



EL SISTEMA GLOBAL DE POSICIONAMIENTO Y NAVEGACIÓN POR SATÉLITE

Introducción

GPS son las siglas que corresponden a *Global Position System*, es decir a un sistema global de posicionamiento, mientras que el acrónimo **GNSS** refiere al *Sistema Global de Navegación por Satélite*, como también se lo denomina. Este sistema es el resultado de muchos años de investigación y desarrollo de sistemas cartográficos, determinaciones sobre la forma de la Tierra y del desarrollo de nuevas tecnologías de comunicaciones y procesamiento de información, debiendo destacarse al respecto tanto los satélites como las computadoras involucradas en su funcionamiento. Su éxito se ha basado en que logra cumplir adecuadamente una serie de requerimientos para que la posición y/o la trayectoria de un usuario puedan quedar fácil y exactamente establecidas:

- a. Tener cobertura mundial
- b. Ser capaz de atender a un número ilimitado de usuarios
- c. Ser resistente a las interferencias

- d. Brindar respuestas instantáneamente
- e. Poseer un sistema de coordenadas y un datum común para todos los usuarios
- f. La exactitud en la determinación de la posición no debe degradarse por factores como el cambio en la altitud, la hora del día o la época del año.
- g. Ser independiente de su propia trayectoria (la precisión de cada posición debe ser independiente de las anteriores)
- h. No debe basarse en un punto de partida conocido con precisión o abordar una estación o punto fijo particular para mejorar su exactitud.

Vale la pena señalar que el *GPS* se aproxima bastante al ideal y resulta mucho más exacto (hasta veinte veces más) que la mayoría de los otros sistemas desarrollados con anterioridad. Utiliza el sistema de coordenadas WGS84 y brinda información de velocidad con una precisión en la medida de los tiempos que no había sido alcanzada en los sistemas anteriores.

El sistema se basa en el concepto de triangulación y los cálculos se realizan de modo similar a la técnica de determinación de la localización de un punto por el método de resección utilizando un mapa y brújula, pero utilizando las señales de radio transmitida desde satélites.

Una característica muy importante del sistema es su portabilidad y el hecho de que los receptores NO emiten señales y por lo tanto no existe un número limitado de usuarios simultáneos en función de la saturación de los receptores de las mismas. Por otro lado, al no emitir los equipos señales electrónicas, los usuarios no pueden ser detectados (esto es obviamente de fundamental importancia en su uso militar).

La exactitud de las determinaciones depende en primer grado del modo de uso del sistema, ya sea que se utiliza el **servicio estándar** (Standard Positioning Service, SPS) o el **servicio preciso** (Precise Positioning Service, PPS), estando el uso de este último reservado para el servicio de defensa de los Estados Unidos y quién el mismo determine.

Algo de historia

En los años sesenta la armada americana implementó un sistema de navegación denominado *Transit*, basado en el efecto Doppler sobre las señales

emitidas por el satélite, que aún funciona pero que posee importantes limitaciones, ya que los satélites tienen órbitas bajas y no siempre están disponibles. También por esos años y en forma simultánea la armada y la fuerza aérea de los Estados Unidos comenzaron a desarrollar nuevos sistemas de posicionamiento y navegación (en 2D para el caso de la armada y en 3D para la fuerza aérea). Con el fin de no superponer esfuerzos y costos se resolvió unir ambos programas y de ellos surgió el actual sistema global de posicionamiento.

Si bien el proyecto comenzó a desarrollarse en 1973, las primeras señales fueron transmitidas desde el Satélite de Prueba 2, enviado al espacio en Junio de 1977. El proyecto comenzó con la construcción y puesta en órbita de un primer conjunto de satélites de modo de desarrollar, probar y mejorar el sistema. Luego, con el lanzamiento de un segundo conjunto de satélites el sistema ingresó en la fase de funcionamiento pleno. Simultáneamente con el desarrollo del primer conjunto de satélites se diseñaban y construían los elementos de control y de uso del sistema.

La Federación Rusa se encuentra desarrollando su propio sistema, denominado “GLONASS” y lo mismo hacen la Unión Europea (sistema “GALILEO”) y la República Popular China (sistema BEIDOU).

