de mediciones, para compensar los errores aleatorios. Durante el día se pueden medir la altura del Sol u otros astros brillantes con filtros adecuados de manera continua. También pueden emplearse cámaras termográficas u otros dispositivos de visión nocturna que faciliten la discriminación del horizonte durante la noche, ampliando el rango de tiempo observable entre los crepúsculos.

Al existir un flujo directo de datos en tiempo real desde el sextante hasta el ordenador de navegación, se puede aprovechar el conocimiento preciso de rumbo y velocidad que proporciona el INS para realizar una agregación y promediado más efectivo (Kaplan, 1995). La gran cantidad de datos acumulados, junto con su mayor fiabilidad, puede hacer disminuir apreciablemente la cota del error de posicionamiento, aunque, en el largo plazo, el factor físico limitante es la incertidumbre de la refracción atmosférica cerca del horizonte.



Ejemplar de vuelo del *star-tracker* multicámara HYDRA entregado por Sodern (empresa filial de ArianeGroup) a la Agencia Espacial Europea (ESA) para su instalación en el satélite Sentinel 3A. Según las especificaciones del fabricante, cada cámara registra 16 veces por segundo la posición de 15 estrellas, proporcionando datos de orientación con una exactitud garantizada de 11 segundos de arco. (© ESA)

Caso C: sextante electrónico mejorado

Igual que el Caso B, pero el sextante es un instrumento fotográfico de campo amplio y realiza una medición directa de la refracción diferencial cerca del horizonte. Esta técnica se basa en el empleo de la propia atmósfera como referencia de la horizontal local (en lugar del agua del océano mediante el horizonte) y es menos susceptible a los errores derivados de la refracción en la zona más cercana al horizonte.

Caso D: recalibración de los giróscopos con ayuda de un star-tracker

Es radicalmente diferente en planteamiento a los casos anteriores. Se corresponde con los CAINS/ANS de uso aeronáutico mencionados anteriormente. No se miden alturas de astros respecto del horizonte; por el contrario, se utiliza un *star-tracker* para determinar (con gran exactitud) la orientación de la plataforma del INS respecto al sistema inercial de las estrellas fijas. Esto permite corregir la deriva del sistema giroscópico, una de las principales fuentes de error en el INS.

Puede funcionar durante todo el día (capturando las estrellas más brillantes con ayuda de filtros ópticos) y la noche, siempre y cuando haya alguna estrella visible. Uno de los desafíos técnicos que presenta es que, desde el punto de vista mecánico, la óptica del *star-tracker* debe ser solidaria con los sensores del INS al tiempo que mantiene visión directa del firmamento (21).

Caso E: observación directa del horizonte en el marco de referencia del INS

Es parecido al Caso D, pero se compara la orientación de la plataforma inercial no respecto a las estrellas fijas, sino al horizonte de mar, lo que permitirá al sistema discriminar con más precisión entre las componentes cinemática (la correspondiente al cambio de posición sobre la superficie de la tierra) y gravitatoria de la aceleración, mejorando aún más las prestaciones del INS. Requieren de un instrumento óptico especializado conocido como «sensor de horizonte» u otra solución óptica alternativa equivalente (22).

(21) Esto hace casi imposible el uso conjunto del *star-tracker* con el INS propio del buque, forzando la necesidad de un INS adicional instalado donde el *star-tracker* tenga una buena visibilidad del firmamento.

(22) Nótese que no existe alternativa posible a la realización de la observación óptica del horizonte si se quieren obtener los beneficios de este método. Cualquier intento de aprovechar un «horizonte artificial» inferido a partir de datos procedentes de instrumentos de navegación por

Un factor muy importante a tener en cuenta a la hora de elegir una u otra configuración de las anteriormente descritas (sin olvidar que estas pueden combinarse libremente en un sistema agregado para aprovechar las prestaciones particulares ofrecidas por cada uno de ellas) es la duración esperada sin servicio GNSS; un apagón de minutos o pocas horas queda cubierto sin problemas por los INS actualmente disponibles en los buques modernos, y los sistemas descritos en los casos D y E permitirían prorrogar estas prestaciones durante unos pocos días. En el caso de pérdida permanente de los GNSS, los sistemas descritos en los casos A - C son la única alternativa, pero están severamente limitados por su poca precisión garantizada, debido a la impredecible variabilidad en la refracción atmosférica cerca del horizonte, a pesar de la aplicación cuidadosa de métodos de corrección.

Un paso más allá: satélites artificiales como puntos notables

Los navegantes contemporáneos tenemos a nuestro alcance unos objetos astronómicos que no estaban disponibles para la inmensa mayoría de las generaciones anteriores: ¡los satélites artificiales! La observación directa de su trayectoria, por medios ópticos, en el cielo nocturno, nos permite determinar la posición del observador, situado en la superficie de la Tierra, siempre y cuando conozcamos con exactitud los elementos matemáticos que describen su órbita.

