

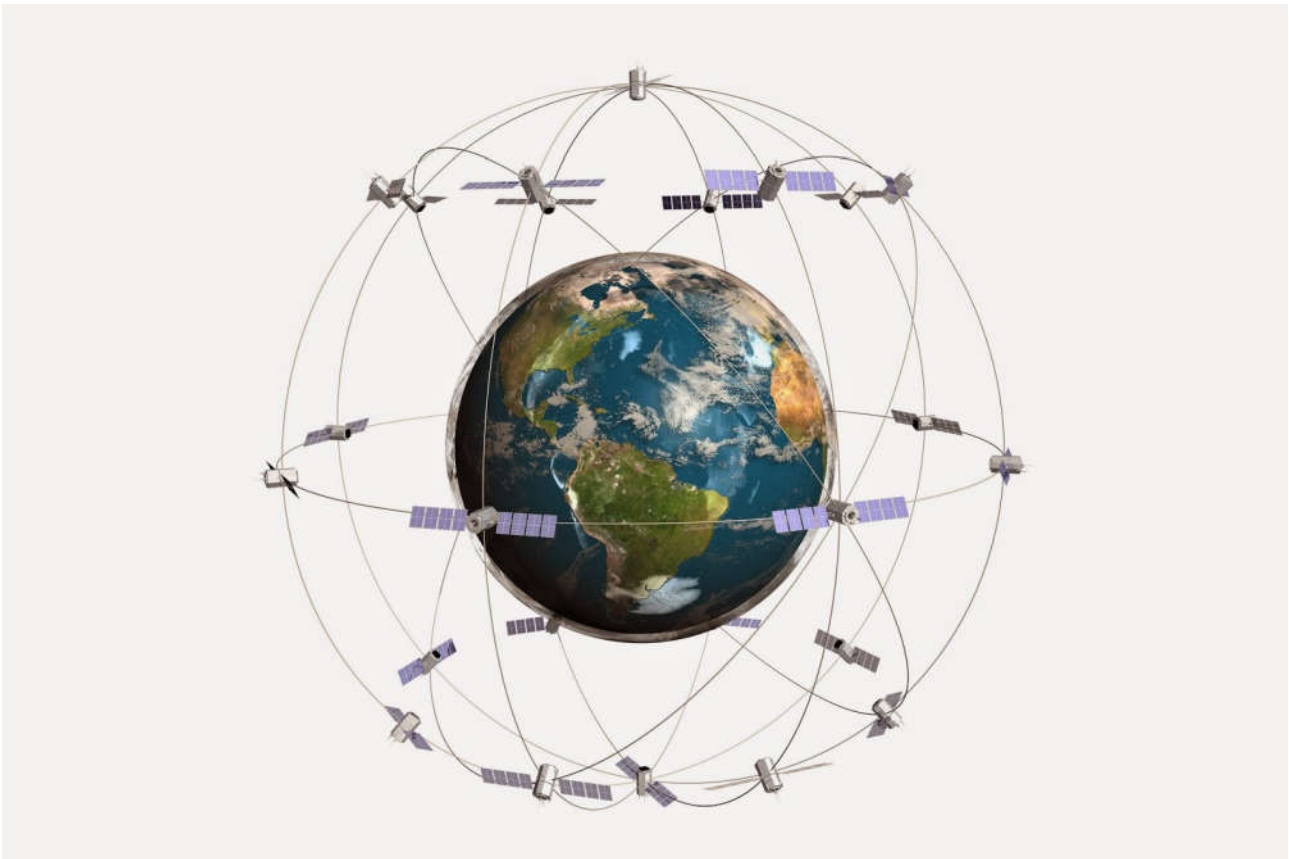
ANEXO I

Breve Historia, características y funcionamiento

Sistema de Posicionamiento Global

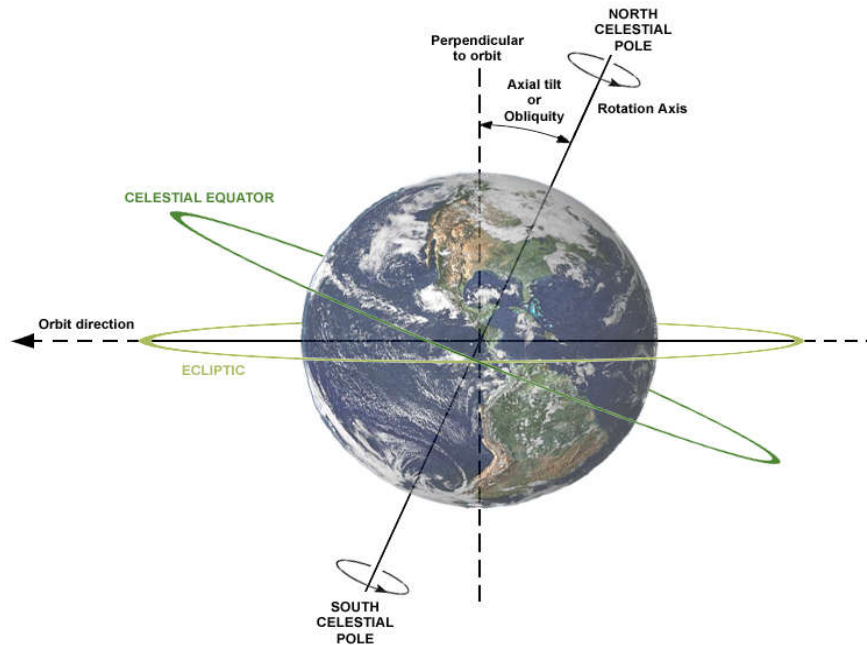
Breve Historia

El Sistema de Posicionamiento Global, más conocido por sus siglas en inglés, GPS (siglas de Global Positioning System), es un sistema que permite determinar en toda la Tierra la posición de un objeto (una persona, un vehículo) con una precisión de hasta centímetros (si se utiliza GPS diferencial), aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión. El sistema fue desarrollado, instalado y empleado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Para determinar las posiciones en el globo, el sistema GPS se sirve de 24 satélites y utiliza la trilateración.



En la década de 1960, el sistema de navegación terrestre OMEGA, basado en la comparación de fase de las señales emitidas a partir de pares de estaciones terrestres, se convirtió en el primer sistema mundial de radio de navegación. Las limitaciones de estos sistemas impulsaron la necesidad de una solución de navegación más universal con más precisión.

La armada estadounidense aplicó esta tecnología de navegación utilizando satélites para proveer a los sistemas de navegación de sus flotas observaciones de posiciones actualizadas y precisas. El sistema debía cumplir los requisitos de globalidad, abarcando toda la superficie del globo; continuidad, funcionamiento continuo sin afectarle las condiciones atmosféricas; altamente dinámico, para posibilitar su uso en aviación y precisión. Esto llevó a producir diferentes experimentos como el Timation y el sistema 621B en desiertos simulando diferentes comportamientos.



Así surgió el sistema TRANSIT, que quedó operativo en 1964, y hacia 1967 estuvo disponible, además, para uso comercial militar. TRANSIT estaba constituido por una constelación de seis satélites en órbita polar baja, a una altura de 1074 km. Tal configuración conseguía una cobertura mundial pero no constante. La posibilidad de posicionarse era intermitente, pudiéndose acceder a los satélites cada 1,5 horas. El cálculo de la posición requería estar siguiendo al satélite durante quince minutos continuamente.

En 1967, la U.S. Navy desarrolló el satélite Timation, que demostró la viabilidad de colocar relojes precisos al espacio, una tecnología requerida por el GPS.



Posteriormente, en esa misma década y gracias al desarrollo de los relojes atómicos, se diseñó una constelación de satélites, portando cada uno de ellos uno de estos relojes y estando todos sincronizados con base en una referencia de tiempo determinado.

