

El Sistema G.P.S.

Una herramienta de la Cultura del siglo XXI al servicio del catastro

Ismael Rodríguez Vicente

Ingeniero Técnico en Topografía

Subdirección General de Catastros Inmobiliarios

A comienzos de la década de los 90, se puede afirmar que el G.P.S. tomó cuerpo y presencia en los ámbitos de las ciencias geográficas de nuestro país, dejando de ser tema de trabajo y estudio de un reducido grupo de profesionales pioneros (*), cuyo germen se situaba en el Instituto Geográfico Nacional y en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Con la llegada al mercado nacional de los primeros receptores monofrecuencia y sus paquetes lógicos correspondientes, se comenzaron las experiencias con este sistema, trabajos que se desarrollaban operativamente en un contexto «cuasi crítico», ya que por aquellas fechas el número de

satélites del Sector Espacial significaba tener una operatividad no mayor del 60 % de la total.

Los primeros trabajos G.P.S. se aplicaron a la obtención de datos en el ámbito de la «microgeodesia» (Redes de pequeña magnitud como la de Robledo de Chavela), permitiendo obtener unos resultados que dejaron estupefactos a los ejecutores de los trabajos, en relación sobre todo a la precisión que se obtenía del sistema, a parte de aseverar la rapidez y operatividad de este en cualquier circunstancia.

El entonces Centro de Gestión Catastral y Cooperación Tributaria, organismo que en la actualidad es la Dirección General del Catastro, organizó en la primavera de 1991 una demostración integral del operativo y resultado del sistema G.P.S. demostrándose su utilidad y su espléndido futuro como metodología operativa en variados trabajos para el Catastro.

Transcurrido un corto período de tiempo en el cual el G.P.S. siguió su progreso y consolidación operativa, se encargó la preparación de un Pliego de Prescripciones Técnicas para contratar trabajos utili-

(*) En este artículo quiero dejar constancia de un grupo de profesionales de la Topografía y la Cartografía, pioneros del G.P.S., a los que agradeceré siempre su generosidad y paciencia para conmigo pues siempre que llamé a su puerta para inquirir datos sobre el G.P.S., aquella la encontré abierta; con algunos de ellos tuve la suerte de colaborar. Estos profesionales son: D. Jesús Velasco Gómez, D. Alfonso Nuñez García del Pozo, D. José Luis Valbuena Durán, D. Alberto Llanos Blasco y D. Pascual Garrigues Talens.

zando únicamente el sistema G.P.S. El citado pliego tenía como título: «Coberturas Topográficas de Control Local ejecutadas con la Metodología G.P.S.», cuyo resultado final era el producto de la implantación normalizada de vértices, su observación mediante G.P.S. y la obtención de coordenadas de aquellos en el sistema de referencia, (ED-50) y sistema de representación (U.T.M.) oficiales para el Estado español.

La consecuente contratación de estos trabajos, conocidos con el nombre genérico de Cobertura G.P.S., se realizó en los ejercicios del 93 y 94. Dicha contratación de trabajos supusieron un claro efecto dinamizador en la adquisición de receptores, influenciando esta circunstancia de paso en la simplificación y racionalización de los paquetes lógicos que acompañaban a aquellos, empezándose a plantear la necesidad por aquellas fechas de un formato de intercambio de datos observables entre las diferentes marcas de receptores que llegaban al mercado; un año más tarde se empezó ya a trabajar de manera habitual con ficheros en el citado formato, conocido por el nombre de RINEX.

La culminación de este tipo de trabajos se realizó a finales de 1993, con un pliego de Condiciones específicamente G.P.S. que incluía la realización de trabajos de Implantación de la Red Topográfica de Madrid, exigiendo en el mismo que el Marco Básico de aquella se realizara con G.P.S. Dicho Marco se creó con 256 vértices, que sirvieron de esqueleto referencial de los 1002 restantes implantados por poligonación, hasta conformar los 1258 totales de la citada Red Topográfica, siendo el que suscribe director de estos trabajos.

La realización de esta Red tuvo como valor añadido terminar en primer lugar con la afirmación de que el G.P.S. no tenía aplicación en ámbitos urbanos, sobre todo en la parte consolidada de los mismos; se emplazaron 256 vértices de los cuales el 65% lo fue en el discurrir de los grandes viales del casco consolidado, que-

dando el resto en la periferia y solamente 6 vértices emplazados en terrazas elevadas. En segundo lugar y ya en el capítulo de resultados, este trabajo produjo precisiones entre 3 y 4 veces mayores a la precisión de la propia R.O.I. del entorno de Madrid.

