

CESEDEN

EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

D. JOSÉ LUIS PROVENZA GUIU

TCol. de Artillería.

EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

NAVSTAR (*The Navigation Satellite Timing and Ranging*) y GPS (*Global Position System*) desarrollado por el Departamento de Defensa de los EE.UU. proporcionará nuevas oportunidades para la Topografía y Geodesia.

Facilita nuevos medios numéricos y técnicas para la medición que las que venían realizando los geodestas en épocas anteriores. Las técnicas GPS requieren no sólo el conocimiento operativo de los receptores sino un amplio conocimiento de los fundamentos matemáticos para un mejor control de calidad de los resultados. Por el momento y sin que todavía se hayan desarrollado nuevas experiencias además de las geodésicas y topográficas de aplicación militar se ha utilizado el sistema GPS para:

- Navegación en tierra.
- Navegación en mar.
- Navegación en aire.
- Navegación espacial.
- Navegación en ríos.
- Navegación en puertos.
- Navegación en vehículos de recreo.
- Hidrografía.
- Alta precisión cinemática.
- Guía de robots y otras máquinas.
- Topografía catastral.
- Densificación de redes geodésicas.
- Fotogrametría.
- Deformación terrestre.
- Control activo de estaciones.

Esta previsto que sean 24 satélites GPS los que formen la constelación final con objeto de eliminar áreas con capacidad de navegación mermada. Esta constelación completa se espera que esté en órbita para el año 1991.

Los satélites transmiten en frecuencias $L1=1.575,42$ Mhz y $L2=1.227,60$ Mhz moduladas con dos tipos de código y con el mensaje de navegación.

Los dos tipos de código son el P y el C/A. Hay dos formas de observación de interés para el usuario una de ellas es "el seudorange" con distancias iguales entre el satélite y el observador y un término correctivo para los errores en tiempo del receptor; dan la posición geométrica de los satélites (efemérides satelitarias) cuatro seudoranges son suficientes para computarizar la posición del receptor y su error cronológico.

La segunda forma es la diferencia entre la fase de la señal transmitida por el satélite y la fase de la señal del oscilador del receptor en el momento de la medida.

Los receptores son programados para hacer observaciones de fase en los mismos intervalos de tiempo. Además los receptores trazan el número de ciclos completo recibidos desde el principio de las mediciones.

Las aproximaciones sucesivas que se siguen son las especificadas en la figura 1.

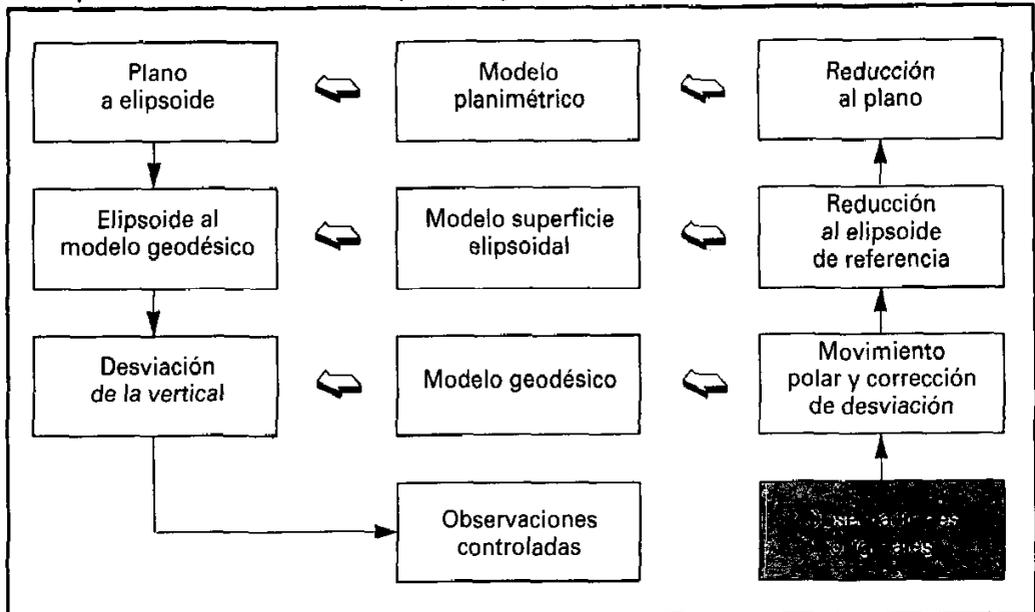


Figura 1.—Aproximaciones sucesivas.