En 1973 se combinaron los programas de la Armada y de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (este último consistente en una técnica de transmisión codificada que proveía datos precisos usando una señal modulada con un código de PRN (Pseudo-Random Noise: ruido pseudoaleatorio), en lo que se conoció como Navigation Technology Program (programa de tecnología de navegación), posteriormente renombrado NAVSTAR GPS.

Entre 1978 y 1985 se desarrollaron y lanzaron once satélites prototipo experimentales NAVSTAR, a los que siguieron otras generaciones de satélites, hasta completar la constelación actual, a la que se declaró con «capacidad operacional inicial» en diciembre de 1993 y con «capacidad operacional

total» y utilidad civil en abril de 1995.

En 2009, el gobierno de los Estados Unidos ofreció el servicio normalizado de determinación de la posición para apoyar las necesidades de la OACI, y ésta aceptó el ofrecimiento.

El GPS funciona mediante una red de 24 satélites en órbita sobre el planeta Tierra, a 20.200 km de altura, con trayectorias sincronizadas para cubrir toda la superficie de la Tierra. Cuando se desea determinar la posición, el receptor que se utiliza para ello localiza automáticamente como mínimo tres satélites de la red, de los que recibe unas señales indicando la identificación y la hora del reloj de cada uno de ellos. Con base en estas señales, el aparato sincroniza el reloj del GPS y calcula el tiempo que tardan en llegar las señales al equipo, y de tal modo mide la distancia al satélite mediante el método de trilateración inversa, el cual se basa en determinar la distancia de cada satélite al punto de medición. Conocidas las distancias, se determina fácilmente la propia posición relativa respecto a los satélites. Conociendo además las coordenadas o posición de cada uno de ellos por la señal que emiten, se obtiene la posición absoluta o coordenadas reales del punto de medición. También se consigue una exactitud extrema en el reloj del GPS, similar a la de los relojes atómicos que lleva a bordo cada uno de los satélites.

La antigua Unión Soviética construyó un sistema similar llamado GLONASS, ahora gestionado por la Federación Rusa.

La Unión Europea desarrolló el sistema de navegación Galileo. En diciembre de 2016 la Comisión Europea, propietaria del sistema, informó que el sistema de navegación Galileo comenzó sus operaciones y que los satélites ya envían información de posicionamiento, navegación y determinación de la hora a usuarios de todo el mundo.

