

RECOMENDACIÓN UIT-R M.1088

**CONSIDERACIONES RELATIVAS A LA COMPARTICIÓN CON SISTEMAS
DE OTROS SERVICIOS QUE FUNCIONAN EN LAS BANDAS ATRIBUIDAS
AL SERVICIO DE RADIONAVEGACIÓN POR SATÉLITE**

(Cuestión UIT-R 83/8)

(1994)

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el sistema mundial de determinación de la posición (GPS, Global Positioning System) proporciona información mundial precisa sobre la navegación en tres dimensiones a estaciones situadas en el aire, en la tierra y en el mar;
- b) que las bandas 1 215-1 240 MHz y 1 559-1 610 MHz están atribuidas a título primario respectivamente a los servicios de radiolocalización y de radionavegación por satélite y a los servicios de radionavegación aeronáutica y de radionavegación por satélite en las tres Regiones;
- c) que muchas administraciones asignan además la banda 1 215-1 240 MHz a título primario a estaciones de los servicios fijo, móvil y de radionavegación y la banda 1 559-1 610 MHz a título primario a estaciones del servicio fijo;
- d) que cualquier estación terrena adecuadamente equipada puede recibir información de navegación del GPS a escala mundial;
- e) que, como el GPS realiza una función destinada a la radionavegación, se reconoce que proporciona un servicio de seguridad y por lo tanto requiere medidas especiales para asegurar que está libre de interferencia perjudicial,

recomienda

1. que para evaluar la compartición con el GPS se utilicen las características y la descripción del sistema que figura en los anexos 1 y 2.

ANEXO 1

**Características del receptor GPS
(para receptores de navegación aérea típicos, de bajo costo)**

Frecuencia portadora L1:	1 575,42 MHz
Frecuencia portadora L2:	1 227,6 MHz
Frecuencia de segmentos del código P:	10,23 Mbit/s
Frecuencia de segmentos del código C/A:	1,023 Mbit/s
Velocidad de transmisión de los datos de navegación:	50 bit/s
Proporción de bits erróneos no detectados:	10 ⁻⁵
Nivel de potencia recibido mínimo (L2, P):	-136 dBm
Nivel de potencia recibido mínimo (L1, P):	-133 dBm
Nivel de potencia recibido mínimo (L1, C/A):	-130 dBm
Nivel de limitación del preamplificador:	-40 dBm
Nivel de destrucción del preamplificador:	30 dBm promedio 40 dBm cresta
Tiempo de recuperación de sobrecarga:	1 segundo
Anchura de banda del filtro en RF a 3 dB:	± 17 MHz

Anchura de banda del filtro en RF a 45 dB:	± 50 MHz
Aislamiento entre $L1$ y $L2$:	40 dB
Factor de ruido del receptor:	3 dB
Margen I/S de adquisición normal ($L1$, C/A):	24 dB
Margen I/S de seguimiento en el estado 5 ($L1$, C/A):	31 dB
Margen I/S de seguimiento en el estado 5 ($L1$, P):	41 dB

ANEXO 2

Descripción técnica y características del sistema mundial de determinación de la posición (GPS)

1. Sistemas GPS

1.1 Introducción

El sistema mundial de determinación de la posición consiste en 24 posiciones de satélite con 4 posiciones de satélite en cada uno de los 6 planos orbitales espaciados uniformemente con una inclinación de 55° . Cada satélite transmitirá dos frecuencias idénticas para señales de navegación. Dichas señales se modulan con un tren de bits predeterminado, que contiene datos de efemérides y tiempo codificados, y su anchura de banda es suficiente para dar la precisión de navegación necesaria sin recurrir a la transmisión bidireccional o a la integración Doppler. El sistema proporcionará una determinación exacta tridimensional de la posición en cualquier punto de la superficie de la Tierra o en sus proximidades.

1.1.1 Necesidades de frecuencias

Las necesidades de frecuencias del sistema GPS se basan en una evaluación de la precisión que necesitan los usuarios, de la resolución del retardo de propagación espacio-Tierra, de la supresión de los trayectos múltiples, y de las configuraciones y costo de los equipos. Se han seleccionado dos canales para las operaciones GPS: 1 575,42 MHz ($L1$) y 1 227,6 MHz ($L2$). El canal $L1$ determina la ubicación de un usuario con una precisión de 150 m. Una segunda señal transmitida por ambos canales $L1$ y $L2$, proporciona la diversidad de frecuencia necesaria y una anchura de banda mayor con vistas a incrementar la precisión en la determinación de la distancia, de manera que la resolución del retardo de propagación Tierra-espacio y la supresión de trayectos múltiples aumentan la precisión total en un orden de magnitud. Las señales de telemetría y mantenimiento entre las instalaciones de control situadas en Estados Unidos de América y el satélite, se transmitirán en la banda asignada a la telemetría en Estados Unidos de América.

