

INFORME 766-2 *
 POSIBILIDADES DE COMPARTICIÓN DE FRECUENCIAS
 ENTRE EL GPS Y OTROS SERVICIOS

(Cuestión 83/8)

(1978-1986-1990)

1. Introducción

Este Informe está relacionado con el punto 4 de la parte dispositiva de la Cuestión 83/8, que dice: «¿Es posible la compartición de las frecuencias con otros sistemas y, en caso afirmativo, cuáles son los otros sistemas y en qué condiciones puede hacerse la compartición?». La cuestión se refiere al sistema de radionavegación por satélite — GPS (« — Global Positioning System» — Sistema mundial de determinación de la posición), que proporciona una temporización y una determinación de la posición precisas gracias a dos canales de transmisión satélite-Tierra. El presente Informe trata la posibilidad de que este sistema comparta las bandas de 1215-1240 MHz y 1559-1610 MHz con estaciones terrenales.

En el anexo I se presenta una descripción más detallada del — GPS y se indican las frecuencias seleccionadas.

2. Consideraciones relativas a la compartición de frecuencias

Actualmente, la banda de frecuencias 1215-1240 MHz está atribuida a título primario y con igualdad de derechos a los servicios de radiolocalización y radionavegación por satélite en las tres Regiones. Por consiguiente, se ha insistido especialmente en la posibilidad de compartición con dichas estaciones, aunque se han considerado también detalladamente otros servicios a los que está atribuida esta banda, es decir, los servicios fijo, móvil y radionavegación.

3. Compartición de frecuencias entre el — GPS y los servicios de radiolocalización y radionavegación

Los servicios de radiodeterminación que funcionan actualmente en la banda 1215-1240 MHz, atribuida a la radiolocalización, utilizan casi exclusivamente emisiones de las clases P0N y XXX con ciclos de trabajo entre 10^{-2} y 10^{-3} .

3.1 Interferencias al — GPS

El receptor básico del — GPS está diseñado para trabajar en frecuencias utilizadas por servicios que funcionan por impulsos. Se utilizan limitadores de alta velocidad y rápido restablecimiento en la unidad de acceso, a fin de evitar que los impulsos de alta energía dañen al receptor. Además, circuitos limitadores de amplitud, de frecuencia intermedia, mantienen esencialmente las tensiones máximas de los impulsos al mismo nivel que la cresta de ruido.

La estructura de modulación y la lógica del sistema son tales que es fundamentalmente invulnerable a las señales de radar normales. La señal pseudoaleatoria de desplazamiento de fase con una velocidad binaria superior a 10 MHz se comprime en una anchura de banda de información de 50 Hz, lo que proporciona una relación de protección extremadamente amplia contra todo tipo de interferencias con una anchura de banda inferior a las emisiones del GPS. Los resultados de diversos estudios realizados han demostrado que un sistema de este tipo, una vez sincronizado, puede trabajar satisfactoriamente en un medio de emisiones de impulsos cuyo ciclo de trabajo sea mucho más elevado que cualquier otro en explotación [USA, 1976].

* Se ruega al Director del CCIR que señale este Informe a la atención de la Organización Marítima Internacional (OMI) y de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI).

3.2 *Interferencia del**GPS a los servicios de radiolocalización y radionavegación*

La señal transmitida desde el satélite del GPS tiene una densidad de flujo de potencia uniforme sobre la porción visible de la Tierra, y aparecerá como una señal semejante al ruido en una banda de aproximadamente 20 MHz. La mayoría de los radares que funcionan en la banda 1215-1240 MHz tienen anchuras de banda de FI muy inferiores a 20 MHz y, en consecuencia, recibirán una señal semejante al ruido con una densidad espectral de potencia plana en la banda de paso del receptor. La amplitud de esta señal será una función de la ganancia de la antena del receptor del sistema de radiolocalización en la dirección del satélite, y la repercusión en el funcionamiento del sistema de radiolocalización dependerá de la relación entre esta amplitud de señal y la densidad espectral de potencia de ruido del receptor o el umbral del receptor.

Las ganancias de antena y los factores de ruido del receptor para el equipo de radiolocalización que funciona en la banda 1215-1240 MHz serán sumamente variables, en función de la misión del sistema. En este Informe será conveniente utilizar el concepto de la relación ganancia/temperatura de ruido de la antena (G/T) para evaluar la influencia de la señal del **GPS** en los sistemas de radiolocalización.