La República Popular China está implementando su propio sistema de navegación, el denominado Beidou (Brújula), que está previsto que cuente con 12 y 14 satélites entre 2011 y 2015. Para 2020, ya plenamente operativo deberá contar con 30 satélites. En diciembre de 2012 tenían 14 satélites en órbita.



Galileo CEE



Brújula China

Características técnicas

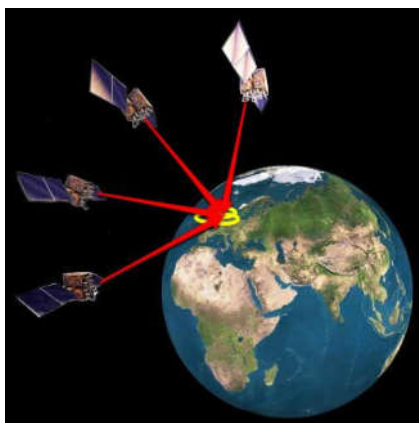
El Sistema Global de Navegación por Satélite lo componen:

- Satélites en la constelación: 24 (4×6 órbitas)
 - Altitud: 20.200 km
 - Período: 11h 58min (12 horas sidéreas)
 - Inclinación: 55 grados (respecto al ecuador terrestre).
 - Vida útil: 7,5 años
 - Hora: 1 ns
- Cobertura: mundial
- Capacidad de usuarios: ilimitada
- Sistema de coordenadas



Cada satélite GPS emite continuamente un mensaje de navegación a 50 bits por segundo en la frecuencia transportadora de microondas de aproximadamente 1.600 MHz. La radio FM, en comparación, se emite a entre 87,5 y 108,0 MHz y las redes Wi-Fi funcionan a alrededor de 5000 MHz y 2400 MHz. Más concretamente, todos los satélites emiten a 1575,42MHz (esta es la señal L1) y 1227,6 MHz (la señal L2).

La señal GPS proporciona la “hora de la semana” precisa de acuerdo con el reloj atómico a bordo del satélite, el número de semana GPS y un informe de estado para el satélite de manera que puede deducirse si es defectuoso. Cada transmisión dura 30 segundos y lleva 1500 bits de datos codificados. Esta pequeña cantidad de datos está codificada con una secuencia pseudoaleatoria (PRN) de alta velocidad que es diferente para cada satélite. Los receptores GPS conocen los códigos PRN de cada satélite y por ello no sólo pueden decodificar la señal sino que la pueden distinguir entre diferentes satélites.





Las transmisiones son cronometradas para empezar de forma precisa en el minuto y en el medio minuto tal como indique el reloj atómico del satélite. La primera parte de la señal GPS indica al receptor la relación entre el reloj del satélite y la hora GPS. La siguiente serie de datos proporciona al receptor información de órbita precisa del satélite.

Desarrollo y evolución

- Incorporación de una nueva señal en L1 para uso civil.
- Adición de una tercera señal civil (L5): 1176,45 MHz
- Protección y disponibilidad de una de las dos nuevas señales para servicios de Seguridad para la Vida (SOL).
- Mejora en la estructura de señales.
- Incremento en la potencia de señal (L5 tendrá un nivel de potencia de -154 dB).
- Mejora en la precisión (1-5 m).
- Aumento en el número de estaciones de monitorización: 12 (el doble)
- Permitir mejor interoperabilidad con la frecuencia L1 de Galileo

El programa GPS III persigue el objetivo de garantizar que el GPS satisfaga requisitos militares y civiles previstos para los próximos 30 años. Este programa se está desarrollando para utilizar un enfoque en tres etapas (una de las etapas de transición es el GPS II); muy flexible, permite cambios futuros y reduce riesgos. El desarrollo de satélites GPS II comenzó en 2005, y el primero de ellos estará disponible para su lanzamiento en 2012, con el objetivo de lograr la transición completa de GPS III en 2017. Los desafíos son los siguientes:

- Representar los requisitos de usuarios, tanto civiles como militares, en cuanto a GPS.
- Limitar los requisitos GPS III dentro de los objetivos operacionales.
- Proporcionar flexibilidad que permita cambios futuros para satisfacer requisitos de los usuarios hasta 2030.
- Proporcionar solidez para la creciente dependencia en la determinación de posición y de hora precisa como servicio internacional.

El sistema ha evolucionado y de él han derivado nuevos sistemas de posicionamiento, como sistemas de posicionamiento dinámicos, un sistema de captura de datos, que permite al usuario realizar mediciones en tiempo real y en movimiento, el llamado Mobile Mapping. Este sistema obtiene cartografía móvil 3D basándose en un aparato que recoge un escáner láser, cámaras