El GPS proporcionará un servicio de navegación mundial. Los requisitos de seguridad de la navegación (véase el número 953 del Reglamento de Radiocomunicaciones) exigidos por un servicio como éste, subrayan la importancia crucial de que otros servicios radioeléctricos no ocasionen interferencias perjudiciales a los receptores GPS.

1.2 Visión global del sistema

El GPS es un sistema continuo de radionavegación, determinación de la posición y transferencia de la hora, basado en el espacio, capaz de funcionar en todas las condiciones meteorológicas, que proporcionará información tridimensional de posición y velocidad sumamente exacta junto con una referencia de hora común precisa a los usuarios equipados de manera adecuada en cualquier punto de la superficie de la Tierra o en sus proximidades.

El sistema funciona según el principio de la triangulación pasiva. El equipo de usuario GPS mide primero las pseudodistancias a cuatro satélites, calcula sus posiciones y sincroniza su reloj con el GPS utilizando las efemérides recibidas y los parámetros de corrección del reloj. Después, determina la posición tridimensional del usuario en un sistema de coordenadas cartesianas WGS-84 centrado y fijo con relación a la Tierra, así como el desplazamiento del reloj del usuario con respecto a la hora GPS, esencialmente mediante el cálculo de la solución simultánea de cuatro ecuaciones de distancia.

De modo similar, pueden estimarse la velocidad tridimensional del usuario y el ritmo de su reloj, resolviendo cuatro ecuaciones de velocidad, dadas las mediciones de pseudovelocity con respecto a los cuatro satélites. Las mediciones se denominan «seudo» debido a que se hacen con un reloj impreciso de usuario y contienen términos con errores sistemáticos procedentes de las desviaciones del reloj del usuario con respecto a la hora GPS.

El GPS proporciona dos niveles de precisión de navegación: el servicio de determinación precisa de la posición (PPS, «Precise Positioning Service») y el servicio de determinación normal de la posición (SPS, «Standard Positioning Service»). Las precisiones horizontal, vertical y temporal son 18 m, 30 m y 170 ns respectivamente para el percentil 95 en el caso del PPS. Las precisiones correspondientes en el caso del SPS son respectivamente 100 m, 166 m y 330 ns. La precisión de la velocidad derivada del PPS depende casi totalmente del diseño del receptor y de las condiciones dinámicas del usuario, pero puede lograrse típicamente una precisión de 0,2 m/s por eje en el percentil 95.

1.3 Descripción del sistema

El sistema consta de tres segmentos principales: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario. La función principal de cada segmento se describe a continuación.

1.3.1 Segmento espacial

El segmento espacial comprende los satélites GPS, que funcionan como puntos de referencia «celestes» y emiten señales de navegación con codificación precisa de la hora desde el espacio. Tal como está planeado actualmente, la constelación operacional de 24 satélites funcionará con órbitas de 12 h y semieje mayor de unos 26 600 km. Los satélites estarán colocados en seis planos orbitales inclinados 55° con respecto al ecuador. Habrá cuatro satélites por plano. Se optimizará la fase relativa de los satélites para proporcionar visibilidad de al menos cinco satélites a los usuarios a 5° por encima del horizonte.

El satélite es un vehículo estabilizado en los tres ejes. Los elementos esenciales de su principal carga útil de navegación son la frecuencia atómica patrón para la hora exacta, el procesador para almacenar los datos de navegación, el dispositivo de señales de ruido pseudoaleatorio para generar la señal de distancia, y la antena transmisora en la banda 1,2/1,6 GHz cuyo patrón de ganancia perfilado radia señales de potencia casi uniforme en las dos frecuencias de la banda 1,2/1,6 GHz a los usuarios que están en la superficie de la Tierra o en sus proximidades. La transmisión de dos frecuencias se hace para permitir la corrección de los retardos ionosféricos en el tiempo de propagación de las señales.

1.3.2 Segmento de control

El segmento de control lleva a cabo las funciones de seguimiento, computación, actualización y comprobación que se requieren para controlar diariamente todos los satélites del sistema. Consta de una Estación de Control Principal situada en Colorado Springs (Estados Unidos de América), donde se efectúa todo el tratamiento de datos, y cinco estaciones de comprobación situadas a gran distancia unas de otras, en las islas Ascensión, Diego García, Kwajalein, Colorado Springs y Hawai. Las antenas terrestres para el mantenimiento de los satélites están situadas en el mismo emplazamiento que tres de las estaciones de comprobación.