3.3 *Sensibilidad del radar*

Virtualmente todos los radares funcionan muy próximos a su nivel de ruido a fin de maximizar la detectabilidad del sistema. Por lo general, hay un nivel de umbral establecido entre 5 y 15 dB por encima del nivel de ruido, con objeto de optimizar el compromiso entre suprimir las crestas de ruido y otras respuestas anómalas (falsas alarmas) y detectar las señales deseadas. La potencia de interferencia desde muy por debajo del nivel de ruido hasta justamente debajo del nivel de umbral se manifiesta en forma de número creciente de falsas alarmas. El nivel de potencia de interferencia en la entrada del receptor del radar se expresa por:

$$(I)_{dB} = (SPFD)_{dB} + (A_e)_{dB} + (B)_{dB} \quad (1)$$

en donde

$(I)_{dB}$ significa $10 \log I$,

I : Potencia de interferencia (W),

$SPFD$: Densidad espectral de flujo de potencia del GPS en la superficie de la Tierra ($W/(m^2 \cdot Hz)$),

A_e : Abertura efectiva de la antena de recepción en tierra en la dirección del satélite,

B : Anchura de banda del receptor en tierra (Hz),

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (2)$$

en donde

G : Ganancia de la antena de recepción en tierra,

λ : Longitud de onda GPS = 0,2444 m,

$$(I/N)_{dB} = (I)_{dB} - (kTB)_{dB} \quad (3)$$

en donde

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ julios/ K^{-1} ,

T : Temperatura de ruido del receptor (K),

B : Anchura de banda de ruido del receptor (Hz),

I/N : Relación interferencia/ruido del receptor que produciría degradación apreciable.

De las ecuaciones (1), (2) y (3) tenemos:

$$(G/T)_{dB} = -205,4 + (I/N)_{dB} - (SPFD)_{dB} \quad (4)$$

en donde

$(G/T)_{dB}$: Máxima relación ganancia de antena en tierra/temperatura de ruido del receptor para la que no excederá la relación interferencia/ruido límite.

Se ha determinado que la densidad espectral de flujo de potencia que produce la señal L2 (véase el anexo I) en un sistema GPS a plena capacidad, es $-200,0 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot \text{Hz))}$. Este valor comprende un margen para el envejecimiento del satélite, el desvanecimiento de la señal, etc. Sustituyendo este valor en la ecuación (5):

$$(G/T)_{\text{dB}} = (I/N)_{\text{dB}} - 5,4 \quad (5)$$

El valor de I/N variará con el tipo de radar y algunos de sus circuitos básicos. Para un valor de $I/N = 0 \text{ dB}$, la proporción de falsas alarmas en un radar PPI sencillo, sin circuitos de supresión de ecos parásitos, interferencia intencional o interferencia simple, se degradaría de 10^{-n} a $10^{-(n/2)}$ si la relación G/T en la dirección del satélite _____ GPS fuera superior a $-5,4 \text{ dB}$ [Barton, 1965]. La gama de valores aceptables de I/N podría extenderse desde -10 dB para sistemas muy sensibles, hasta valores superiores a $+20 \text{ dB}$ para sistemas con supresión automática de ecos parásitos y circuitos antiinterferencia intencional.

Para el resto de esta discusión, se supondrá un valor de 0 dB para I/N .

3.4 Variación en la relación G/T

En la banda 1215-1240 MHz, las antenas varían entre 1,80 m y 12 a 15 m para una gama de ganancias de 19 dB a 35 dB . La gama de factores de ruido varía de algunos dB a $+15 \text{ dB}$. A continuación se da la relación G/T para la iluminación del haz principal del satélite, para tres sistemas representativos:

- Un pequeño radar transportable, con una antena de 3 metros y un factor de ruido de 9 dB , tendría una G/T de -10 dB .
- Un radar grande de búsqueda, con una antena de 15 metros y un factor de ruido de 5 dB , presentaría una G/T de $+10 \text{ dB}$.
- Los sistemas de seguimiento espacial, con redes directivas de antenas en fase de 30 metros y factores de ruido de sólo $1,5 \text{ dB}$, tendrían una G/T de hasta $+26 \text{ dB}$.

Estos ejemplos muestran que los pequeños radares transportables podrían funcionar con una degradación ligera o imperceptible, mientras que los sistemas mayores podrían encontrar dificultades para la explotación cocanal.