Secciones del sistema

El Sistema Global de posicionamiento consta de tres sectores o secciones (en inglés *segments*) de características distintivas:

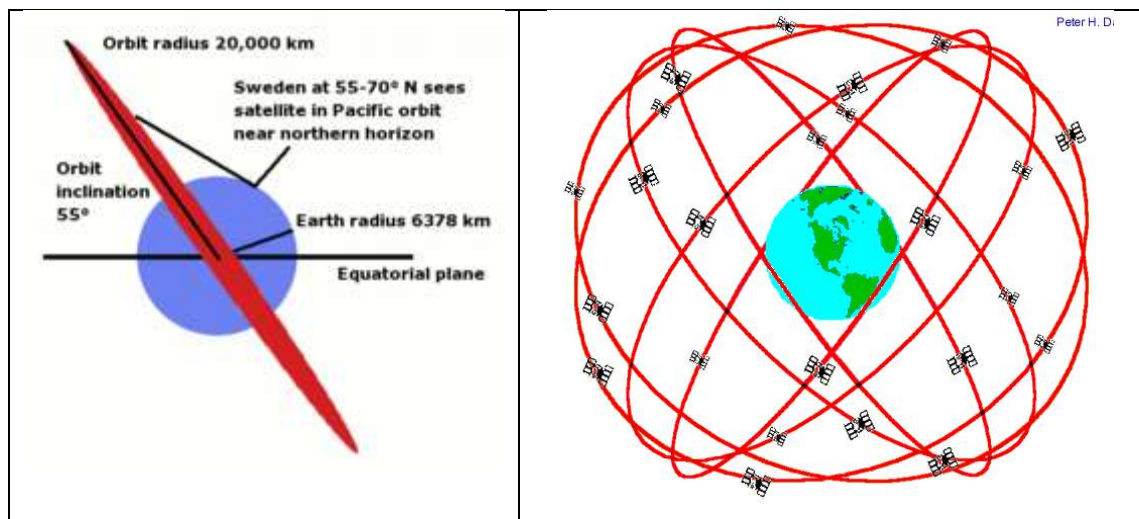
1. *La sección espacial*
2. *La sección de control*
3. *La sección de usuario*

La sección espacial

Es un conjunto de 24 satélites (21 en operación y 3 en órbita pero de repuesto) que se mueven en 6 órbitas planas con una inclinación de 55°, a una distancia de 20.200km de la superficie terrestre, con un período de 12 horas sidéreas.



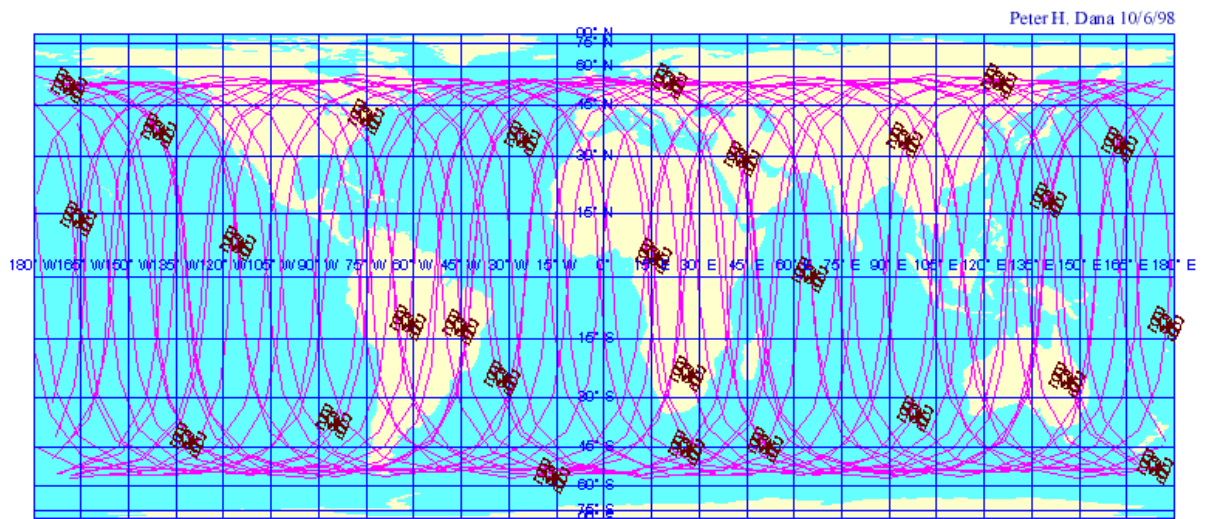
Componentes del sistema: sección espacial, sección terrestre o de control y sección de usuario.



