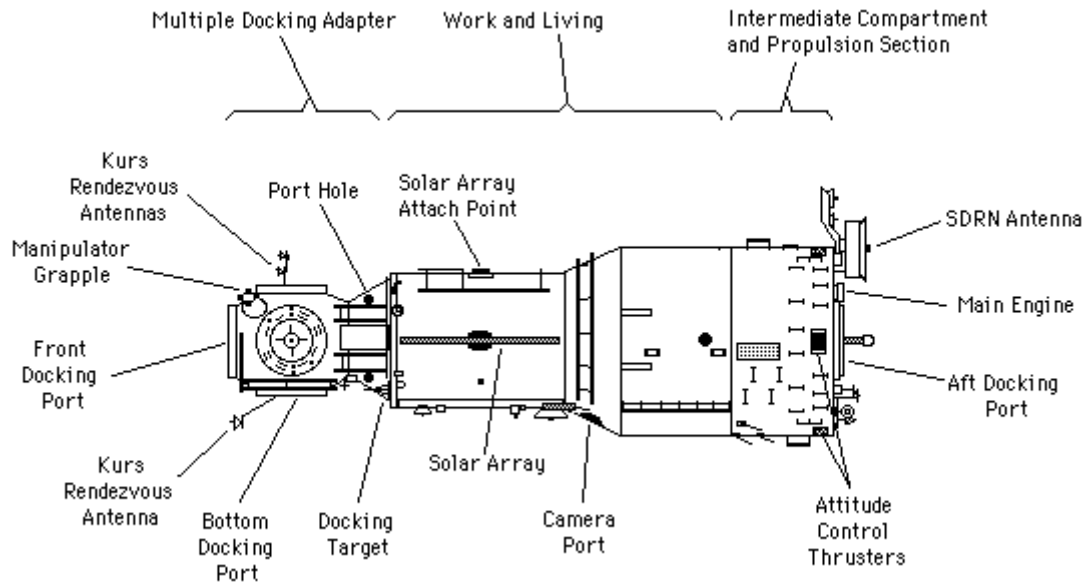




FRANCISCO M. COBOS



INGENIERIA CIVIL ESPACIAL



SISTEMAS DE NAVEGACION SATELITAL

COMO FUNCIONA UN GPS. LO MEJOR DE LOS SATELITES



1 - INTRODUCCION

Cuando en 1957 los rusos lanzaron el Sputnik I apenas sospechaban que los americanos convertirían rápidamente las señales radiadas por el satélite en la mayor revolución para navegar desde el invento de la brújula.

Escuchando los bips, los científicos del laboratorio de Física Aplicada de la Universidad John Hopkins, de Maryland, encontraron que podían usarlos para predecir con precisión la posición orbital del Sputnik, y así la ubicación del escucha en la tierra.

De ahí en más, otros científicos del laboratorio desarrollaron la "caja negra" (Black box) electrónica para automatizar dicho sistema. Había nacido la navegación satelital.

Los sistemas de navegación satelital son sistemas electrónicos que emplean al satélite artificial como fuentes, retransmisores de señales o como posiciones de referencia.

Los satélites terrestres pueden proveer la ventaja de la navegación rectilínea entre puntos distantes de la superficie del planeta.

En el espacio, la ubicación del satélite puede ser determinada de forma tan ajustada que pueden ser utilizados como posiciones de referencia en precisos sistemas de navegación.

A pesar de que los satélites puedan mejorar y extender la cobertura de navegación y la de los sistemas de control de tráfico, las técnicas empleadas en su aplicación son similares a las usadas en los sistemas clásicos.



2 - SISTEMAS DE UBICACION ACTIVOS O PASIVOS

Un sistema de ubicación activo es aquel en el que el equipo a bordo de la nave del usuario transmite una señal de retorno al satélite en respuesta a una interrogación de este último.

Cuando la posición del usuario se determina con señales recibidas desde satélites sin interrogación u otra transmisión desde el equipo del usuario, el sistema se denomina pasivo.