4. Compartición con los servicios fijo, móviles y otras estaciones del tipo de onda continua

4.1 Interferencia causada por el _____ GPS a las estaciones de los servicios fijo y móvil

Se han especificado los límites de la densidad de flujo de potencia producida en la superficie de la Tierra por las estaciones espaciales del servicio fijo por satélite que comparten frecuencias con el servicio fijo. Dichos límites figuran en la Recomendación 357 para las bandas comprendidas entre $1,7 \text{ GHz}$ y 23 GHz . Extrapolando estos datos a una frecuencia más baja, por ejemplo, $1,2 \text{ GHz}$, una densidad de flujo de potencia de $-156 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 4 \text{ kHz))}$ sería suficiente para, la compartición del _____ GPS, con los servicios fijo y móviles. El valor de $-164 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 4 \text{ kHz))}$, anteriormente indicado para la señal L2 del _____ GPS, no deberá plantear dificultades. Es improbable que estos servicios sufran degradación a menos que se utilicen antenas de elevada ganancia, como las de los sistemas de dispersión troposférica.

4.2 Análisis de la compatibilidad electromagnética entre un receptor de banda ancha GPS y la correspondencia pública aeronáutica terrenal

En esta sección se examina la interferencia en el caso de un receptor GPS de banda ancha que utiliza tanto código de adquisición con precisión (P) como código de adquisición aproximada (C/A) para el ruido pseudoaleatorio. No se examina la interferencia en el caso de un receptor GPS de banda estrecha que utiliza solamente un código C/A.

Como se observa en el cuadro de las características del receptor GPS que figura en el Anexo I (es decir, para el caso de un receptor típico de bajo coste para la navegación aérea), no hay mucho filtrado en 1 593 - 1 594 MHz. Muchos receptores fabricados en la actualidad presentan a lo sumo una atenuación de 3 dB debida al filtro y, en consecuencia, la señal del enlace Tierra-aire de la Correspondencia Pública Aeronáutica (CPA) aparece como una fuente de interferencia. Se necesitan más estudios sobre la atenuación que puede lograrse con el filtro de RF, especialmente en la medida en que se trata de un factor crítico para la compartición de frecuencias.

El primer paso para determinar la distancia necesaria entre la aeronave y la base CPA consiste en calcular la fuerza de la señal CPA a la entrada del receptor GPS aeronáutico después de las pérdidas por propagación en el espacio libre, mediante la ecuación siguiente:

$$P_R = P_T + G_T + G_R - FDR - L_P \quad (1)$$

donde:

P_R = potencia de la señal recibida, en dBm

P_T = salida de potencia del transmisor, en dBm

G_T = ganancia de antena del transmisor, en dBi

G_R = ganancia de antena del receptor, en dBi

FDR = atenuación dependiente de la frecuencia, en dB

L_P = pérdida de propagación en el trayecto, en dB.

Para la antena del GPS, G_R vale normalmente 0 dBi, y FDR tiene un valor de 3 dB. En la ecuación anterior se supone que no hay apantallamiento por el fuselaje y que el receptor está en la línea de mira del transmisor CPA. La pérdida por propagación, L_P , viene dada por la ecuación (2) (únicamente para pérdidas de propagación en el espacio libre):

$$L_P = 20 \log f + 20 \log D - 27,56 \quad (2)$$

donde:

f = frecuencia transmitida, en MHz

D = distancia, en metros.

Al combinar las ecuaciones (1) y (2) para determinar la distancia y utilizando 30 dBm como nivel de potencia recibida para el criterio de destrucción del limitador, se obtiene la ecuación (3):

$$D = \log^{-1} \{ (P_T + G_T - 20 \log f - 5,44) / 20 \} \quad (3)$$

Suponiendo un transmisor CPA basado en tierra con una p.i.r.e. de 46 dBm en la dirección del receptor GPS, la ecuación anterior da la distancia necesaria para evitar la destrucción del limitador de alto nivel. La distancia es inferior a 1/10 m. De modo similar, empleando -40 dBm como criterio de saturación del limitador, se obtiene un valor de 212 metros como distancia necesaria para evitar la saturación del receptor GPS.