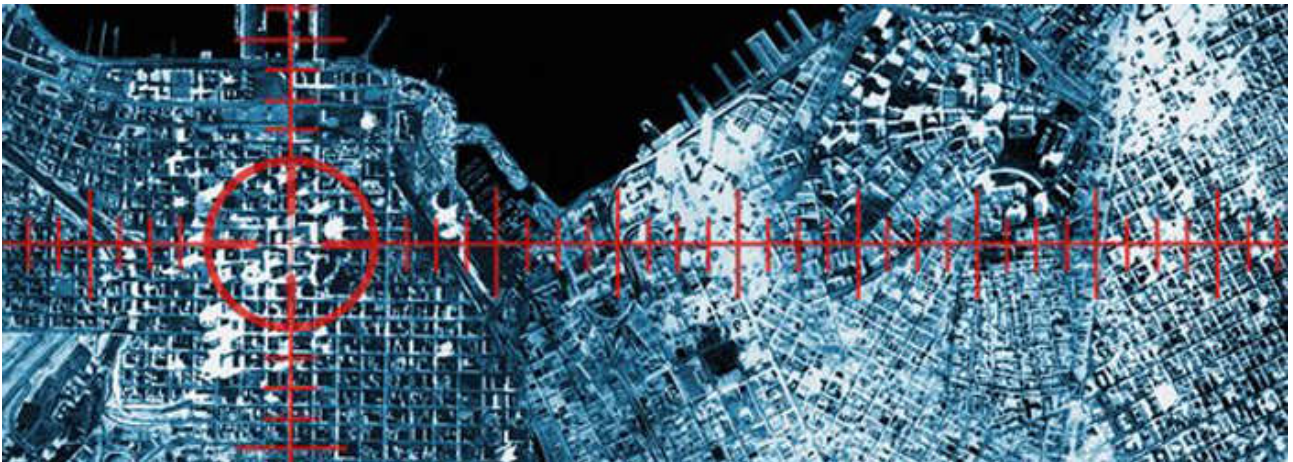
métricas, un sensor inercial (IMU), sistema GNSS y un odómetro a bordo de un vehículo. Se consiguen grandes precisiones, gracias a las tres tecnologías de posicionamiento: IMU + GNSS + odómetro, que trabajando a la vez dan la opción de medir incluso en zonas donde la señal de satélite no es buena.

Envío de datos y funcionamiento

La información que es útil al receptor GPS para determinar su posición se llama efemérides. En este caso cada satélite emite sus propias efemérides, en la que se incluye la salud del satélite, su posición en el espacio, su hora atómica, información doppler, etc.

Mediante la trilateración se determina la posición del receptor:

- Cada satélite indica que el receptor se encuentra en un punto en la superficie de la esfera, con centro en el propio satélite y de radio la distancia total hasta el receptor.
- Obteniendo información de dos satélites queda determinada una circunferencia que resulta cuando se intersecan las dos esferas en algún punto de la cual se encuentra el receptor.
- Teniendo información de un tercer satélite, se elimina el inconveniente de la falta de sincronización entre los relojes de los receptores GPS y los relojes de los satélites. Y es en este momento cuando el receptor GPS puede determinar una posición 3D exacta (latitud, longitud y altitud).



Debido al carácter militar del sistema GPS, el Departamento de Defensa de los EE.UU. se reservaba la posibilidad de incluir un cierto grado de error aleatorio, que podía variar de los 15 a los 100 m. La llamada disponibilidad selectiva (S/A) fue eliminada el 2 de mayo de 2000. Aunque actualmente no aplique tal error inducido, la precisión intrínseca del sistema GPS depende del número de satélites visibles en un momento y posición determinados.

Si se capta la señal de entre siete y nueve satélites, y si éstos están en una geometría adecuada (están dispersos), pueden obtenerse precisiones inferiores a 2,5 metros en el 95% del tiempo. Si se activa el sistema DGPS llamado SBAS (WAAS-EGNOS-MSAS), la precisión mejora siendo inferior a un metro en el 97% de los casos. Estos sistemas SBAS no se aplican en Sudamérica, ya que esa zona no cuenta con este tipo de satélites geoestacionarios. La funcionabilidad de los satélites es por medio de triangulación de posiciones para proporcionar la posición exacta de los receptores (celulares, vehículos, etc.).