En tercer lugar citaré que el tiempo de observación de estos vértices G.P.S. (256) se realizó en 16 días, tiempo absolutamente inimaginable de haberse realizado este trabajo de observación con algunas de las metodologías convencionales. Se había demostrado con esta circunstancia que el G.P.S. es bastante más rápido que la triangulación, poligonación malla, etc, ya que no le afectan para nada las condiciones meteorológicas existentes en el tiempo de observación.

Las experiencias y trabajos que he citado anteriormente, no hicieron sino acrecentar la confianza que a priori se tenía en el sistema G.P.S., conociendo además gracias a aquellos, sus rendimientos en todos los ordenes y sus limitaciones, lo que motivó que esta metodología de trabajo se incorporara (año 95) en el Pliego de Prescripciones Técnicas para la ejecución de Cartografía Catastral Urbana, en la parte o fase concerniente a la realización de Redes Locales, como alternativa a las metodologías tradicionales, que constaban en aquel; además, se adquirieron receptores bifrecuencia para su empleo en los trabajos de formación, control y puesta al día de la Cartografía Catastral.

Sistema G.P.S. Consideraciones generales

Dada la importancia operativa que tiene en la actualidad este sistema para ejecutar los trabajos de observación y obtención de coordenadas de cualquier Red Local, me permitiré a modo de introducción, hacer una breve génesis explicativa del problema de un posicionamiento, desde el origen de los tiempos a la actualidad.

Desde que el hombre como tal se irguió sobre sus extremidades traseras y comenzó a recorrer la tierra, ha estado buscando la forma de averiguar en que lugar estaba y como debía desplazarse en la superficie de aquella. Los primeros viajeros marcaban sus recorridos con montones de piedras, pero siempre en las cercanías de sus asentamientos; la existencia de circunstancias meteorológicas como la nieve o la lluvia tapaban o destruían estas marcas, con lo que el problema de desplazarse era en aquellas épocas irresoluble, o bien se hacía de forma intuitiva con resultados variados.

De la misma forma cuando los humanos comenzaron la exploración de los mares, el problema se acentuó, pues como es obvio no había forma de marcar rutas, salvo situar referencias en los lugares prominentes de las costas para utilizarlos en la navegación de «costeo» de su territorio.

Entonces para resolver este problema, el humano discurreó que en lo único que podía confiar, dada su misma posición temporal, era en «Las Estrellas», si bien su lejanía y en ocasiones los factores meteorológicos hacia imposible su identificación concreta, llegando en el mejor de los casos, después de observarlas a obtener la situación de un navío «milla arriba o milla abajo», situación que en muchos casos no tenía utilidad (embocar la entrada de un puerto).

Ya en la época moderna y sobre todo para la navegación se construyeron Sistemas Radiogonométricos en tierra (LORAN) que dan servicio a la navegación en las proximidades de las costas con una gran precisión, pero sujetos a las interferencias eléctricas que generan fenómenos meteorológicos y otros.

Entendiendo el hombre que en la observación a las estrellas estaba la solución al problema de situación precisa de puntos en la superficie terrestre, y que este sistema es muy complejo en su planteamiento y resolución, optó entonces por fabricarse sus propias estrellas, artificiales evidentemente, que son los S.V. (Spacial Vehicle) o satélites de los cuales los TRANSIT y S.L.R. son ejemplos, pero que su utilización para fines

civiles son muy limitados por su complejidad y limitaciones operativas.

En el año 1978 el Departamento de Defensa de los Estados Unidos puso en marcha el proyecto denominado G.P.S. (GLOBAL POSITION SYSTEM) que consiste en el emplazamiento en órbitas conocida de 24 (S.V.) satélites llamados NAVSTAR, situados a 20.180 Km de la tierra y con posición conocida y controlada en cada instante desde 5 estaciones maestras en tierra a lo largo del Ecuador; este sistema se ha terminado entre los años 1994 y 1995 ya con los 24 satélites referidos. Este sistema no es sólo un perfecto sistema para navegación, sino que gracias a los diferentes tipos de estacionamiento de los receptores, existe multiplicidad de aplicaciones civiles, incluida la utilidad TOPOGRÁFICA y GEODÉSICA de manera particular para nosotros.