Si se cumplen las separaciones mínimas antes mencionadas, el receptor GPS funcionará sin destruirse ni saturarse; no obstante, la fuerza de la señal indeseada todavía puede rebasar los límites de adquisición, el seguimiento de la señal o ambos. Para la adquisición normal de la señal C/A por el canal L1, el umbral establecido previamente es de -106 dBm. Pero la señal CPA

será expandida por la réplica del código C/A generado localmente durante la correlación. Suponiendo que la señal CPA es una onda continua de banda estrecha, su espectro tendrá una distribución de potencia de $\text{sen}^2 x/x^2$ del código C/A. Los valores nulos del espectro se producen para frecuencias que son múltiples de 1,023 MHz. La porción del espectro de su señal que cae dentro de la anchura de banda de 1 kHz del circuito de detección o dentro de la anchura de banda de 50 Hz del bucle de seguimiento de la portadora corresponde más o menos al 17º lóbulo lateral, debido al desplazamiento Doppler relativo de la frecuencia en $x = 17,5(\pi)$, el nivel de la señal es aproximadamente 35 dB inferior al del lóbulo principal. Agregándole la atenuación de 3 dB del filtro, la atenuación total dependiente de la frecuencia es de 38 dB.

En el cálculo anterior, la atenuación de la señal CPA por el estrechamiento de la anchura de banda del circuito de detección o del bucle de seguimiento se ha excluido dado que ya ha sido tomado en cuenta en la determinación del nivel tolerable de la señal de interferencia. Si se sustituye FDR = 38 dB en la ecuación (1) y se resuelve, se obtiene una distancia de separación necesaria de 7.508 metros para la adquisición de la señal C/A por el canal L1. De modo similar utilizando el umbral de -99 dBm, se obtiene un valor de 3.354 metros como distancia necesaria para el seguimiento de la señal C/A por el canal L1.

La reducción de la señal CPA debida a la expansión producida por el código P en el canal L1 en el proceso de correlación es de aproximadamente 17 dB. Por consiguiente, la FDR es de sólo 21 dB, en vez de los 38 dB para el código C/A L1. Con el mismo método empleado anteriormente y con el umbral de -92 dBm, se calcula una separación necesaria de 10.605 metros para el funcionamiento en el estado 5 del receptor con la señal P L1.

Obsérvese que en los cálculos anteriores no se ha tenido en cuenta el espectro de emisión de la señal CPA propiamente dicha, ya que se desconoce actualmente. Por consiguiente, en el análisis anterior sólo se supone una señal interferente. Pero, en algunas condiciones, puede haber múltiples emisiones procedentes de transmisores CPA. Se requiere un análisis más completo para caracterizar los efectos de interferencia agregados. Se pueden reducir aún más las distancias de separación necesarias para el funcionamiento compatible, mediante la atenuación adicional de las señales indeseadas en 1 593 - 1 594 MHz, pero ello aumentará el tamaño, peso y costo del receptor. El transmisor CPA ubicado en la misma aeronave que el receptor GPS no debería causar interferencia de radiofrecuencia intolerable dado que la frecuencia de operación (1 625,5 - 1 626,5 MHz) está fuera de la anchura de banda del filtro de radiofrecuencia de 45 dB. Por consiguiente, deberán tomarse únicamente las precauciones normales para garantizar el aislamiento entre el receptor GPS y el transmisor CPA.

5. Resumen

5.1 *Compartición con los servicios de radiolocalización y radionavegación*

Hay sistemas de radiolocalización que pueden compartir frecuencias con el _____ GPS en pie de igualdad. Sin embargo, ciertos equipos radar de antena grande podrían sufrir interferencia debida a señales _____ GPS.

5.2 *Compartición con los servicios fijo y móviles*

La densidad de flujo de potencia de la señal del _____ GPS en la superficie de la Tierra parece ser suficientemente baja para excluir la interferencia a estos servicios.

Las transmisiones de las estaciones de los servicios fijo y móviles pueden degradar la recepción del _____ GPS en extensas zonas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARTON, D. K. [1965] *Radar System Analysis*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ., Estados Unidos de América.
- USA Electromagnetic Compatibility Analysis Center [octubre de 1977] An EMC analysis of the GPS receiver in the domestic and foreign environment. USAF Systems Command Electronic Systems Division Technical Report ESD-TR-77-006.
- USA Space and Missile Systems Organization [julio de 1976] Operating frequencies for the NAVSTAR/Global positioning system, Final Report. USAF Air Force Systems Command Report SAMSO. TR-76-197, NTIS Accession No. ADA030164. National Technical Information Service, US Dept. of Commerce, Washington, DC.

ANEXO I

Características técnicas del GPS

1. Sistema mundial de determinación de la posición (GPS)

1.1 Introducción

El Gobierno de los Estados Unidos de América está implantando un sistema de satélites para el servicio de radionavegación por satélite. El sistema propuesto proporcionará una determinación tridimensional exacta de la posición en cualquier punto de la superficie de la Tierra o en sus proximidades.