Las órbitas de los satélites

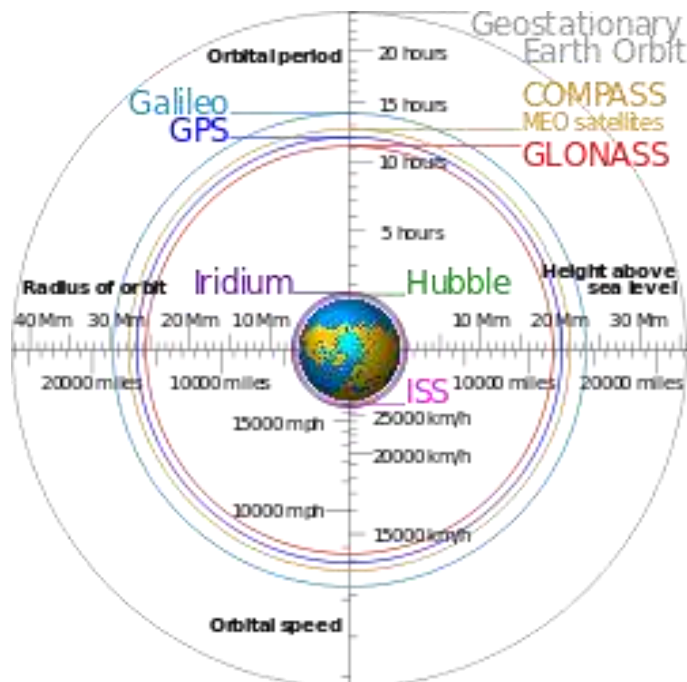
Como resultado de la inclinación elegida para las órbitas y la distancia a que se encuentran los satélites se asegura una cobertura completa del planeta, si bien los mismos nunca llegan a la vertical sobre las áreas polares.

Todos los satélites emiten señales permanentemente y cualquier usuario en cualquier parte del mundo está potencialmente en condiciones de recibir señales de al menos cuatro satélites simultáneamente en cualquier momento y, generalmente, por lo menos seis satélites son visibles desde cualquier localización, lo que asegura que, aún cuando un satélite pueda fallar, habrá siempre un número suficiente como para asegurar la calidad de la determinación de la posición del usuario.



Global Positioning System Satellites and Orbits
for 27 Operational Satellites on September 29, 1998
Satellite Positions at 00:00:00 9/29/98 with 24 hours (2 orbits) of Ground Tracks to 00:00:00 9/30/98

Mapa con la ubicación de las órbitas y de los satélites



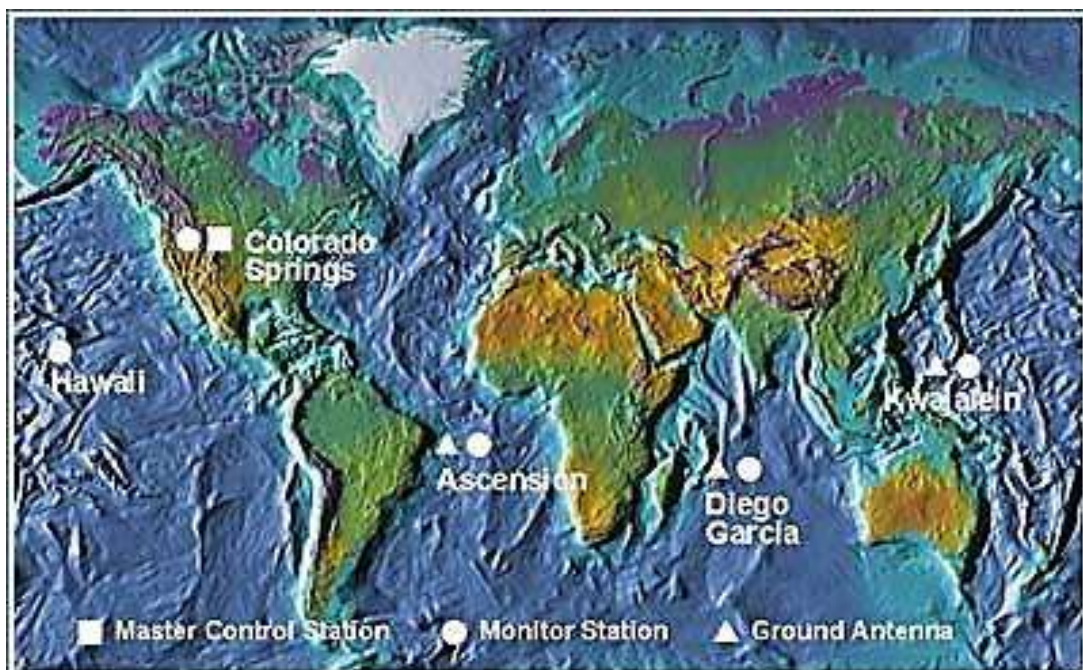
Comparación entre las órbitas de los satélites de diferentes sistemas de posicionamiento y con la posición del telescopio espacial Hubble