Las medidas satelitarias requieren un conocimiento integrado de disciplinas tales como: Estadística, Astronomía, Geodesia y Electrónica. Porque en el movimiento del satélite en el espacio es necesario relacionar el sistema de coordenadas espaciales y terrestres.

El entendimiento de las capacidades y limitaciones del GPS requiere también el conocimiento de la mecánica del movimiento orbital y algunos fenómenos que afectan el camino de los satélites.

Para obtener un sistema de medidas con la mayor precisión el problema más importante es la elección de un sistema de coordenadas con dos opciones que pueden configurar estos sistemas para una tierra prefijada y para un espacio prefijado.

Antes el modelo de tierra utilizado era un sólido rígido en el que se estudiaba la rotación de ejes en el Espacio teniendo en cuenta la gravedad, pero ahora son necesarios modelos más realistas, modelos elásticos o modelos con masa líquida en su centro.

Las técnicas LLR (*Lunar Laser Ranging*), SLR (*Satellite Laser Ranging*), VLBY (*Very Long Baseline Interferometry*) y GPS requieren un sistema de coordenadas definido Sistema Geocéntrico.

El movimiento del interior de la Tierra (mareas terrestres) han llevado a una mayor precisión en la determinación del eje rotacional terrestre que al considerarla como un sólido rígido. Un sistema de coordenadas geocéntrico está sometido a los siguientes movimientos: *precesión y mutación* además del movimiento del Polo, las

causas del movimiento polar no son todavía explicadas plenamente, las modernas técnicas de la Geodesia espacial pueden conducir a un mejor conocimiento de este fenómeno.

Otro de los problemas con el que se encuentra esta técnica es el tiempo, es decir generar una secuencia de intervalos constantes, en la actualidad se utilizan las escalas de oscilación del cristal de cuarzo o los estados de transición de átomos. En Geodesia y Navegación estas escalas de tiempo han de ser relacionadas con la rotación terrestre. Al fin y al cabo la distancia topocéntrica a un satélite está directamente relacionada con la posición rotacional de la Tierra que es una función del tiempo. Porque los relojes atómicos generan escalas de tiempo independientes es necesario coordinar estos tiempos, cuadro 1.

Cuadro 1.—Desafío entre la rotación de la Tierra y los eruditos en materia de medición de tiempos.

<i>Tipo de reloj</i>	<i>Frecuencia de oscilación Ghz</i>	<i>Estabilidad por día</i>	<i>Pérdida de un segundo. (Años)</i>
Cristal de cuarzo	0,005	10^{-9}	3×10^4
Rubidio	6.834,682	10^{-12}	3×10^7
Cesio	9.192,63177	10^{-13}	3×10^8
Hidrógeno maser	1.420,405751	10^{-15}	3×10^{10}

Movimiento de la órbita del satélite

Este movimiento es el resultado de la atracción gravitacional terrestre y otras fuerzas que actúan sobre el satélite como son la atracción de Sol, la de la Luna y la presión sobre el satélite causada por el impacto de partículas de radiación solar. Matemáticamente las ecuaciones del movimiento de los satélites son ecuaciones diferenciales que son resueltas por integración numérica sobre el tiempo. Los algoritmos de la Leyes de Kepler son usados a menudo para definir la posición del satélite en el Espacio. El actual camino del satélite en el plano orbital es una elipse en el más estricto sentido matemático.

El punto focal de la órbita elíptica está en el centro de la Tierra. Las órbitas normales son particularmente usadas para entender y visualizar el movimiento espacial de los satélites.