Las estaciones de comprobación siguen de manera pasiva a todos los satélites que están a la vista y acumulan datos de distancia y velocidad. Estos datos se procesan en la estación de control principal para calcular las efemérides de los satélites, las derivas de los relojes y los retardos de propagación, y se utilizan después para generar mensajes destinados a los satélites. Esta información actualizada se transmite por lo menos tres veces cada día a los satélites, para su almacenamiento en memoria y ulterior transmisión a los usuarios como parte de los mensajes de navegación.

1.3.3 Segmento de usuario

El segmento de usuario es el conjunto de todos los equipos de usuario y sus equipos de soporte. El equipo de usuario consiste típicamente en una antena, un receptor/procesador GPS, un computador y dispositivos de entrada/salida. Adquiere y sigue las señales de navegación procedentes de los cuatro o más satélites que se ven, mide sus tiempos de propagación y desplazamientos de frecuencia por efecto Doppler, los convierte en pseudodistancias y pseudovelocidades, y determina mediante estos datos la posición tridimensional, la velocidad y la hora del sistema. Los equipos de usuario abarcan desde receptores relativamente simples, ligeros y portátiles, hasta receptores perfeccionados integrados con otros sistemas o sensores de navegación para una buena calidad de funcionamiento en condiciones sumamente dinámicas.

1.4 Estructura de la señal GPS

La señal de navegación GPS transmitida desde los satélites consiste en dos portadoras moduladas: $L1$ en la frecuencia central de 1575,42 MHz ($154 f_0$) y $L2$ en la frecuencia central de 1227,6 MHz ($120 f_0$), donde $f_0 = 10,23$ MHz. f_0 procede de la frecuencia atómica patrón que se halla a bordo de los satélites, y con ella están relacionadas de modo coherente todas las señales generadas.

La señal $L1$ se modula con código de ruido pseudoaleatorio de adquisición precisa (P) y de adquisición aproximada (C/A), cada uno de los cuales se agrega en módulo 2 a un tren de datos de navegación binarios a 50 bit/s antes de la modulación de fase. El código P es una larga secuencia binaria pseudoaleatoria de ceros y unos con un ritmo de 10,23 MHz y un periodo de exactamente una semana. Se reinicia a la medianoche de cada sábado, sirviendo y sirve así como indicador del tiempo de la semana en el vehículo espacial. El código C/A es un código corto, con un ritmo de 1,023 MHz y un periodo de exactamente 1 ms.

La señal $L2$ tiene modulación bifásica ya sea con el código P o el código C/A , según la orden transmitida desde tierra. El mismo tren de datos a 50 bit/s se agrega en módulo 2 al código antes de la modulación de fase, tal como se hace en la señal $L1$. Durante las operaciones normales, se transmitirá el código P en la señal $L2$.

La modulación bifásica de la portadora transforma las secuencias binarias de código de ruido pseudoaleatorio en secuencias de $+1$ y -1 , y transforma la adición módulo 2 en multiplicación. De esta manera, las señales $L1$ y $L2$ transmitidas por el satélite pueden describirse como una función del tiempo.

Las funciones de los códigos de ruido pseudoaleatorio son de dos órdenes:

- proporcionan buenas propiedades de acceso múltiple entre los diferentes satélites, dado que todos los satélites transmiten en las mismas frecuencias portadoras y se diferencian entre sí solamente por el par único de códigos P y C/A que transmiten, y
- sus propiedades de correlación permiten la medición precisa del tiempo de llegada y el rechazo de las señales de interferencia y por trayectos múltiples.

El tren de datos a 50 bit/s proporciona el mensaje de navegación formatizado en cinco subtramas de 6 s. Cada subtrama, consistente en 10 palabras de 30 bits, comienza con una palabra de teledada (TLM) y la palabra de paso (HOW) del código C/A al código P . Esta última permite que el paso de C/A a P se haga al terminar cualquier subtrama de 6 s. Las primeras tres subtramas contienen los datos de corrección del reloj y de efemérides del satélite que se está siguiendo. Normalmente, estos mensajes son válidos durante un periodo de cuatro horas.

Las subtramas 4 y 5 contienen la información que define con menor precisión las efemérides de todos los satélites de la constelación, así como la descripción del estado del satélite, mensajes especiales, el desplazamiento de la hora GPS con respecto al tiempo universal coordinado (UTC), etc. Hay 25 páginas de datos para cada una de las subtramas 4 y 6, que se transmiten en una página que rota. Por consiguiente, lleva 6 s el recibir una página y 2,5 min el recibir las 25 páginas de datos.