A su llegada a la superficie terrestre, la señal emitida por los satélites es bastante débil y no alcanza a atravesar paredes o elementos metálicos. Las nubes, la lluvia y la nieve no afectan significativamente la calidad de la señal salvo que las lluvias sean realmente torrenciales. Del mismo modo una cubierta densa de vegetación del tipo jungla puede afectarla.

La sección de control

Esta sección es operada por el Comando Espacial de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos y está constituida por la denominada Estación Maestra de Control del GPS (GPS Master Control Station, MCS) junto con las Estaciones de Monitoreo (Monitor Station) localizadas en Colorado, Hawái, Ascensión, Diego García y el atolón Kwajalein.

Estas estaciones siguen la ruta de todos los satélites visibles y recogen la información de la trayectoria y tiempo medido por el reloj del satélite. Los operadores en la estación maestra calculan el status, las efemérides y los tiempos para cada satélite y la reenvían a las antenas localizadas en las estaciones de monitoreo (excepto Hawái) desde donde se envía a cada satélite para su inclusión en los mensajes que el mismo emite. Esto se realiza para mantener la exactitud deseada del sistema.



Distribución geográfica de las componentes terrestres del sistema GPS

La sección de usuario

Está constituida por los usuarios civiles, comerciales y militares tanto americanos como extranjeros, que reciben dos tipos de servicios, según quién sean:

- *Servicio Estándar (Standard Positioning Service, SPS)*
- *Servicio Preciso (Precise Positioning Service, PPS)*

El *Servicio Standard* está disponible para todo el mundo en todo el mundo. Su uso no requiere ningún tipo de autorización por la autoridad de defensa de los Estados Unidos. Un rasgo denominado “disponibilidad selectiva” (Selective Availability, SA) establecía el error de la determinación en no menos de 76m para el error esférico probable, pero el mismo ha sido eliminado desde el año 2000. La magnitud de estos errores es controlada por los operadores y puede ser incrementada significativamente en tiempos de conflicto para que los enemigos de los Estados Unidos no puedan utilizarlo en su propio beneficio.

El *Servicio Preciso* sólo se encuentra disponible para los usuarios que son autorizados por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos e incluye a las fuerzas armadas, la guardia costera y otros servicios de la defensa, extendiéndose a los países de la NATO, Australia y unos pocos usuarios más. En estos casos el usuario debe contar con un código encriptado que le permite la decodificación de la señal satelital en este modo de servicio, en el cual la exactitud es de aproximadamente 9m para círculo de error probable (Circular Error Probable, CEP) y de unos 16m para el SEP, en cualquier lugar del mundo. La exactitud de las determinaciones de velocidad es de 0,1m/s RMS y las mediciones de tiempo están en los 100 nanosegundos.