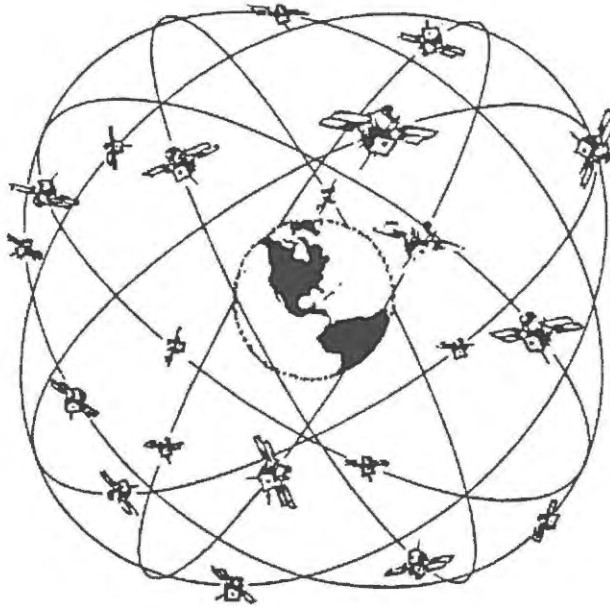
Para terminar lo que hace el G.P.S. en su utilidad topográfica y geodésica, es simplemente resolver una TRILATERACIÓN ESPACIAL, o sea, conocidas las coordenadas instantáneas de varios satélites y obtenidas las distancias de estos a un punto P de coordenadas desconocidas gracias al tiempo observado con los receptores; este problema trigonométrico que constituye la trilateración está resuelto para topografía terrestre hace décadas; por lo citado se puede afirmar que el G.P.S. se ha convertido en una de las «herramientas técnicas» singulares del siglo XXI sobre la cual y gracias a los avances de la informática y electrónica es imposible predecir donde terminarán sus aplicaciones.

A continuación se describe el funcionamiento técnico y características fundamentales que en el orden conceptual y práctico posee este sistema.

Constitución operativa del Sistema G.P.S. ¿Qué es el G.P.S.?

La configuración integral de este sistema es el que se ha expresado en la página anterior. A continuación se describen los

Figura 1
Constelación G.P.S. (Final)



elementos fundamentales de cada uno de los mecanismos o instrumentos que componen cada uno de los 3 SECTORES constitutivos del Sistema G.P.S.

Sector espacial

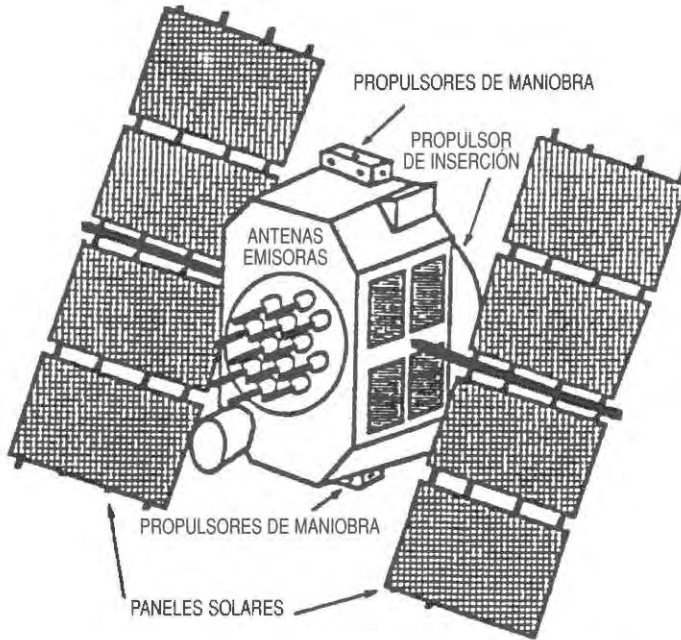
En el año 1973 se empezó a desarrollar el proyecto de constelación NAVSTAR (Navigation Satellite Timing and Ranging-Satélites (S.V.) de navegación cronométrica y distanciométrica) por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, para poder efectuar de forma continua y en tiempo real navegación precisa por tierra, mar o aire, en toda condición meteorológica y en un sistema de cobertura global al que se llamó G.P.S.; el 22 de febrero de 1978 se lanzó el primer satélite (S.V.), completando la constelación en el año 1994.