Las soluciones de las ecuaciones del movimiento pueden ser dadas por simples expresiones analíticas, porque las subsodichas órbitas son función de la posición central del campo gravitacional terrestre que es por demás la mayor fuerza que actúa sobre él. Uno de los usos más comunes de este tipo de órbitas es para la construcción de las partes visibles de la trayectoria del satélite.

El movimiento normal de los satélites está completamente determinado por las Leyes de gravitación de Newton.

El movimiento topocéntrico de un satélite es el movimiento del satélite visto por un observador en la superficie terrestre. Al estar relativamente cerca de la Tierra comparado con las estrellas los movimientos topocéntricos y geocéntricos han de ser cuidadosamente diferenciados. El tiempo entra no sólo en la determinación de la posición del satélite en el sistema de referencia celeste sino para fijar la posición rotacional de la Tierra.

Fuerzas de distorsión son todas aquellas que producen la desviación de la órbita normal simple del satélite, son causadas principalmente por la no esfericidad del potencial gravitacional, la atracción del Sol y de la Luna y la presión de la radiación solar. Los satélites más próximos a la Tierra son afectados por fuerzas adicionales como los arrastres de residuos atmosféricos. Las ecuaciones de movimiento son expresadas en un sistema de coordenadas inerciales correspondientes a la época en que son dadas las condiciones iniciales.

Desde el año 1960 el posicionamiento basado en el Espacio ha sido una meta perseguida por el Departamento de Defensa y la NASA en los EE.UU., uno de los sistemas precursores fue el TRANSIT. Desde sus logros para usos comerciales en el año 1967 el sistema de posicionamiento TRANSIT encontró innumerables aplicaciones en Topografía, y mediciones geodésicas, se estableció una extensa red con estaciones a lo largo del Globo.

El sistema de satélites TRANSIT fue el más instrumental en el establecimiento de modernos datos geocéntricos y en el enlace entre datos nacionales y locales a referencia geocéntrica. Desgraciadamente este sistema no es adecuado para pequeñas mediciones. Da precisiones inferiores al metro sólo cuando las observaciones son de más de un día. Sólo hay seis satélites TRANSIT para una posible cobertura global. Por consiguiente es preciso esperar el paso entre satélites más de hora y media. Los satélites TRANSIT están sólo 1.100 km por encima de la Tierra, por lo que están muy afectados por el campo local gravitacional, variable de un punto a otro, lo que no ocurre en órbitas de mayor altura como las del GPS.

La transmisión del satélite TRANSIT a (150-400 Mhz) es más susceptible a la ionosfera y a las distorsiones que las de mayor frecuencia de transmisión del GPS. Finalmente la tecnología de los cronos ha evolucionado en los últimos años hasta conseguir una transmisión estable desde los satélites.

En el año 1974 un diputado de Defensa de EE.UU. requirió un comprensivo informe referente a la navegación militar futura y elección de las necesidades; es entonces cuando nació NAVSTAR y GPS.

Paralelamente a estos esfuerzos se interesaron del Congreso de los EE.UU. sobre la proliferación de los sistemas de navegación y costes asociados. El Plan Federal de Radionavegación fue desarrollado conjuntamente por el Departamento de Defensa y Transporte. Noticias lanzadas por el Departamento de Defensa —28 de junio de 1983— anunciaron una revisión al sistema NAVSTAR y GPS para usos ajenos al Departamento. Se especifica que la precisión de posicionamiento del GPS, SPS (*Standard Positioning Service*) estaría disponible al tiempo que el sistema llegara a ser completamente operativo. También especifica que el PPS (*Precise Positioning Service*) proporcionando más alta precisión sería restrictivo para los EE.UU. y aliados militares exclusivamente teniendo un carácter altamente selectivo. Detalles, procedimientos y condiciones para la provisión GPS/PPS capacidad y servicios para selección a usos civiles se dieron en el año 1986 en el Plan Federal de Radionavegación publicado por el Departamento de Defensa y Transporte.