A pesar que los sistemas activos fueron en un principio ampliamente propuestos, la tecnología ha generalizado el uso del sistema pasivo. Este puede servir a un número ilimitado de usuarios ya que el satélite no debe ser provisto con un sistema de transmisión capaz de recibir las señales de los usuarios.

A principios de la década del ochenta solo había un sistema de navegación satelital operando. Era el NNSS (U.S. Navy's Navigation Satellite System), una constelación de cinco satélites de la marina norteamericana. Fue desarrollado para actualizar los sistemas de navegación inercial de los Polaris, submarinos que portan misiles balísticos. Luego, se extendió su uso a todos los marinos del mundo. El sistema es pasivo, usa satélites de órbita baja y la técnica Doppler (Breve explicación del efecto Doppler-Fizeau en el punto 2, del capítulo de ondas electromagnéticas). Los satélites del NNSS están a una altitud aproximada de 900 km (500 millas náuticas), desde donde circundan la tierra en 100 minutos. Sus órbitas planas se hallan inclinadas 70° con respecto al Ecuador de manera tal que el servicio sea accesible en todo el mundo. Los satélites transmiten señales en fase coherente en 150 y 400 MHz. Esta frecuencia permite el uso de antenas receptoras que no necesitan ser apuntadas hacia el satélite;



pero son afectadas en la ionosfera con un retraso en la propagación. Los usuarios que requieren una gran exactitud reciben ambas frecuencias f desde los satélites, para corregir los errores inducidos en la ionosfera.

Un satélite NNSS transmitía su posición orbital transitoria cada dos minutos. Las mediciones Doppler y los datos orbitales se entraban en una computadora, y la posición corregida era impresa inmediatamente. La precisión del NNSS era aproximadamente de 0,2 km (0,1 millas náuticas) cuando se aplicaban las correcciones ionosféricas. Esta posición se perdía en vehículos de movimiento rápido, como ser aeronaves, salvo cuando la velocidad era conocida con exactitud ya que su propio movimiento introducía variaciones en las señales Doppler recibidas.

Para averiguar la posición del satélite, el navegador recibía del mismo, por radio, detalles completos de sus propios parámetros orbitales (Efemérides) y el tiempo.

Para obtener el alcance de la diferencia, el navegador media las variaciones Doppler debidas al movimiento propio del satélite en el espacio. Luego la computadora debía resolver complicadas ecuaciones para dar finalmente la posición del barco o vehículo.

Para que el satélite conociese su propia órbita y posición, se rastreaba por un número de estaciones Doppler de seguimiento en la tierra, las que vía computadora alimentaban dos estaciones de inyección. Estas últimas le transmitían al satélite su propia efemérides, tal como había sido calculada en tierra y esta alimentaba la memoria del satélite. Era almacenada allí, siendo actualizada por transmisiones que se sucedían normalmente cada doce horas.



En el artículo "Satellites that serve us" aparecido en la edición de Septiembre de 1983 del National Geographic, se entrevistó a pescadores. Estos mencionaron como, actualmente, pescaban gracias a dos tipos de satélites. Primero los meteorológicos, cuyo funcionamiento se explicará más adelante, que permiten medir las temperaturas sobre la superficie marítima. Cuando la NOAA empezó a distribuir las cartas satelitales de temperatura, los pesqueros comerciales, conocedores de las temperaturas preferidas por los peces, solo tuvieron que utilizar el sistema NNSS para llegar a dichos puntos. Su única preocupación era que el sistema fallase y se hubiesen olvidado de como usar el sextante. El NNSS les servía para encontrar los campos de pesca, para permanecer en ellos durante la noche, y simplemente para mantener un rumbo recto de un punto a otro, cuestión que les permitía ahorrar combustible.

Para la sorpresa de muchos, el sistema de navegación satelital, vulgarmente conocido como "Sat-Nav" tuvo adeptos entusiastas tanto en la tierra como en el mar abierto. Muchos Ingenieros Civiles, en mensuras y relevamientos, comenzaron a llevar cajas negras del navegador satelital conjuntamente con sus teodolitos.