En su forma operacional, el sistema, conocido como Sistema Mundial de Determinación de la Posición (GPS), constará de 24 posiciones de satélite (21 satélites primarios y 3 reservas activas en órbita), con cuatro posiciones de satélite en cada uno de los seis planos orbitales espaciados uniformemente con una inclinación de 55 grados. Cada satélite transmitirá dos frecuencias idénticas para señales de navegación. Dichas señales se modulan con un tren de bits predeterminado, que contiene las efemérides codificadas; su anchura de banda es suficiente para dar la precisión de navegación necesaria sin recurrir a la transmisión bidireccional o a la integración Doppler.



1.1.1 Necesidades de frecuencia

Las necesidades de frecuencia 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: 1575,42 MHz (L1) y 1227,6 MHz (L2) [USA, 1976]. El canal L1 determina la ubicación de un usuario con una precisión de 150 metros. 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 los Estados Unidos de América y el satélite, se transmitirán en la banda asignada a la telemetría en los Estados Unidos de América.

El GPS proporcionará un servicio de navegación mundial. Los requisitos de seguridad de navegación (véase RR953) exigidos por un servicio como éste subrayan la importancia crucial que tiene el hecho de que los transmisores CPA no ocasionen interferencias graves 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 cualquiera que sea el estado del tiempo, 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 pseudovelocidad 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 metros, 30 metros y 170 ns _____ respectivamente para el percentil 95 en el caso del PPS. Las precisiones correspondientes en el caso del SPS son respectivamente 100 metros, 166 metros 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 21 satélites primarios y tres reservas activas funcionará con órbitas de 12 horas y semieje mayor de unos 26.600 kilómetros. Los satélites estarán colocados en seis planos orbitales inclinados 55 grados 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 grados 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 L cuyo patrón de ganancia perfilado radia señales de potencia casi uniforme en las dos frecuencias de banda 1,5 - 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 (ECP) situada en Colorado Springs, 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 tienen 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 ECP para calcular las efemérides de los satélites, los desplazamientos 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 diarias 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 irán 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 1 575,42 MHz ($154 f_0$) y L2 en la frecuencia central de 1 227,6 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 (RSA) 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 así como indicador del tiempo de la semana en el vehículo espacial. El código C/A es un código corto, cuyo ritmo es de 1,023 MHz y cuyo periodo es 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 RSA 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: 1) proporcionan buenas propiedades de acceso múltiple entre los diferentes satélites, dado que todos los satélites transmiten en las mismas frecuencias portadoras y se diferencian el uno del otro solamente por el par único de códigos P y C/A que transmiten, y 2) 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 segundos de longitud. Cada subtrama, consistente en 10 palabras de 30 bits, comienza con una palabra de telemida (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 segundos. 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 5, que se transmiten secuencialmente y de manera continua. Por consiguiente, lleva 6 segundos el recibir una página y 2,5 minutos 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 gama angular de $\pm 14,3$ grados con respecto al eje de puntería. Para un ángulo de elevación del satélite superior o igual a 5 grados, 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 por lo menos -136 dBm. La potencia real recibida de los satélites es normalmente superior en 4-5 dB a los valores especificados.

2. Frecuencia de operación

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

3. Funciones de telemida

El GPS es un sistema pasivo. No se necesita un enlace ascendente para la navegación. Por tanto, se ahorra espectro efectuando las funciones de telemida 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. Para este análisis de compatibilidad electromagnética entre CPA y GPS se utilizan las características típicas de un receptor barato, no perfeccionado (véase el Cuadro I).

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 pasabanda, un preamplificador y un convertidor reductor de frecuencia multiestado. El filtro pasabanda tiene por objeto la eliminación de las señales fuera de 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 la réplica del código generada 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) el 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. El diodo se saturará y evitará la destrucción de las siguientes etapas del receptor cuando el nivel de potencia de cresta en la entrada del receptor sea igual o superior a -40 dBm, produciéndose una pérdida temporal de la señal. Si la potencia media a la entrada del receptor excede de 1 vatio o la potencia de cresta excede de 10 vatios, el diodo limitador de alto nivel puede destruirse.

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.

6. Trabajos del CCIR

El CCIR ha estudiado atentamente la concepción de estos sistemas durante varios años y aprobando diversas Recomendaciones y varios Informes.

CUADRO ICaracterísticas del receptor GPS

(Para un receptor de navegación aérea típico, 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 errores en los bits 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 RF de 3 dB	± 17 MHz
Anchura de banda del filtro RF de 45 dB	± 50 MHz
Aislamiento entre L1 y L2	40 dB
Cifra 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