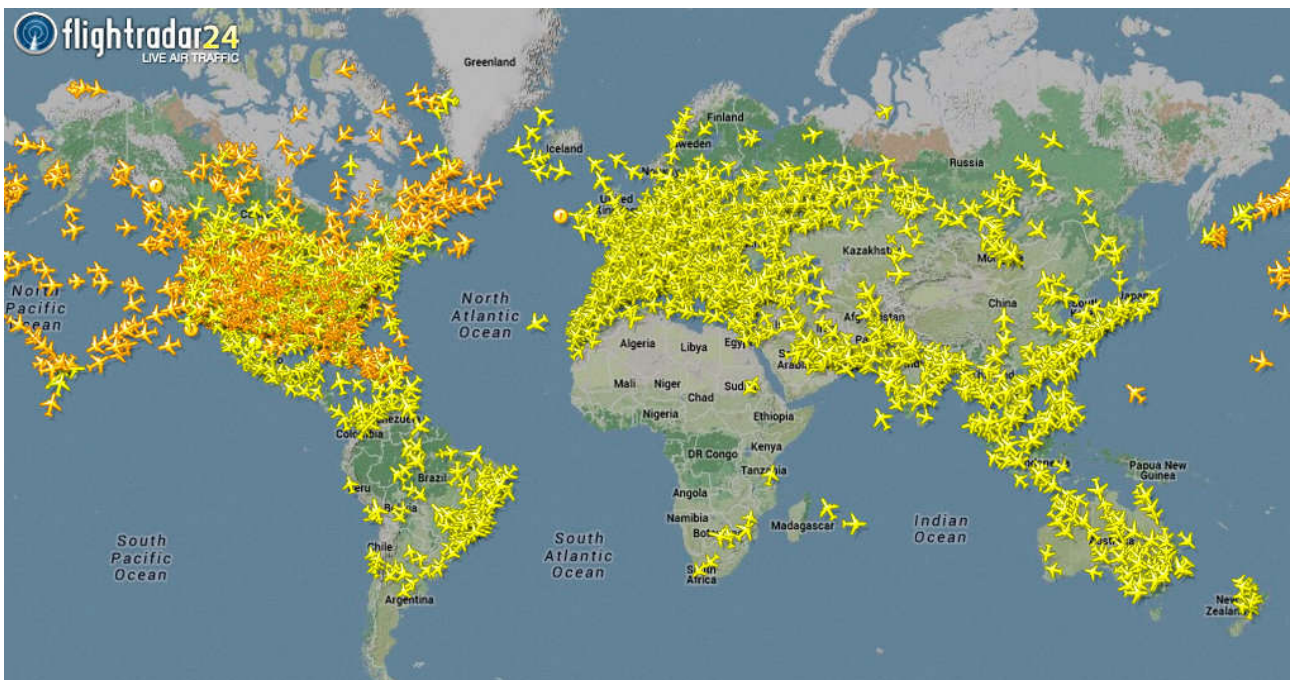
La posición calculada por un receptor GPS requiere en el instante actual, la posición del satélite y el retraso medido de la señal recibida. La precisión es dependiente de la posición y el retraso de la señal.

Al introducir el retraso, el receptor compara una serie de bits (unidad binaria) recibida del satélite con una versión interna mediante (un motor de correlación cableado en un chip especializado, basado en la patente Gronemeyer'216). Cuando se comparan los límites de la serie, las electrónicas

pueden fijar la diferencia a 1% de un tiempo BIT, o aproximadamente 10 nanosegundos por el código C/A. Desde entonces las señales GPS se propagan a la velocidad de luz, que representa un error de 3 metros. Este es el error mínimo posible usando solamente la señal GPS C/A.

La precisión de la posición se mejora con una señal P(Y). Al presumir la misma precisión de 1% de tiempo BIT, la señal P(Y) (alta frecuencia) resulta en una precisión de más o menos 30 centímetros. Los errores en las electrónicas son una de las varias razones que perjudican la precisión (ver la tabla).

Puede también mejorarse la precisión, incluso de los receptores GPS estándares (no militares) mediante software y técnicas de tiempo real. Esto ha sido puesto a prueba sobre un sistema global de navegación satelital (GNSS) como es el NAVSTAR-GPS. La propuesta se basó en el desarrollo de un sistema de posicionamiento relativo de precisión dotado de receptores de bajo costo. La contribución se dio por el desarrollo de una metodología y técnicas para el tratamiento de información que proviene de los receptores.



Fuente	Efecto
Ionosfera	± 3 m
Efemérides	± 2,5 m
Reloj satelital	± 2 m
Distorsión multibandas	± 1 m
Troposfera	± 0,5 m
Errores numéricos	± 1 m o menos

- Retraso de la señal en la ionosfera y la troposfera.
- Señal multirruta, producida por el rebote de la señal en edificios y montañas cercanos.
- Errores de orbitales, donde los datos de la órbita del satélite no son completamente precisos.
- Número de satélites visibles.
- Geometría de los satélites visibles.
- Errores locales en el reloj del GPS

Factores que Afectan la Calidad de los Datos:

Errores Propios del Satélite.

Se refiere a los errores que afectan la calidad de los resultados obtenidos en una medición GPS.

Errores orbitales (efemérides): Debido a que los satélites no siguen una órbita kepleriana normal por causa de las perturbaciones, se requieren mejores estimadores de órbitas, lo que implica un proceso que está obstaculizado por conocimientos insuficientes de las fuerzas que actúan sobre los satélites. Estos errores afectan la determinación de la posición del satélite en un instante determinado con respecto a un sistema de referencia seleccionado. Para disminuir el error en vez de utilizar las efemérides captadas en el receptor se utilizan efemérides precisas calculadas por el IGS y NASA días después de la medición.

Errores del reloj: Se refieren a las variaciones en el sistema de tiempo del reloj del satélite, producidas por la deriva propia de los osciladores y las originadas por la acción de los efectos relativísticos. Dichos errores conllevan a que exista un diferencial entre el sistema de tiempo del satélite y del sistema GPS, el cual no va a ser constante para todos los satélites sino que varía de uno a otro, debido a que la frecuencia estándar de los osciladores de los satélites tiene valores definidos para cada satélite.

Errores de la configuración geométrica: las incertidumbres en un posicionamiento son consecuencia de los errores de las distancias asociadas con las geometrías de los satélites utilizados, cuatro o más. El efecto de la geometría queda expresado por los parámetros de la denominada *Dilución de Precisión Geométrica* (GDOP), el cual considera los tres parámetros de posición tridimensional y tiempo. El valor de GDOP es una medida compuesta que refleja la influencia de la constelación de satélites sobre la precisión combinada de las estimaciones de un tiempo y posición de la estación.