Mensuras que antes llevaban años podían realizarse en días.

Por esos años ya se hablaba de otro sistema, que es el que realmente podremos utilizar para nuestra profesión, el GPS, Sistema Global de Posicionamiento.



3 - SISTEMA GLOBAL DE POSICIONAMIENTO - GPS

En 1990 aparecieron dos noticias en publicaciones internacionales cuyos posibles impactos en nuestra profesión no podían ser pasados por alto.

En la edición del 10 de septiembre de 1990, la revista Time, en su sección tecnológica publicó un artículo digno de Ian Fleming. En Japón, por un adicional de U\$S 2000 a U\$S 4000 el auto era entregado con un mapa electrónico en un disco compacto. La empresa Mazda creó un sistema utilizando una combinación de navegador con base terrestre y direccionamiento satelital llamado GPSS. Además de brújula y sensores de giro en las ruedas, el GPSS utilizaba señales de radio de los satélites del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, ubicados en orbitas estacionarias sobre la tierra para establecer la posición del auto. Los satélites fueron diseñados con propósitos militares, pero los civiles son libres de utilizarlo con un nivel de precisión reducido. Una vez ubicada la ciudad se marca en la computadora el punto al que se quiere llegar y esta se encarga de trazar el camino ideal.

La otra noticia ocurrió bajo el mar. El martes 30 de octubre de 1990 los mineros que horadaban el túnel bajo el Canal de la mancha establecieron contacto mediante una barrena de cinco centímetros de diámetro. El sueño de innumerables Ingenieros Civiles se habla hecho realidad. Gran Bretaña perdió su aislamiento geográfico. Una obra muy interesante, con el mérito de ser el mayor proyecto con financiación privada en la historia de la ingeniería civil.



El director técnico de Eurotúnel, empresa anglo francesa que llevaba a cabo la obra, Colín Kirkland, expresó que la construcción del mismo no había sido difícil pero que la logística había sido una pesadilla. El desafío había sido cavar la tiza y extraerla, mientras que simultáneamente se presionaban en su lugar segmentos de hormigón masivo reforzado en las paredes del túnel. La respuesta al desafío logístico vino en la forma de once gigantescas máquinas, llamadas TBM's (Tunnel-Boring Machines), o maquina pesada para túnel .Cada una a un costo aproximado de veinte millones de dólares y a un peso de 1200 toneladas. Cada TBM estaba equipada con una cabeza rotativa cortante de 8,7 metros que bajo condiciones óptimas podían excavar 4,4 metros por hora. El gran desafío era lograr el encuentro de los dos túneles, uno saliendo de Francia y otro de Inglaterra, a un centenar de metros bajo las aguas del canal. Un proyecto muy audaz aún para los mejores Ingenieros. Sin embargo, la diferencia de alineamiento fue de apenas cincuenta centímetros. La galería de servicio, primera en perforarse, fue el resultado de una labor multidisciplinaria, pues todas las máquinas operaron asistidas por satélite. El paso de las TBM fue guiado por un sistema laser que chequeaba el alineamiento del túnel con una docena de puntos de referencia establecidos utilizando cuatro satélites NAVSTAR.

El sistema , cuyas características se desarrollaran a continuación tiene otras aplicaciones, que no pueden obviarse aunque sean de uso militar. El mismo sistema utilizado en el Chunnel (mezcla de Channel:canal y túnel) es utilizado para el combate, y para ello fue concebido. Sus señales guían a los tanques a través del desierto sin referencias. Guían barcos, aeronaves, misiles e inclusive a soldados de la infantería portando pequeños receptores de pulsera.



Revolucionó el sistema para enviar misiles, los cuales, guiados por satélites de navegación pueden viajar miles de kilómetros y encontrar sus objetivos con un margen de pocos metros. Eso es lo que los norteamericanos llamaban operación quirúrgica en la crisis del golfo. Se puede bombardear cualquier objetivo del cual se conozcan sus coordenadas exactas casi sin error.