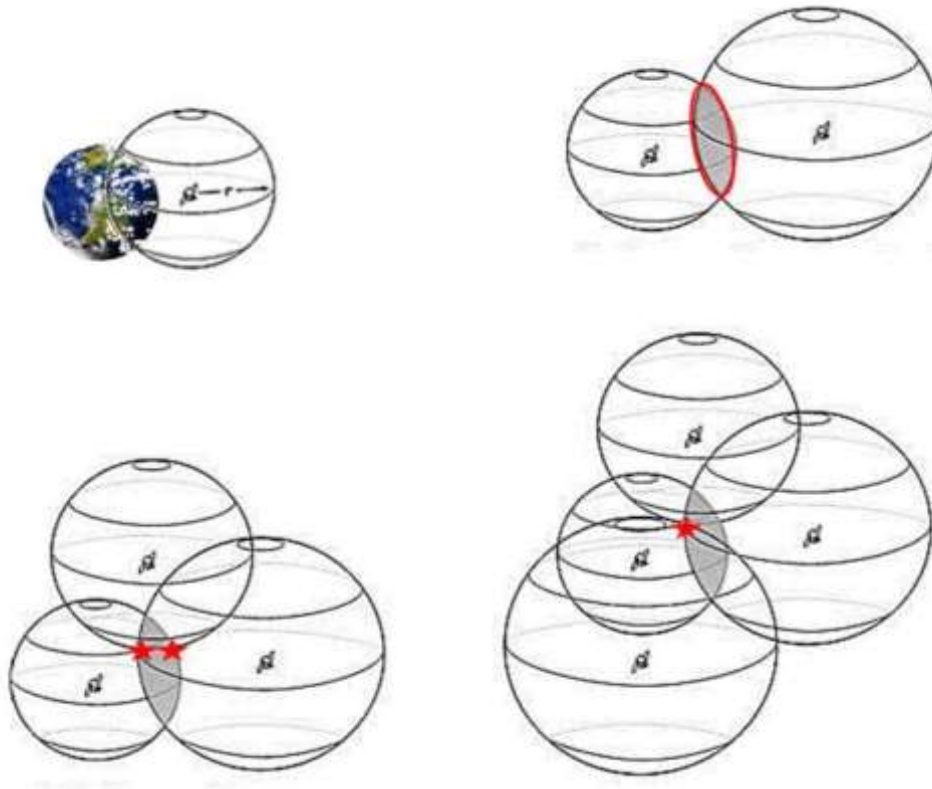
FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

Para poder establecer la posición de un observador sobre el terreno es necesario resolver cuatro incógnitas:

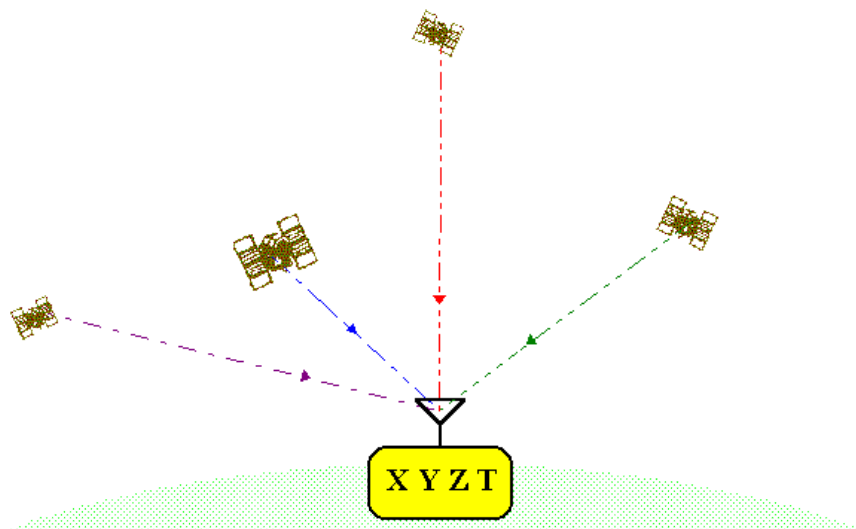
- *Latitud*
- *Longitud*
- *Altitud*
- *Hora*

Para ello es necesario contar con la información de cuatro satélites, que se reducen a tres si se prescinde de la altitud. Los aparatos receptores deben captar y

seguir las señales de los satélites, contar con los códigos de portador y seguimiento, recoger los datos del mensaje incluido en las señales y luego realizar el cálculo de la hora, posición y velocidad, mostrando finalmente los resultados en la pantalla.



Reducción de la ambigüedad con el aumento del número de satélites



El error en las determinaciones



Las diferentes causas de error en la determinación de la distancia

La exactitud del receptor se expresa en términos estadísticos, por lo que es necesario conocer el significado de los términos si se desea usar los datos en términos de exactitud de la determinación de la posición, por ejemplo, y no malinterpretar los mismos. Muchos de los receptores pueden mostrar 10 dígitos en coordenadas MGRS, lo que equivale a una resolución de 1m. Sin embargo, esto NO equivale a una precisión de 1m en la determinación de la posición, la que se expresa de diferentes modos y con diferentes márgenes en distintos organismos o instituciones, por lo que es necesaria una conversión de los valores obtenidos a cada uno de esos modos.