Al efecto se consideran: PDOP: Dilución de precisión para la posición. HDOP: Dilución de precisión para la posición. VDOP: Dilución de precisión vertical. TDOP: Dilución de precisión para el tiempo.

Errores Provenientes del Medio de Propagación.

Errores de refracción ionosférica: En la frecuencia GPS, el rango del error por refracción en la ionósfera va desde 50 metros (máxima, al mediodía, un satélite cerca del horizonte) hasta 1 metro (mínima, en la noche, un satélite en el zenit). Debido a que la refracción ionosférica depende de la frecuencia, el efecto es estimado comparando mediciones realizadas en dos frecuencias diferentes ($L1=1575.42$ MHz. y $L2=1227.60$ MHz.). Usando dos estaciones, una con coordenadas conocidas. Podemos corregir errores de tiempo. El retardo del tiempo de viaje en la ionosfera depende de la densidad de electrones a lo largo del camino de la señal y de la frecuencia de la misma. Una fuente influyente sobre la densidad de los electrones es la densidad solar y el campo magnético terrestre. Por lo tanto la refracción ionosférica depende de la hora y del sitio de medición.

Errores de refracción troposférica: La refracción troposférica produce errores comprendidos entre 2 metros (satélite en el zenit) y 25 metros (satélite a 5° de elevación). La refracción troposférica es independiente de la frecuencia, por lo tanto una medición de dos frecuencias no puede determinar el efecto pero este error puede ser compensado usando modelos troposféricos.

Multipath: Es el fenómeno en el cual la señal llega por dos o más trayectorias diferentes. La diferencia en las longitudes de las trayectorias causa interferencia de las señales al ser recibidas. El multipath se nota usualmente cuando se está midiendo cerca de superficies reflectoras, para minimizar sus efectos se utiliza una antena capaz de hacer discriminaciones en contra de las señales que llegan de diferentes direcciones.

Errores en la Recepción.

Estos errores dependen tanto del modo de medición como del tipo de receptor que se utiliza.

Ruido: Como la desviación estándar del ruido en la medición es proporcional a la longitud de onda

en el código. El ruido en las medidas de fase de la portadora condiciona la cantidad de datos y el tiempo de seguimiento requeridos para alcanzar un determinado nivel de precisión, resultando crucial el seguimiento y las mediciones continuas para asegurar dicha precisión.

Centro de fase de la antena: Este puede cambiar en función del ángulo de elevación del azimut (figura 15). El aparente centro de fase eléctrico de la antena GPS es el punto preciso de navegación para trabajos relativos. Si el error del centro de fase de la antena es común para todos los puntos durante la medición, estos se cancelan. En mediciones relativas se usan todas las antenas de la red alineadas en una misma dirección (usualmente el norte magnético) para que el movimiento del centro de fase de la antena sea común y se cancele con una primera aproximación.

DGPS o GPS diferencial



Estación Leica de referencia DGPS.

Equipo de campo realizando levantamiento de información sísmica usando un receptor GPS Navcom SF-2040G StarFire montado sobre un mástil.

El DGPS (Differential GPS), o GPS diferencial, es un sistema que proporciona a los receptores de GPS correcciones de los datos recibidos de los satélites GPS, con el fin de proporcionar una mayor precisión en la posición calculada. Se concibió fundamentalmente debido a la introducción de la disponibilidad selectiva (SA).

El fundamento radica en el hecho de que los errores producidos por el sistema GPS afectan por igual (o de forma muy similar) a los receptores situados próximos entre sí. Los errores están fuertemente correlacionados en los receptores próximos.



Un receptor GPS fijo en tierra (referencia) que conoce exactamente su posición basándose en otras técnicas, recibe la posición dada por el sistema GPS, y puede calcular los errores producidos por el sistema GPS, comparándola con la suya, conocida de antemano. Este receptor transmite la corrección de errores a los receptores próximos a él, y así estos pueden, a su vez, corregir también los errores producidos por el sistema dentro del área de cobertura de transmisión de señales del

equipo GPS de referencia.

En suma, la estructura DGPS quedaría de la siguiente manera:

- **Estación monitorizada (referencia)**, que conoce su posición con una precisión muy alta. Esta estación está compuesta por:
 - Un receptor GPS.
 - Un microprocesador, para calcular los errores del sistema GPS y para generar la estructura del mensaje que se envía a los receptores.
 - Transmisor, para establecer un enlace de datos unidireccional hacia los receptores de los usuarios finales.
- **Equipo de usuario**, compuesto por un receptor DGPS (GPS + receptor del enlace de datos desde la estación monitorizada).

Existen varias formas de obtener las correcciones DGPS. Las más usadas son:

- Recibidas por radio, a través de algún canal preparado para ello, como el RDS en una emisora de FM.
- Descargadas de Internet, o con una conexión inalámbrica.
- Proporcionadas por algún sistema de satélites diseñado para tal efecto. En Estados Unidos existe el WAAS, en Europa el EGNOS y en Japón el MSAS, todos compatibles entre sí.