Se anticipa que para aplicaciones en mediciones, donde la posición relativa de las estaciones está determinada, la degradación de la señal no tendrá efectos negativos. Hay finalmente dos formas para obtener mayor precisión GPS, la primera posibilidad llamada SA (*Selective Availability*) es introducir errores en tiempo para deliberadamente modificar la estabilidad en el reloj atómico de abordaje y cambiando el mensaje de navegación transmitido por los satélites. La segunda posibilidad lla-

mada AS (*Anti-Spoofing*) implica que el código P transmitido será introducido. Diferenciando las señales del satélite en dos estaciones eliminamos la mayoría de los errores de reloj. Por consiguiente SA no tendrá probablemente ningún efecto adverso en las medidas donde la separación de las estaciones sea pequeña (menor que 100 km).

La mayoría de los receptores usados en mediciones tiene el código de los receptores C/A y no es afectado por el AS.

El más importante logro del GPS es su alta precisión en la determinación de la posición y la velocidad en tres dimensiones, la cobertura del Globo, la capacidad operacional en todo tiempo, la continua disponibilidad, posibilidad para una serie de usos ilimitados —porque este es un sistema pasivo—, habilidad para encontrar las necesidades de un amplio espectro de usuarios. Estos son los logros del Departamento de Defensa frente a otros sistemas de navegación electrónica como TACAN, VOR/DME, OMEGA, LORAN-C y TRANSIT en vehículos militares. La Administración de Aviación Federal (FAA) está estudiando el uso del GPS para la navegación civil en el espacio nacional. Se espera que para el año 1992 GPS será utilizado como una herramienta de navegación y que será el único medio para el año 1995.

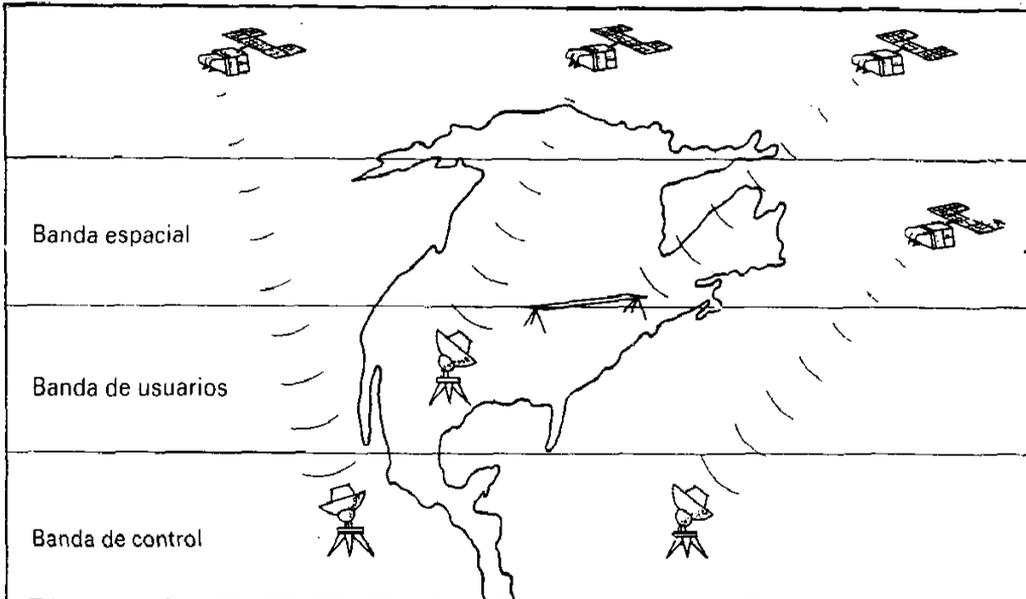


Figura 2.—Bandas de los componentes del sistema de posicionamiento global.