Asumiendo una distribución normal de los datos se determinan el *error linear probable*, que se utiliza habitualmente para expresar el error en la vertical al establecer la altitud; el *error circular probable*, se usa para determinar la precisión sobre el plano, sin referencia a la medición vertical. En ambos casos la magnitud del error implica que el 50% de las mediciones caerán dentro de un segmento o de un círculo con el error correspondiente a cada uno de ellos y el 50% de ellas tendrán una dimensión mayor que el error. El *error esférico probable* (SEP) incluye los

errores en la horizontal y la vertical y es el radio de la esfera en la que existe un 50% de probabilidad se localice el punto. Existen otros errores como la *desviación estándar*, que es una medida de la dispersión de los errores aleatorios alrededor del valor medio y la dilución de la precisión en la posición que está vinculado a las posiciones relativas de los satélites entre sí. Para esto el receptor conoce las efemérides de los satélites y está en condiciones de seleccionar, entre aquéllos que puede ver, los que guardan las relaciones de posición más convenientes para la determinación de la posición.

Los valores de los errores están en el orden de:

Error	Pseudo Distancia	Reloj del satélite y navegación	Perturbaciones del satélite	Modelo de predicción de las efemérides del satélite	Ruido en el receptor	Ruido ionosférico	Retardo troposférico	Trayectorias múltiples	Otros	Error final en la distancia *
SPS	1s	3.0 m	1.0 m	4.2 m	7.5 m	5.0 - 10.0 m	2.0 m	1.2 m	1.2 m	10.8 - 13.9 m
PPS	1s	3.0 m	1.0 m	4.2 m	1.5 m	2.3 m	2.0 m	1.2 m	1.2 m	6.6 m

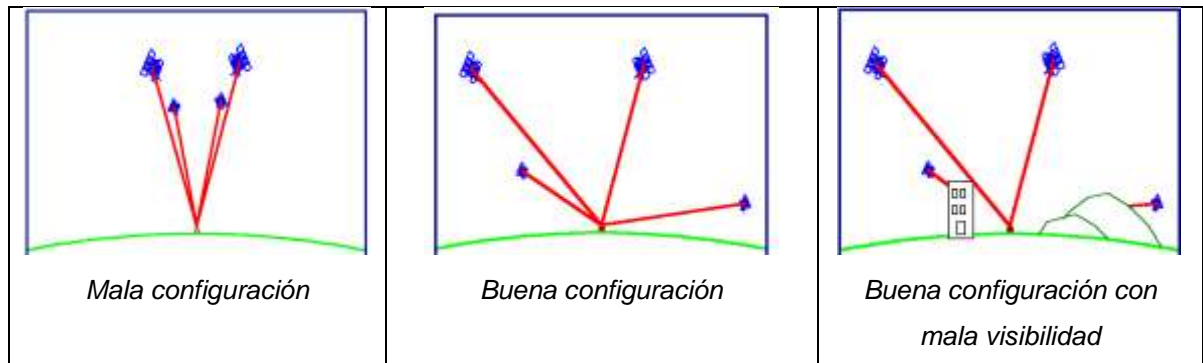
* calculado por suma de raíces cuadradas

Otras fuentes de error

Los relojes atómicos: Cada satélite del sistema lleva a bordo relojes atómicos para mantener la exactitud en la medición del tiempo. Los datos sobre el estado y la exactitud de estos relojes son enviados al sector de control del sistema y las correcciones necesarias son enviadas a los satélites cada vez que resulta necesario. Es importante señalar que el calificativo de atómicos no refiere a que funcionan con energía nuclear sino que se basan en la muy estable oscilación de los átomos de ciertos elementos (como el rubidio o el cesio) para medir el paso del tiempo. Si bien la exactitud es muy alta, un segundo en más o en menos cada 360.000 años, el reloj no es perfecto.