En los mensajes que se envían a los receptores próximos se pueden incluir dos tipos de correcciones:

- **Una corrección directamente aplicada a la posición.** Esto tiene el inconveniente de que tanto el usuario como la estación monitorea deberán emplear los mismos satélites, pues las correcciones se basan en esos mismos satélites.
- **Una corrección aplicada a las pseudodistancias de cada uno de los satélites visibles.** En este caso el usuario podrá hacer la corrección con los cuatro satélites de mejor relación señal-ruido (S/N). Esta corrección es más flexible.

El error producido por la disponibilidad selectiva (SA) varía incluso más rápido que la velocidad de transmisión de los datos. Por ello, junto con el mensaje que se envía de correcciones, también se envía el tiempo de validez de las correcciones y sus tendencias. Por tanto, el receptor deberá hacer algún tipo de interpolación para corregir los errores producidos.

Si se deseara incrementar el área de cobertura de correcciones DGPS y, al mismo tiempo, minimizar el número de receptores de referencia fijos, será necesario modelar las variaciones espaciales y temporales de los errores. En tal caso estaríamos hablando del GPS diferencial de área amplia.

Con el DGPS se pueden corregir en parte los errores debidos a:

- Disponibilidad selectiva (eliminada a partir del año 2000).
- Propagación por la ionosfera - troposfera.
- Errores en la posición del satélite (efemérides).
- Errores producidos por problemas en el reloj del satélite.

Para que las correcciones DGPS sean válidas, el receptor tiene que estar relativamente cerca de alguna estación DGPS; generalmente, a menos de 1000 km. Las precisiones que manejan los receptores diferenciales son centimétricas, por lo que pueden ser utilizados en ingeniería.çç-permite determinar en todo el mundo la posición de un objeto, una persona o un vehículo con una precisión hasta de centímetros.

Vocabulario básico en GPS



Vehículo de la empresa Tele Atlas con GPS cartografiando y fotografiando las carreteras en Rochester, Nueva York (EE. UU.)

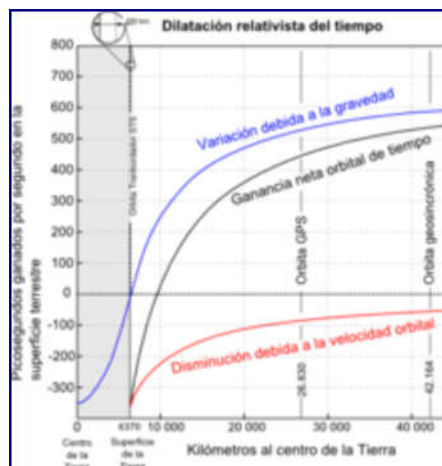
- BRG (*bearing*): Rumbo estimado entre dos puntos de referencia (waypoints)
- CMG (*Course Made Good*): rumbo entre el punto de partida y la posición actual
- EPE (*Estimated Position Error*): margen de error estimado por el receptor
- ETE (*Estimated Time Enroute*): tiempo estimado entre dos waypoints
- DOP (*Dilution of Precision*): medida de la precisión de las coordenadas obtenidas por GPS, según la distribución de los satélites, disponibilidad de ellos...
- ETA (*Estimated Time to Arrival*): hora estimada de llegada al destino

Integración con telefonía móvil

Actualmente dentro del mercado de la telefonía móvil la tendencia es la de integrar, por parte de los fabricantes, la tecnología GPS dentro de sus dispositivos. El uso y masificación del GPS está particularmente extendido en los teléfonos móviles smartphone, lo que ha hecho surgir todo un ecosistema de software para este tipo de dispositivos, así como nuevos modelos de negocios que van desde el uso del terminal móvil para la navegación tradicional punto-a-punto hasta la prestación de los llamados Servicios Basados en la Localización (LBS).

Un buen ejemplo del uso del GPS en la telefonía móvil son las aplicaciones que permiten conocer la posición de amigos cercanos sobre un mapa base. Para ello basta con tener la aplicación respectiva para la plataforma deseada (Android, Bada, IOS, WP, Symbian) y permitir ser localizado por otros.

GPS y la teoría de la relatividad



Variación del tiempo en picosegundos según la altura de la órbita debido a los efectos relativistas

Los relojes en los satélites GPS requieren una sincronización con los situados en tierra para lo que hay que tener en cuenta la teoría general de la relatividad y la teoría especial de la relatividad. Los tres efectos relativistas son: la dilatación del tiempo, cambio de frecuencia gravitacional, y los efectos de la excentricidad. La desaceleración relativista del tiempo debido a la velocidad del satélite es de aproximadamente 1 parte de 10^{10} , la dilatación gravitacional del tiempo hace que el reloj del satélite alrededor de 5 partes entre 10^{10} más rápido que un reloj basado en la Tierra, y el efecto Sagnac debido a rotación con relación a los receptores en la Tierra. Si no se tuviese en cuenta el efecto que sobre el tiempo tiene la velocidad del satélite y su gravedad respecto a un observador en tierra, se produciría un corrimiento de 38 microsegundos por día, que a su vez provocarían errores de varios kilómetros en la determinación de la posición.