1.5 Espectros y potencia de la señal

Los satélites GPS emplean una antena de haz perfilado que radia potencia casi uniforme hacia los usuarios del sistema. Las señales transmitidas están polarizadas circularmente hacia la derecha, la elipticidad de $L1$ no es peor que 0,7 dB y la de $L2$ no es peor que 2,0 dB para la distancia angular de $\pm 14,3^\circ$ con respecto al eje de puntería. Para un ángulo de elevación del satélite superior o igual a 5° , se especifica -133 dBm como potencia mínima garantizada para la componente del código P de $L1$ y -130 dBm para la componente del código C/A de $L1$. El nivel de potencia correspondiente para $L2$, que transporta únicamente el código P , es de -136 dBm por lo menos. La potencia real recibida de los satélites es normalmente superior en 4 a 5 dB a los valores especificados.

2. Frecuencia de operación

La operación primaria ($L1$) se hace en un segmento de la banda 9 atribuida al servicio de radionavegación por satélite.

3. Funciones de teledada

El GPS es un sistema pasivo. No se necesita un enlace ascendente para la navegación. Por tanto, se ahorra espectro efectuando las funciones de teledada y mantenimiento en las bandas atribuidas a tal efecto.

4. Características del receptor

Diferentes configuraciones de los receptores GPS son adecuadas para las distintas aplicaciones según las condiciones dinámicas de los vehículos que los transportan y la interferencia del entorno. En el anexo 1 se indican las características típicas de un receptor barato, no perfeccionado.

Un equipo de usuario GPS típico consta de cuatro componentes principales: antena, receptor/procesador, computador y unidad de control y visualización. En la mayoría de los casos, la antena es un elemento relativamente simple que proporciona cobertura hemisférica de las dos frecuencias $L1$ y $L2$. Esta antena omnidireccional no tendrá que orientarse de manera especial para recibir las señales de todos los satélites visibles, pero tampoco tendrá mucha capacidad de discriminación espacial contra la interferencia.

La sección de entrada del receptor consiste típicamente en un filtro pasobanda, un preamplificador y un convertidor reductor de frecuencia multiestado. El filtro pasobanda tiene por objeto el rechazo de las señales fuera de la banda. Para evitar que las interferencias de alta potencia dañen el receptor, el conjunto preamplificador/filtro también tendrá un limitador de diodo.

Después de la amplificación y la reducción a una frecuencia intermedia adecuada, el receptor genera una señal de código que intenta corresponder con el patrón del código entrante de un satélite particular. El proceso se llama correlación o contracción del código. Después de la contracción del código, la anchura de banda del receptor se reduce mientras que cualquier señal interferente será expandida por el código de réplica generado localmente. Normalmente, la adquisición se hace sincronizando la señal C/A y transfiriendo enseguida a P . Este es el estado de operación más vulnerable del receptor (estado 1) con respecto a la interferencia externa, ya que todavía no ha adaptado (enganchado) al código.

Una vez adquirido el código, la alineación o sincronización de la señal entrante con la réplica generada localmente se mantiene mediante los bucles de seguimiento de portadora y de código. Con los bucles de portadora y de código enganchados, el receptor puede demodular los datos, medir la seudodistancia y la seudovelocidad. Este estado de operación del receptor (estado 5) puede mantenerse si el nivel de la señal de interferencia es 41 dB más alto que la señal $P L1$ o $P L2$, y 31 dB más alto que la señal $C/A L1$. La mayoría de los diseños de receptor incluyen programas que digitalizan la salida del correlador y ejecutan los bucles de seguimiento, así como otros controles lógicos del receptor.

5. Umbrales de interferencia

El receptor GPS es sensible a dos formas de interferencia. El primer mecanismo de interferencia afecta al diodo limitador de alto nivel en la sección de la entrada RF. El diodo se saturará y evitará la destrucción de las siguientes etapas del receptor cuando el nivel de potencia RF de cresta a la entrada del receptor sea igual o superior a -40 dBm, produciéndose una pérdida temporal de la señal. Si la potencia RF media a la entrada del receptor excede de 1 W o la potencia RF de cresta excede de 10 W, el diodo limitador de alto nivel puede ser destruido.

El segundo mecanismo de interferencia afecta el proceso de detección del receptor GPS. Cuando la interferencia agrega ruido al receptor, afecta la calidad de funcionamiento en lo relativo a la adquisición y al seguimiento, reduciendo la relación señal/ruido en el circuito de detección o en los bucles de seguimiento. El máximo nivel de interferencia que puede tolerar la calidad de funcionamiento en lo relativo al seguimiento sin que aumente significativamente su tiempo de adquisición es de 24 dB por encima del nivel de la señal $C/A L1$. Comparando este nivel de interferencia con la potencia mínima especificada de la señal $C/A L1$, se ha determinado que el umbral de interferencia es de -106 dBm para la adquisición normal. Por encima de este nivel, el tiempo de adquisición se degrada. De modo similar, los umbrales de interferencia para la operación en el estado 5 son -92 dBm para la señal $P L1$ y -99 dBm para la señal $C/A L1$.