Son las dos caras de la moneda. Primero se investiga para el campo militar y luego se transfiere la tecnología al campo civil. El mismo sistema que nos puede ayudar a replantear una ruta en los pantanos de Bolivia, sirve para destruir un punto en un país del África central desde un submarino instalado en Brasil. Solo basta conocer sus coordenadas X, Y, Z ; latitud , longitud y altura sobre el nivel del mar.

Una vez introducidos en las ventajas y posibilidades del sistema se desarrollará brevemente el funcionamiento del GPS.

El sistema de posicionamiento global NAVSTAR (GPS) trajo una revolucionaria capacidad para navegar en tiempo real. Debido al uso de relojes atómicos de alta precisión se ha logrado que el sistema de "boyas" satelitales provea un nivel de precisión nunca antes alcanzado para la navegación o el posicionamiento propio. Un procesamiento sofisticado de la señal permite que un receptor de GPS compare señales de cómo mínimo cuatro satélites para proveer lecturas precisas de la posición tridimensional, de la velocidad y del tiempo horario. Estas señales son accesibles desde cualquier lugar de la tierra y con cualquier clima. A pesar de haber sido desarrollado para el uso militar, el GPS tiene extensas aplicaciones en el campo civil.



Las capacidades del GPS fomentaron las exploraciones petroleras lejos de la costa y a redujeron los peligros y costos en las operaciones con buques tanque.

El sistema global de posicionamiento NAVSTAR es un sistema de navegación basado en satélites pertenecientes al Departamento de Defensa de los EEUU, desarrollado bajo la dirección de la Fuerza Aérea.

Para sus sistemas de precisión horaria, el GPS, utiliza relojes atómicos de Cesio y Rubidio. Envía señales codificadas digitalmente en la banda L, con lo que se logra precisión y rechaza interferencias. Por cuestiones de tamaño y costo sus circuitos son microchips. Son emplazados en su órbita mediante el Trasbordador espacial de la NASA (Space Shuttle).

El GPS posee una constelación de más de 24 satélites en órbitas circulares de 12 horas (20.190 km de altura) en planos orbitales inclinados. Esta constelación asegura una geometría usuario- satélite favorable a lo largo del planeta para una navegación exacta y continua.

Las señales del GPS son emitidas en la banda L en dos frecuencias de bajada. L1 y L2, en 1575,42 y 1227,6 MHz. Estas señales son codificadas en portadoras ortogonales con dos únicos códigos de ruido semialeatorio de modulación bifásica (biphase-modulated pseudorandom-noise codes). Un código corto de 1023 bits con una relación de reloj (clock rate) de 1023×10^6 bits por segundo, llamado Coarse/Adquisition, también conocido como código C/A, y otro muy largo, un código de "grano fino" (fine-grained) llamado el Preciso o código P.



El código C/A es utilizado para recibir la señal rápidamente y puede ser empleado para navegaciones que requieran poca precisión. El código P se usa en la navegación y coordinación horaria (timing) de alta precisión.

Estas señales GPS, L1 y L2, también incluyen un mensaje computado de 1500 bits conteniendo parámetros que describen la efemérides del satélite y las correcciones del reloj satelital. Estos datos se agregan a una variedad de códigos a un ritmo de 50 bits por segundo antes de modular la portadora. La efemérides y parámetros del estado del reloj permiten al usuario calcular la posición de cada satélite al tiempo de la transmisión de la señal.

La frecuencia dual de la portadora de transmisión permite determinar de forma precisa la demora ionosférica variable y de ser necesaria compensada. De ahí que, el efecto de las perturbaciones ionosféricas que plagaban los otros sistemas de navegación pueda ser eliminado con el uso de receptores de canal dual (dual-channel receiver).