Las órbitas de los satélites: Las órbitas de los satélites han sido seleccionadas con el propósito de optimizar la estabilidad, la duración y la cobertura. Dado que las orbitas son muy estables, es posible calcular las efemérides de cada satélite con mucha precisión. Sin embargo, factores como la inhomogeneidad de la densidad del

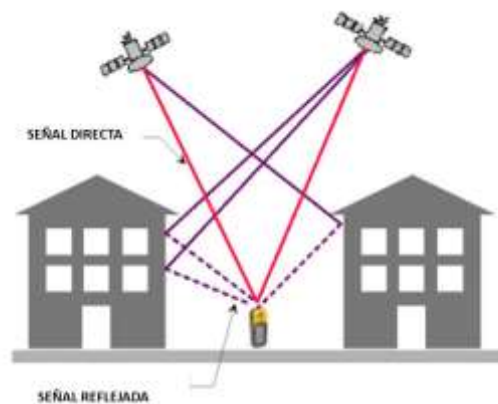
planeta, los campos magnéticos y las fluctuaciones en la radiación solar entre otros factores externos, introducen ligeras variaciones en las trayectorias. Por su parte el modelo de cálculo para la predicción de efemérides no es absolutamente preciso y es necesario introducir modificaciones, lo que se realiza desde el sector de control a partir de los datos de las estaciones de monitoreo que rastrean cada satélite cada cuatro horas, de modo de reducir el error al mínimo.



Buenas y malas distribuciones espaciales de los satélites

Los receptores: Los equipos receptores usan diseños electrónicos muy avanzados para recibir, decodificar y procesar los datos enviados por los satélites, sin embargo, los mismos no son perfectos e introducen un pequeño error en la determinación.

Señales reflejadas: Otra fuente de pequeños errores es la recepción de señales que se han reflejado sobre superficies cercanas al receptor (rebotes), empleándose técnicas que minimizan el impacto de las mismas en el cálculo.



Señales directas y reflejadas son captadas por el equipo receptor e introducen error en la determinación de la posición

Partículas cargadas: La ionosfera está constituida por partículas cargadas y su localización y densidad son variables en función de la radiación solar, el campo magnético terrestre, la iluminación solar y otros factores. Las señales de radio que atraviesan esta capa son retardadas de forma diferentes según su frecuencia y el estado de la ionosfera en ese momento. Para corregir esta influencia en la medición los receptores reciben la misma información en dos frecuencias diferentes, lo que resulta en una pequeña diferencia en el tiempo de llegada y calcular el efecto de la ionosfera. Debe tenerse en cuenta que esta información y corrección sólo está disponible para los usuarios en el modo de precisión, los usuarios estándar reciben la información en una única frecuencia por lo cual la corrección se realiza en función de una ecuación cuya precisión es menor que la que proporciona la disponibilidad de dos frecuencias.

El vapor de agua: La presencia de vapor de agua en la troposfera introduce también un cierto error en el cálculo, el que no puede ser corregido de un modo similar a como se corrige el retardo ionosférico.

Disponibilidad selectiva: Esta característica del sistema fue introducida para reducir la exactitud en caso que la Secretaria de Defensa de los Estados Unidos lo decida. El error SEP era de 76m en tiempos de paz y puede ser aumentado a 2.000m en caso de conflicto, pero desde el año 2000 ha sido desactivado.

El equipo receptor

Existen diferentes tipos de receptores que han sido diseñados para satisfacer las necesidades de diferentes tipos de usuarios. El funcionamiento y la exactitud de los receptores está determinada por el diseño de su electrónica y por los programas que contiene, siendo constantes los mejoramientos en ambos campos.

El número de canales de que dispone un receptor determina la cantidad de satélites cuyas señales puede recibir simultáneamente. Si el receptor se encuentra fijo no existe demasiado problema al respecto ya que un receptor de un solo canal puede ser tan preciso como otro de cinco canales. Cuánto más canales, sin embargo, mayor es la velocidad de resolución para la actualización de la posición, permitiéndole al receptor permanecer vinculado a los satélites que ve y obtener una mejor localización sobre todo cuando se mueve muy lentamente o muy rápido. Un receptor de un solo canal no actualiza su posición con suficiente rapidez como para

incorporar pequeños cambios en la posición. Por supuesto una mayor cantidad de canales implica un mayor costo del equipo.