La figura 2 y el cuadro 2, p. 88, dan una idea de la mayoría de los componentes del sistema de posicionamiento global. El espacio segmentado tiene los satélites GPS que transmiten señales en dos frecuencias moduladas. Estas transmisiones son cuidadosamente controladas por un reloj atómico muy estable dentro de los satélites. Los satélites también transmiten un mensaje de navegación que contiene entre otras cosas, datos de posición para todos los satélites. El segmento de control consta de una estación principal de control localizada cerca de Colorado Springs y algunas estaciones de monitores localizadas alrededor del mundo. El propósito del segmento de control es dirigir continuamente la transmisión del satélite, predecir las efemérides del satélite, calibrar los relojes del satélite y enviar periódicamente el mensaje de navegación. El segmento de uso simplemente permanece para la totali-

dad de usos comunes, el usuario observará y registrará la transmisión de algunos satélites y aplicará los algoritmos de solución para obtener la posición, velocidad y tiempo.

Cuadro 2.—Exposición de la mayoría de los componentes del sistema de posicionamiento global.

Banda	Entrada	Función	Salida
Espacio	Mensaje de Navegación	Generar y transmitir código, transporte y mensaje de navegación	Código P, Código C/A Portadoras L1, L2 y mensaje de navegación
Control	Código P, observaciones tiempo (HTC)	Produce tiempo GPS, predicción de efemérides control y vehículos espaciales	Mensaje de navegación
Usuarios	Código observación, fase transporte, observación y mensaje de navegación	Solución navegación y solución medidas	Posición, velocidad y tiempo

Satélite GPS

Los satélites de la generación Block II son ensamblados en *Rockwell International Satellite System Division*, Seal Beach, California.

El diseño de este tipo de satélites ha durado 7,5 años. El peso del satélite GPS es de 854 kg en el momento de su inserción en la órbita final. Los paneles solares desplegados cubren un área de 7,2 m².

La superficie de los paneles solares permanece perpendicular a la dirección del Sol. Hay tres baterías de níquel-cadmio a bordo para proporcionar energía durante los períodos de eclipse. El tiempo generado dentro del satélite está basado en dos relojes atómicos de rubidio y otros dos de cesio.

Configuración orbital

La constelación orbital final para el satélite GPS está todavía por decidir. Los planes originales lo estiman en 24 satélites, otras consideraciones reducen este número a 21 de los cuales tres son considerados de reserva. Recientes estimaciones vuelven a la constelación original de 24 satélites para conseguir una total cobertura. Hay seis planos orbitales cada uno de los cuales tiene una inclinación de 55°. Habrá tres o cuatro satélites en cada plano orbital.

El camino orbital será cuasi circular con un semieje mayor de cerca de 26.000 km. Por aplicación de la tercera Ley de Kepler se obtiene un período orbital ligeramente menor de 12 horas. Los satélites completan dos revoluciones orbitales mientras la Tierra gira 360° —un día sideral—. Los satélites adelantarán 4 minutos aproximadamente cada día, ya que el período orbital es un múltiplo exacto del de rotación de la Tierra.

La trayectoria del satélite sobre la Tierra —la traza del vector geocéntrico del satélite sobre la superficie de la Tierra— se repite diariamente. Se considera que un incremento de 50 km, en la órbita del satélite haría innecesario el adelanto de los 4 minutos diarios.

Por la gran altitud de los satélites GPS pueden verse simultáneamente desde gran parte de la Tierra. Usualmente los satélites son observados sólo una vez, tienen un cierto ángulo vertical denominado "ángulo de enmascaramiento", generalmente de 10° .

La razón para el uso del ángulo de enmascaramiento es que los efectos de la troposfera en la propagación de la señal son especialmente inapreciables para altitud del centro de la región de ocultación.