Geoméricamente, este planteamiento es análogo al de la navegación costera anteriormente expuesto: el satélite artificial constituye nuestro «punto notable» (conceptualmente equivalente a un faro), y las estrellas, situadas en el fondo y sobre las cuales el satélite recorre su trayectoria aparente, nos sirven de referencia para construir una línea de posición, cuya intersección sobre el geoide coincide con la ubicación del observador. La obtención de esta solución exige considerar numerosos aspectos propios de la dinámica celeste y la astrometría (campos de estudio bien consolidados), permitiendo alcanzar incertidumbres extraordinariamente bajas, incluso por debajo del segundo de arco.

Si consideramos la distancia a la que se encuentran los satélites artificiales y sumamos el hecho de que podemos seleccionar los pases más próximos al cénit, la precisión esperada en el posicionamiento se sitúa ampliamente dentro de los requisitos anteriormente indicados. Sin embargo, el planteamiento presenta desafíos técnicos: por un lado, es imprescindible conocer la órbita de los satélites empleados con tanta exactitud como la que deseamos alcanzar en nuestro posicionamiento; por otra parte, los satélites son objetos «fugitivos», es decir, se

estima (incluyendo el INS) negaría el propósito del sensor de horizonte, cuya misión es, precisamente, la corrección del error acumulado en dicha estimación del horizonte.



Traza de un satélite artificial (COSMOS 2510, NORAD ID 41032) sobre fondo de estrellas. La fotografía fue realizada desde las instalaciones del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando con un instrumento con características adecuadas para su uso práctico en el posicionamiento óptico mediante satélites. (Tubo óptico: Celestron RASA 8; filtro: Celestron LPS #93614; cámara digital: QHY174M-GPS; campo visual: $1,61^\circ \times 1,01^\circ$; tiempo de exposición: 30 s; instante de inicio: 2021-11-09T19:39:18+00:00; apuntado: A.R. $00^h 14^m 34^s$, Dec. $+22^\circ 12' 13''$; altura sobre el horizonte: 63° ; distancia al objeto: 16.200 km.). (© ROA)

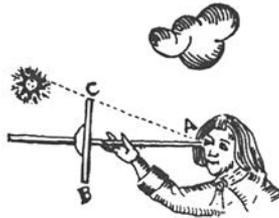
mueven rápidamente sobre el fondo de estrellas, más cuanto más próximos estén al observador, lo que dificulta su observación.

Estas dificultades nos obligarán a emplear instrumentos fotográficos digitales especialmente adaptados a la realización de este tipo de capturas (con la complejidad añadida de que deberán operar en una embarcación en movimiento, expuesta a los elementos) y con la correspondiente capacidad de temporización de las imágenes capturadas respecto a un reloj apropiado (una referencia de rubidio, por ejemplo). También será necesario disponer de una red de observatorios en tierra, encargados de determinar con precisión las órbitas de los satélites a emplear en el posicionamiento y con capacidad para transmitirlos a los navegantes. Cabe mencionar que esta técnica ha sido utilizada con gran éxito anteriormente, pero en el ámbito de la geodesia; por ejemplo, en el Worldwide Geometric Satellite Triangulation Program durante las décadas de 1960 y 1970 (Schmid, 1974).

Conclusiones

Respaldata por siglos de historia, la navegación astronómica es una de las pocas alternativas de las que actualmente disponemos en caso de privación de los sistemas globales de navegación por satélite. Técnica y conceptualmente, existen diferentes aproximaciones (algunas de ellas complementarias) que permitirían la automatización de las observaciones astronómicas y su integración con otros subsistemas de navegación de última generación (por ejemplo, de tipo inercial) para alcanzar conjuntamente prestaciones acordes a los requisitos y expectativas de hoy en día. Entre las diferentes soluciones vislumbradas, cabría destacar las que aprovechan la abundancia de satélites artificiales en órbita terrestre para su uso a modo de puntos notables de referencia, abriendo la posibilidad a un posicionamiento astronómico verdaderamente de alta precisión y completa fiabilidad.

El paso de los tiempos no ha disminuido ni un ápice la potencialidad de los astros para la navegación. Por el contrario, tenemos a nuestra disposición nuevos instrumentos, muchos de ellos procedentes de aplicaciones aeroespaciales, casi listos para su instalación en las plataformas navales; ¿estamos a las puertas del desarrollo de un verdadero «GPS estelar» de uso naval?



BIBLIOGRAFÍA

- GUTIÉRREZ SACRISTÁN, J. L.; BORRALLO TIRADO, S.; CANALS ROS, L. (2020): «Problemática en la integración de los sistemas de navegación inercial de los buques con sistemas de navegación astronómica para redundancia efectiva frente a privación de servicio GNSS». *Actas Del VIII Congreso Nacional de I + D en Defensa y Seguridad (DESEI + D)*.
- KAPLAN, G. H. (1995): «Determining the position and motion of a vessel from celestial observations». *Navigation*, 42(4), pp. 631-648.
- SCHMID, H. H. (1974): «Worldwide geometric satellite triangulation». *Journal of Geophysical Research*, 79(35), pp. 5.349-5.376.
- SON, P. W.; PARK, S. G.; HAN, Y.; SEO, K. (2020): «eLoran: Resilient positioning, navigation, and timing infrastructure in maritime areas». *IEEE Access*, 8, pp. 193.708-193.716.