La relatividad especial y general

De acuerdo con la teoría de la relatividad, debido a su constante movimiento y la altura relativa respecto, aproximadamente, un marco de referencia inercial no giratorio centrado en la Tierra, los relojes de los satélites se ven afectados por su velocidad.

Al combinar la dilatación del tiempo y desplazamiento de frecuencia gravitacional, la discrepancia es de aproximadamente 38 microsegundos por día, una diferencia de 4,465 partes de 10^{10} . Sin corrección, los errores en la pseudodistancia inicial se acumularía aproximadamente unos 10 km/día. Este error en la pseudodistancia inicial se corrige en el proceso de resolución de las ecuaciones de navegación. Además las órbitas de los satélites son elípticas, en lugar de perfectamente circulares, lo que causa que los efectos de la dilatación del tiempo y desplazamiento de la frecuencia gravitacional varíen con el tiempo. Este efecto excentricidad hace que la diferencia de velocidad de reloj entre un satélite GPS y un receptor aumente o disminuya en función de la altitud del satélite.

Para compensar esta discrepancia, al patrón de frecuencia a bordo de cada satélite se le da una tasa de compensación antes del lanzamiento, por lo que marcha un poco más lento que la frecuencia de trabajo en la Tierra. Concretamente, trabaja a 10.22999999543 MHz en lugar de 10,23 Mhz. Dado que el reloj atómico a bordo de los satélites GPS se ajusta con precisión, hace que el sistema sea una aplicación práctica de la teoría científica de la relatividad en un ambiente del mundo real.

Friedwardt Winterberg propuso colocar relojes atómicos en satélites artificiales para poner a prueba la teoría general de Einstein en 1955.

Distorsión de Sagnac

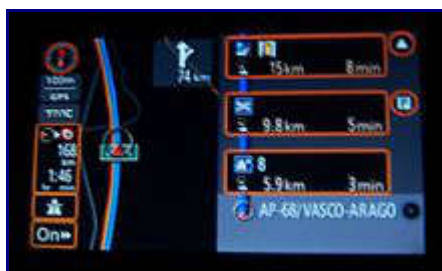
El procesamiento de la observación GPS también debe compensar el efecto Sagnac. La escala de tiempo del GPS se define en un sistema inercial, pero las observaciones se procesan en un sistema centrado en la Tierra, fijo a la Tierra (co-rotación), un sistema en el que la simultaneidad no está definida de forma única. Se aplica una transformación de Lorentz, pues, para convertir del sistema de inercia al sistema ECEF. El recorrido señal resultante de corrección de tiempo tiene signos algebraicos opuestos de los satélites en los hemisferios celestes oriental y occidental. Haciendo caso omiso de este efecto se producirá un error de este a oeste en el orden de cientos de nanosegundos, o decenas de metros de su posición.

Aplicaciones

Civiles



Un dispositivo GPS civil Swiss Gadget 760GS colocado en parabrisas y mostrando datos de navegación vehicular libre



Navegador GPS de pantalla táctil de un vehículo con información sobre la ruta, así como las distancias y tiempos de llegada al punto de destino.



Navegador con un software libre de navegación (Gosmore) usando mapas libres de OpenStreetMap.

- Navegación terrestre (y peatonal), marítima y aérea. Bastantes automóviles lo incorporan en la actualidad, siendo de especial utilidad para encontrar direcciones o indicar la situación a la grúa.
- Teléfonos móviles
- Topografía y geodesia.
- Construcción (Nivelación de terrenos, cortes de talud, tendido de tuberías, etc).
- Localización agrícola (agricultura de precisión), ganadera y de fauna.
- Salvamento y rescate.
- Deporte, acampada y ocio.
- A.P.R.S. Aplicación parecida a la gestión de flotas, en modo abierto para Radioaficionados
- Para localización de enfermos, discapacitados y menores.
- Aplicaciones científicas en trabajos de campo (geomática).

- Geocaching, actividad deportiva consistente en buscar "tesoros" escondidos por otros usuarios.
- Para rastreo y recuperación de vehículos.
- Navegación deportiva.
- Deportes aéreos: parapente, ala delta, planeadores, etc.
- Existe quien dibuja usando tracks o juega utilizando el movimiento como cursor (común en los GPS Garmin).
- Sistemas de gestión y seguridad de flotas.

Militares

- Navegación terrestre, aérea y marítima.
- Guiado de misiles y proyectiles de diverso tipo.
- Búsqueda y rescate.
- Reconocimiento y cartografía.
- Detección de detonaciones nucleares.

Hoy en día podemos acceder a sitios web en donde se puede ver el tráfico aéreo civil, así como también el marítimo.

Flightradar24 es una página web que muestra información en tiempo real sobre el tráfico aéreo alrededor del mundo. En ella se informa de la posición del avión, altitud, rumbo, velocidad.

<https://www.flightradar24.com>

Marinetraffic es una página web que muestra información en tiempo real sobre el tráfico marítimo alrededor del mundo. En ella se informa de la posición del barco, rumbo, velocidad.

<https://www.marinetraffic.com/>