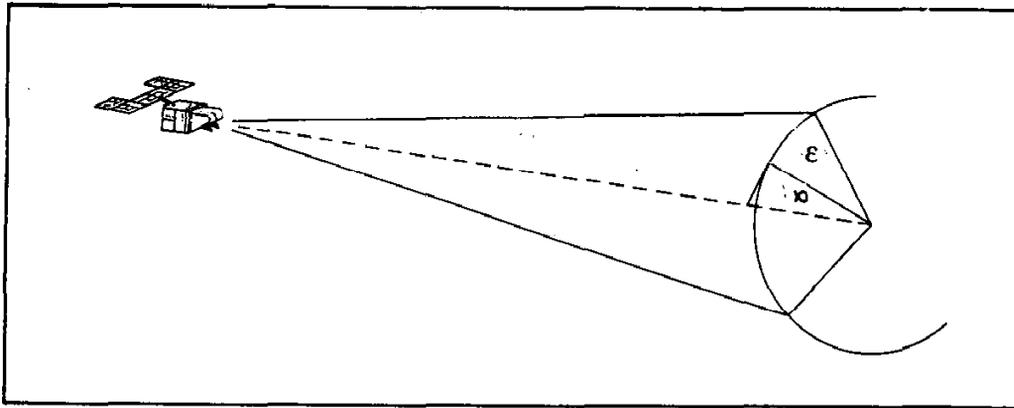


Figura 3.—El ángulo de enmascaramiento = ϵ limita la región de visibilidad.

El ángulo con el centro de la Tierra está directamente relacionado con el ángulo de enmascaramiento. Cálculos simples dan las siguientes relaciones entre ambos ($\epsilon = 0, \alpha = 152$) ($\epsilon = 5, \alpha = 142$) ($\epsilon = 10, \alpha = 132$). El ángulo desde el satélite es aproximadamente de 27° en todos los casos.

Finalmente por causa de las órbitas terrestres alrededor del Sol serán dos los períodos por año en que el satélite atraviese la sombra de la Tierra, esto ocurre cuando el Sol está cerca o en el plano orbital. La sombra es la región del cono que no recibe luz del Sol y penumbra es una región donde la recibe parcialmente.

Mientras el satélite atraviesa las regiones de sombra, la fuerza de las radiaciones solares actúa sobre el satélite. Estos cambios en fuerza han de ser tenidos en consideración en el modelo orbital. El movimiento de los satélites a través de la región de las sombras es menor de 60 minutos.

Transmisión del satélite

Todas las transmisiones satélite están coherentemente derivadas de la frecuencia fundamental 10,23 Mhz, hecha posible por los relojes atómicos de a bordo.

Multiplicando la frecuencia fundamental por 154 da 1.575,42 Mhz, que es la frecuencia para la L1 onda de transporte y multiplicando por 120 da 1.227,60 Mhz de frecuencia para la onda portadora L2. El ratio para el código P es la misma frecuencia fundamental 10,23 Mhz y el ratio del código C/A es 1.023 Mhz es decir la fundamental por 100.

El código P de precisión es el fundamental para la navegación. Es un PRN (*Pseudo Random Noise*) código generado matemáticamente por la mezcla de otros códigos. El código P no se repite durante 37 semanas. Esto es posible por asignación de porciones semanales de este código a los satélites. Como resultado todos los saté-

lites pueden transmitir en la misma frecuencia L1 y puede ser distinguida por la transmisión de un código de secuencias mutuamente excluyentes. Todos los códigos son inicializados una vez por semana en la media noche del sábado al domingo, esto crea en efecto la semana GPS como una mayor unidad de tiempo. Siendo menos de 37 satélites GPS los que están en órbita, alguna frecuencia semanal del código P permanece sin usarse. Las L1 y L2 ondas portadoras son moduladas con el código P.

Uno de los sistemas de identificación del satélite usa el PRN número semanal. Por ejemplo si nos referimos al PRN 13 o SV 13, esto quiere decir que el satélite GPS que transmite es el de la porción semanal, decimotercera del código PRN. Otro sistema de identificación es el número de secuencia de lanzamiento. Por ejemplo el número de secuencia de lanzamiento para el PRN 13 es NAVSTAR 9.