La primer medición ejecutada por los receptores GPS es el tiempo aparente de propagación de la señal codificada transmitida desde cada uno de los satélites al usuario. Luego se determina la demora entre la secuencia codificada recibida desde un satélite particular y su réplica local generada con el receptor. Esta demora multiplicada por la velocidad de la luz es conocida como pseudoalcance (pseudorange). Esto se debe a que sumada al alcance de la demora actual, se obtiene una fase desconocida de compensación entre el tiempo GPS y el reloj del receptor. Haciendo el mismo tipo de medición con las señales de por lo menos cuatro satélites se pueden resolver simultáneamente al menos cuatro ecuaciones para las tres coordenadas de la posición del usuario y la compensación del



reloj del receptor (receiver clock off-set). La precisión de esta medida depende del código utilizado.

La base para determinar la posición exacta del GPS (y su tiempo) es la medición precisa del tiempo que tardan en llegar al receptor las señales radiadas desde varios satélites de la constelación. (En el año 2001 un receptor GPS de 12 canales cuesta U\$S 110). Los satélites llevan relojes atómicos ya que la exactitud horaria es esencial. Para prevenir una rotura catastrófica del reloj durante la vida útil del satélite, se colocan tres en cada unidad. Estos relojes, en promedio, pierden o ganan un segundo en 30.000 años, mientras que cada satélite se diseña para durar entre cinco y siete años.

Para utilizar el GPS y obtener altos niveles de precisión se debe tener mucho cuidado con el modelo y corregir cualquier error en la demora de recepción de la hora tal como la pulsación del reloj o la demora de propagación. Los satélites son monitoreados continuamente y las correcciones de los errores son transmitidas al satélite individual para que lo incluya en su señal generada, de tal forma que el receptor pueda corregir tiempo y posición automáticamente.

La señal del satélite da posición de efemérides $(X1, Y1, Z1)$, $(X2, Y2, Z2)$,y el factor de corrección de tiempo para un satélite en forma individual.



$$(X1 - UX)^2 + (Y1 - UY)^2 + (Z1 - UZ)^2 = (R1 - CB)^2 \quad -1-$$

$$(X2 - UX)^2 + (Y2 - UY)^2 + (Z2 - UZ)^2 = (R2 - CB)^2 \quad -2-$$

$$(X3 - UX)^2 + (Y3 - UY)^2 + (Z3 - UZ)^2 = (R3 - CB)^2 \quad -3-$$

$$(X4 - UX)^2 + (Y4 - UY)^2 + (Z4 - UZ)^2 = (R4 - CB)^2 \quad -4-$$

$$R1 = c (AT1)$$

$$R2 = c (AT2)$$

$$R3 = c (AT3)$$

$$R4 = c (AT4)$$

Si se reciben señales de cuatro satélites las ecuaciones 1 a 4 pueden resolverse de manera simultánea para cuatro incógnitas: las coordenadas de la posición del usuario (UX, UY, UZ) y la inclinación del reloj del usuario CB (User's clock bias Cb). En estas ecuaciones R1,R2, . . . Rn, son las trayectorias aparentes (apparent range) desde el usuario al satélite dadas por las ecuaciones auxiliares. En estas últimas c es la velocidad de la luz y AT1, AT2,. . . ,son las diferencias entre los tiempos de transmisión y el tiempo del usuario.

Si el receptor del usuario tuviese un reloj muy preciso, solo se requerirían tres satélites. Si solamente hiciese falta conocer la posición en dos dimensiones (latitud y longitud) y el tiempo, tres satélites darían mediciones en tiempo real.

Si bien el GPS fue , diseñado para conocer posición y tiempo con exactitud, provee además mediciones precisas de la velocidad del usuario.