Receptores secuenciales: Poseen entre uno y tres canales y deben medir pseudodistancias en la frecuencia L1 (y también en L2 si se desea precisión PPS). El aparato debe leer el mensaje NAV sobre cada frecuencia para obtener la información sobre las efemérides. Si el receptor se desplaza durante este lapso de operación se reduce la exactitud de la solución. Como consecuencia, este tipo de receptores se recomienda para un uso estacionario.

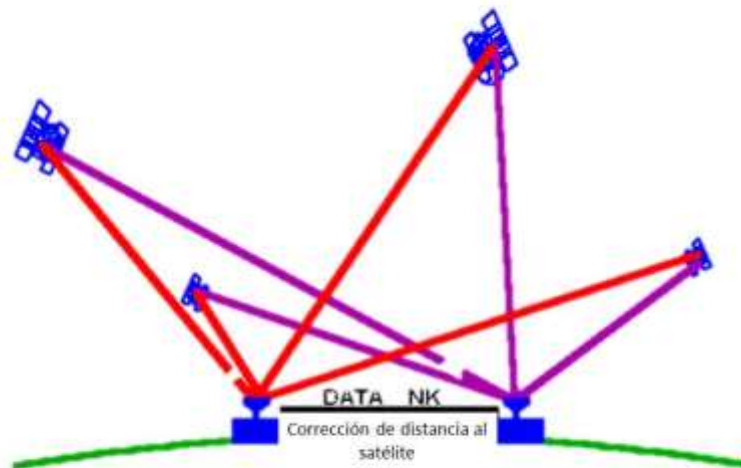
Receptores Multiplex: Éstos poseen un canal que cambia permanentemente y a gran velocidad de uno a otro del grupo de los satélites que recibe, recogiendo permanentemente información de ellos. En muchos aspectos, este tipo de receptor tiene un desempeño similar al de un receptor continuo multicanal. Dado que un receptor de este tipo solo conecta a cada satélite una fracción del tiempo total, no utilizan todo el potencial de la señal, lo que lo hace algo más susceptible a problemas de interferencia que un receptor continuo.

Receptores continuos: Los receptores continuos cuentan con cuatro o cinco canales, lo que les permite rastrear al menos cuatro satélites simultáneamente. En el caso de cinco canales, los cuatro primeros son empleados para resolver el posicionamiento tridimensional, siendo utilizado el quinto para leer el mensaje NAV del próximo satélite a ser usado en la constelación elegida y, si se está trabajando en modo PPS, para realizar las mediciones en doble frecuencia que permitan reducir el error ionosférico. El hecho de contar con un canal para cada satélite permite continuar vinculado al mismo aún en casos de giros y cambios de velocidad muy rápidos. Estos receptores brindan también una mejor resolución en la determinación de la dirección de movimiento para usuarios que se desplazan lentamente y brindan la más rápida determinación de la primera lectura y menos problemas de interferencia.

Receptores All-in-View: Con este tipo de receptores y si todos los satélites se encuentran en sus órbitas, los usuarios podrán ver seis satélites durante todo el tiempo. Los equipos poseen la programación necesaria para seleccionar, entre estos seis, aquéllos cuyas posiciones relativas presentan la mejor distribución espacial (mínimo PDOP/GDOP) para brindar la solución tridimensional más exacta. Estos receptores tienen la suficiente cantidad de canales como para monitorear simultáneamente todos los satélites que ve así como aquéllos que ingresan en el

campo de visión del equipo durante el proceso. La gran cantidad de satélites tenida en cuenta hace que, aún en caso que alguno de ellos quede temporariamente oculto por un accidente del terreno o un obstáculo, el usuario no notará un cambio en la precisión de la medición.

Receptores diferenciales: El concepto de GPS Diferencial (DGPS) involucra el uso de la información recogida por un receptor fijo en una determinada posición conocida para determinar los errores de todas las fuentes incluidos los de la Disponibilidad Selectiva. Desde este equipo se transmiten las correcciones pertinentes al resto de los receptores que están trabajando en sus inmediaciones. Las correcciones son efectivas en un radio de unos 250km del punto en el que se encuentra el equipo fijo.



Fundamentos del uso de GPS diferencial

Fuentes de información recomendadas:

http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html

<http://ashtray.jz.gts.cz/~smsti/SurveyingCourse/chapter01/>

http://fas.org/spp/military/docops/army/ref_text/chap07c.htm

<http://www.mecinca.net/Presentaciones/GPSsencillo/index1.htm>