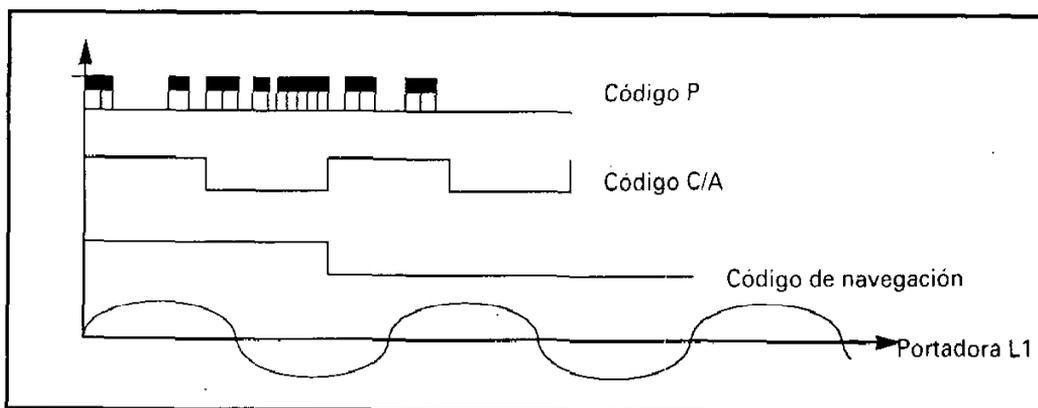


Figura 4.—Exposición de los códigos y la onda portadora L1.

El código C/A es sólo de un msec. El ratio es de 1.023 Mbps (megabites por segundo). El tiempo del código C/A está sincronizado con el código P. Cada satélite transmite códigos C/A mutuamente excluyentes, lo que hace posible distinguir las señales recibidas simultáneamente desde los satélites. El código C/A puede ser usado para la rápida adquisición del código P o como medida de precisión de la señal de navegación. La mayoría de los receptores usados en la medición de distancias no usan el código P. El código C/A es muy socorrido porque da precisión al tiempo de sincronización y a la lectura del mensaje de navegación. El código C/A es factible en la onda portadora L1, como una opción de control terrestre puede colocarse también en la onda L2.

El mensaje de navegación está modulado en ambas ondas L1 o L2 y su ratio es de 50 bps. Contiene información sobre las efemérides de los satélites, tiempo GPS, comportamiento del reloj y mensajes del estado del sistema.

Los efectos relativos son importantes en las mediciones por GPS pero afortunadamente pueden ser calculados con precisión. Las frecuencias normales atómicas en los satélites GPS son afectadas por dos relatividades especiales —la velocidad del satélite— y la relatividad general —la diferencia de potencial gravitacional de la posición del satélite y la relativa al potencial en la superficie de la Tierra—.

Jorguensen (1986) da una discusión en forma de leyes de estos efectos e identifica dos partes distintas en la corrección de la relatividad. La parte principal es común a

todos los satélites y es independiente de la excentricidad orbital. La frecuencia relativa contrarrestada es $\Delta f = 4,45 \times 10^{-10}$. Corresponde a un incremento en tiempo de 38,3 μ seg por día, los relojes en órbita parecen ir más deprisa. El aparente cambio de frecuencia es $\Delta f = 0,00455$ Hz en la frecuencia fundamental de 10,23 Mhz. La frecuencia es corregida ajustando los relojes del satélite antes del lanzamiento a 10,22999999545 Mhz.

La segunda parte del efecto de la relatividad es proporcional a la excentricidad de la órbita de los satélites. Para órbitas circulares exactas esta corrección es nula. Para órbitas GPS con excentricidad 0,02 este efecto puede llegar a ser de 45,8 nseg correspondiendo a un error de 14 m.

Este efecto de relatividad puede afortunadamente ser calculado desde una simple expresión matemática que es una función del semieje mayor, la excentricidad y la anomalía excéntrica. Esta corrección es aplicada usualmente en el receptor. Estos efectos se cancelan cuando se trata de medición de distancias entre dos puntos. El tiempo del GPS se realiza a través del reloj atómico en la estación de control principal MCS localizada en la estación de las Fuerzas Aéreas de Falcon en Colorado Springs. El tiempo GPS se aprecia al nseg de UTC, para convertir tiempo GPS a Universal UTC hay que conocer la corrección GPS-UTC.