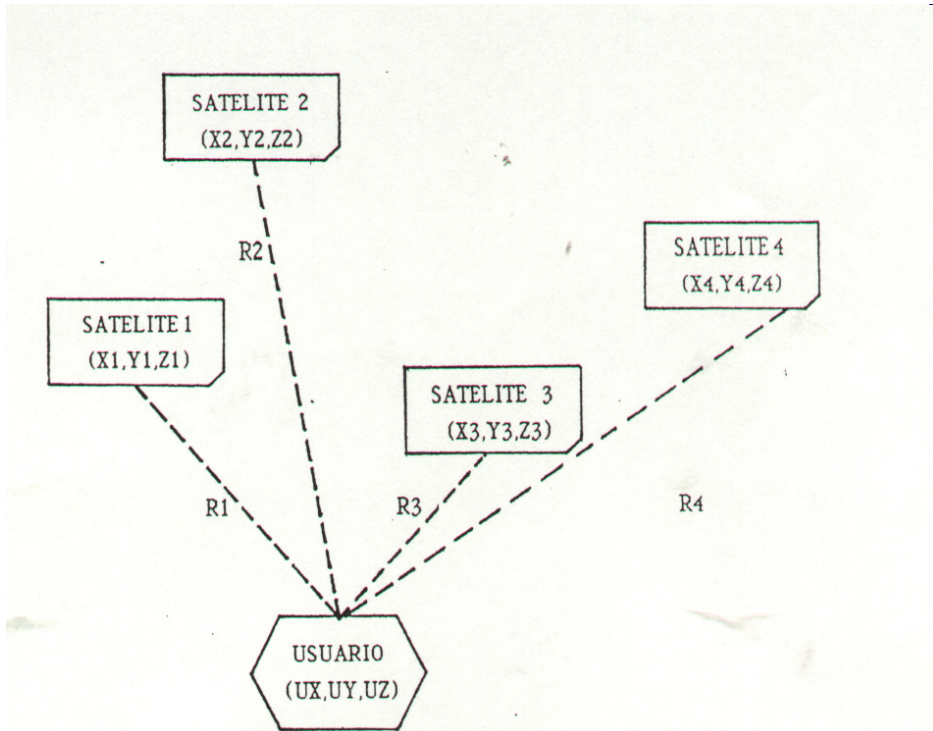


FIGURA .3.1 = MODELO PARA CÁLCULOS MATEMÁTICOS EN EL GPS

Esto lo logra midiendo las variaciones Doppler en la frecuencia de la portadora transmitida. La exactitud está influenciada por la dinámica del vehículo que alberga el receptor. Una precisión normal de la velocidad es de 0,03 m/s. La misma puede ser computada gracias al conocimiento del movimiento del satélite provisto por los datos del mensaje del navegador. Como se anticipó, el sistema GPS utiliza de 18 a 24 satélites, de los cuales 18 están en uso y el resto de repuesto. Se utilizan órbitas de doce horas con una inclinación orbital de 63° . Los satélites se dividen en tres grupos de ocho, en planos orbitales separados cada 120° . Esta configuración permite un servicio terrestre total con cuatro satélites continuamente en el horizonte. A medida que los satélites se descompongan estos serán reemplazados por nuevos.

Cuando solo había seis satélites se podían lograr precisiones menores al metro, aunque esto se limitaba a las pocas veces que el usuario podía ver cuatro.



La potencia de la señal transmitida esta dada en la siguiente tabla:

SEÑAL	POTENCIA
L1 C/A	+ 26,8 dBW
L1 P	+ 23,8 dBW
L2 P o C/A	+ 19,1 dBW

4 - CLASIFICACION DE USUARIOS Y RECEPTORES

El GPS ha sido validado por el departamento de Defensa de los EEUU luego de someterlo a pruebas extensivas. La precisión obtenida usando el código C/A probó ser mucho más ajustada de lo previsto. Se temió poner las capacidades del GPS en disposición de un potencial enemigo. En reconocimiento a este problema, el Departamento de Estado informó que los futuros satélites tendrán la capacidad de restringir el código P al uso militar y a usuarios autorizados. La performance del código C/A será reducida a niveles basados en la seguridad nacional de los Estados Unidos. Inicialmente se proveyó de una precisión de 200 metros ECP (Error Circular Probable). De todas maneras, este punto se revisa cotidianamente de acuerdo a la seguridad y a la utilidad nacional de los norteamericanos. (En el año 2000 el Presidente Clinton levantó la restricción sobre el GPS).