Cada satélite transmite un mensaje de navegación cuya banda completa es de 1.500 bits de longitud y está subdividida en 5 subbandas de 300 bits cada una. Tarda seis segundos para transmitir una subbanda a la velocidad de 50 bps. La primera subbanda contiene coeficientes polinomiales para la corrección del tiempo de abordaje del GPS. Recordemos que el tiempo del satélite está generado independientemente de los demás y que el código generatriz está directamente unido al tiempo de este satélite. Los segmentos dos y tres contienen las efemérides para la transmisión satélite. La terminología típica de Kepler es la usada en estos parámetros. Estos elementos son resultado de un ajuste mínimo cuadrático de las efemérides predictas en un determinado intervalo de tiempo; no es válido para la órbita total.

Los segmentos cuatro y cinco son subconmutados 25 veces, por consiguiente un mensaje completo de datos requiere 25 segmentos completos.

Segmento de control

El segmento de control es responsable de operar el sistema de posicionamiento global. El centro de operaciones de satélites está ahora localizado en la estación aérea de Falcon en Colorado Springs. Desde el punto de vista del usuario, la visión primaria del control del segmento es la de poner al día los mensajes de navegación de los satélites. Para realizar esto, el segmento de control consta de estaciones distribuidas por todo el mundo que continuamente rastrean todos los satélites que están en pantalla. Esta información es transmitida a la estación de control principal en Colorado Springs, donde se realizan extensos cálculos, con el objetivo último de crear mensajes de navegación al día para soporte de los satélites. Eventualmente es posible que se hagan diversas transmisiones por día y vehículo espacial.

Es importante señalar que el segmento de control es requerido sólo para localizar los satélites y para proporcionar mensajes de navegación de tal precisión que se obtenga una navegación exacta. Las especificaciones son tridimensionales con una precisión de posicionamiento de aproximadamente 16 m con total acceso al código P y bidimensionales con precisión de 100 m; con degradación de las señales causadas por la disponibilidad selectiva. Queda por ver cuales son las implicaciones para

posicionamiento relativo. Puede ser necesario para una agencia civil computar las efemérides precisas y hacerlas accesibles a los usuarios. Estas efemérides podrían entonces ser utilizadas en vez de las de señal de retransmisión del mensaje de navegación.

Generalmente no es importante para los usuarios saber todos los detalles operacionales del segmento control. Justo decir tras esta descripción superficial del sistema GPS que el Ejército y la Marina están haciendo uso del mismo en el Programa de la Antártida.

A finales del año 1987 y buscando la bonanza relativa del verano austral tuvo lugar la primera expedición española al continente antártico.

Los científicos españoles tenían ante sí un inmenso laboratorio donde satisfacer sus inquietudes investigadoras. Esta vasta zona inexplorada encerraba un enorme potencial de información que dar a cuantos se empeñaron en la empresa, y con este espíritu los investigadores españoles emprendieron la aventura que tendría su reconocimiento cuando el Comité Científico del Tratado Antártico en su reunión plenaria del día 22 de septiembre del año 1988 celebrada en París, y a la vista de los trabajos realizados por nuestra nación en la zona del Tratado y al establecimiento de la base Antártica española *Juan Carlos I* en la isla Livingstone, claras indicaciones del interés de nuestra Patria por contribuir al conocimiento de aquellas tierras; decidió por unanimidad aceptar a España como miembro consultivo del Tratado Antártico. La misión encomendada al Servicio Geográfico del Ejército fue la de establecer un "punto fundamental" en la base y determinar las coordenadas de los puntos donde se sitúen las estaciones sísmicas y aquellos que se consideren necesarios para el apoyo al levantamiento hidrográfico.

Tras la segunda campaña en el continente antártico el Servicio Geográfico del Ejército elaboró un mapa a escala 1:2.000 con una serie de puntos que servirán de apoyo para la localización del resto de los lugares donde se realizan observaciones y medidas.

Para la próxima fase o tercera campaña se tiene previsto la unión con redes geodésicas continentales. Determinación de nuevos puntos. Observaciones geodinámicas. Todo ello en el sistema GPS.