Existen por lo menos dos clases de usuarios civiles de GPS: aquellos que les alcanza una exactitud de 200 metros y aquellos que necesitan una alta precisión para navegar.



El primer grupo incluye a los buques de carga, a los pesqueros, a los aviones livianos, helicópteros y naves espaciales. Los miembros de este primer grupo para navegar en un modo normal pueden utilizar el GPS L1 C /A, con receptores simples. Los miembros del segundo grupo utilizan técnicas de navegación diferencial que se explican más adelante.

5 - MODO NORMAL DE NAVEGACION

A pesar de que una solución completa de navegación (posición tridimensional y tiempo) requiere mediciones de pseudoalcance (pseudo range) desde cuatro satélites solamente, un típico receptor tomará y rastreará secuencialmente todos los satélites a la vista. Esto provee un margen adicional en el caso que algunos satélites se oscurezcan (salgan del horizonte).

El ritmo de secuencia es una función de la dinámica del vehículo del usuario. El receptor de GPS de un avión de línea debe tener una secuencia tal que provea nuevas soluciones cada 3 o 4 segundos, mientras que un pesquero necesita respuestas a un ritmo más pausado.

El usuario en este modo es completamente independiente de controles terrenos o costeros.

6 - TECNICA DE NAVEGACION DIFERENCIAL

Los navegantes que requieren las capacidades de alta precisión del GPS pueden usar una técnica de navegación llamada relativa o diferencial. Esta técnica es utilizada normalmente por otros sistemas de navegación tales como el Loran C. De forma similar



a un posicionamiento relativo, esta técnica permite cancelar errores, comunes a cada observador, como ser variaciones naturales o artificiales del reloj satelital, su efemérides y las demoras de propagación.

La navegación diferencial es apropiada para las aproximaciones de precisión y aterrizaje de aeronaves, aproximación y entrada a puerto de embarcaciones marítimas y para relevamientos geofísicos o mensuras en áreas remotas.

Se coloca un receptor GPS en un punto cuyas coordenadas son conocidas, tales como la entrada de un puerto, el fin de una pista de aterrizaje o un pozo petrolero en el polo norte. El receptor de la estación base determina su posición presente con el GPS, lo compara con la aceptada y envía, mediante un enlace de datos, el error resultante a un receptor GPS móvil. Este último utiliza esta información junto con la recibida por su propio GPS y elimina el mismo error en la solución de su posición. Los errores están altamente correlacionados para todos los usuarios en las cercanías de la estación base. De ahí que la corrección del error mejore a medida que el usuario se aproxima a la estación de referencia.

Las mejoras en la precisión fueron estudiadas con simulaciones. Para el código degradado C/A la técnica diferencial mejora la precisión horizontal de 250 a 5 metros y la altitud de 250 a 9 metros. La precisión lograda con la señal de frecuencia no degradada C/A es aún mejor. La navegación diferencial utilizando solo el código L1 C/A puede proveer mayor precisión que el código L1 P en el modo no diferencial o normal.

Como se mencionó anteriormente, los efectos ionosféricos pueden ser eliminados con el uso de un receptor de canal dual.



De todas maneras, los receptores civiles suelen ser de bajo costo y un solo canal. El uso de la técnica diferencial elimina la necesidad del canal dual y provee una compensación relativamente exacta para las demoras ionosféricas.

El gran factor limitante de esta técnica es que necesita un enlace computarizado entre la estación base y el vehículo del usuario. Esto le da un costo adicional y restringe el uso del sistema a un área localizada. A pesar de esto, como la precisión es necesaria en la aproximación al puerto o a la pista, tenemos que la exactitud del GPS diferencial aumenta cuando el usuario se aproxima a la parte más crítica de su trayecto, el aterrizaje o la entrada a puerto.