Este sector (Figura 1) lo constituyen 24 satélites (S.V.) situados en 6 planos orbitales prácticamente circulares, con inclinación de 55° y uniformemente distribuidos en el plano del Ecuador, con cuatro satélites por órbita y distribuidos regularmente en cada una de estas, a una altura de 20.180 Km, para así configurar un periodo de paso de 12 horas sidereas o lo que es lo mismo, que el satélite concreta dos órbitas exactas cada 360° de giro de la tierra.

Esta constelación ya completa, significa disponer de observación prácticamente continua y con buena geometría, teniendo para cada punto, lugar y momento entre 6 y 11 satélites observables, con un tiempo máximo de observación por satélite de 4 horas-15 minutos, suponiendo que se observa a los satélites en alturas de horizonte nunca inferiores a 15° .

Como se ha citado repetidamente el instrumento fundamentas que constituye este

Figura 2
Satélite Navstar (G.P.S.)



SECTOR ESPACIAL es el SATÉLITE o S.V. (spacial vehicle), del que a continuación se describen sucintamente los elementos fundamentales que lo conforman.

Satélites

Estos instrumentos llamados NAVSTAR, tienen un peso aproximado a los 900 Kg en el momento de su inserción en la órbita de servicio, y están compuestos de una serie de elementos básicos, a saber, Relojes o Osciladores, Sistema de Control de Posición del Satélite, Sistema Identificativo de cada uno, Portadora o Sistema de Emisión de los Satélites, Códigos, Mensajes, Modulación de Portadoras y Disponibilidad Operativa, cada uno de los cuales se describe sucintamente en la Figura 2.

Control de posición del satélite

Dentro de este control de posición, debemos mencionar el «MOMENTUM DUMP» que traducido significa Momento de Giro o Momento de Vuelco. Como se aprecia en la figura las antenas emisoras son direccionales, esto es que deben apuntar a donde se desea enviar o recibir la emisión; la Superficie Terrestre; además los paneles solares deben estar perpendiculares al Sol.

Esto implica que el satélite tiene que realizar diversas rotaciones sobre sus ejes.

Para el control continuo de estas rotaciones, los satélites cuentan con unos volantes de inercia impulsados por motores sincrónicos. Acelerando o frenando dichos volantes se puede aplicar cualquier Mo-

mento de Giro o Vuelco al satélite corrigiendo de esta forma su orientación.

Relojes/osciladores

Dado que el funcionamiento básico del SISTEMA G.P.S., es el de conocer la «distancia» a que nos encontramos de los satélites en el espacio, se necesita un método operativo para averiguar lo alejados que estamos de estos satélites.

El procedimiento para hallar las distancias, parte de las conocidas y antiguas ecuaciones [$V \cdot \text{TIEMPO} = \text{DISTANCIA}$]; o bien siendo V la velocidad de la luz, [$V_{\text{luz}} \cdot \text{TIEMPO} = \text{DISTANCIA}$], ya que las ondas radio se transmiten con esta velocidad; el funcionamiento operativo del G.P.S. es conocer el «TIEMPO» que tarda una señal en llegar hasta nosotros (receptor) a partir del satélite (emisor), teniendo este parámetro se resuelve la citada ecuación y tendremos la distancia; para ello los satélites cuentan con RELOJES/OSCILADORES atómicos de Rubidio o Cesio y «precisiones» de 10^{-12} y 10^{-13} respectivamente.

Debe reflexionarse un momento respecto a lo citado anteriormente para el apartado precisión de los Relojes; 10^{-13} segundos es lo que la luz invierte en recorrer 30 milésimas de milímetro, y esto representa una variación de 1 segundo en 300.000 años.

En los receptores G.P.S. por analogía a los satélites, se incluyen también relojes/osciladores de cuarzo, asimilables a la precisión de los Relojes Atómicos de los Satélites, con lo que se ha resuelto el problema de MEDIR EL TIEMPO entre receptores-satélites para obtener la distancia entre ambos.

Por último y dentro de este apartado citaremos conceptualmente que el Reloj funciona por una transición entre niveles de energía de átomos concretos; esta transición o movimiento produce una OSCILACION de frecuencia muy precisa que se usa para controlar la realimentación de un oscilador piezoeléctrico de cuarzo, cuya

frecuencia así estabilizada es la que realmente se utiliza, siendo muy normal ajustarla en valores redondeados: Ejemplo 10 MHz.

Quiere esto decir que el reloj además de su función natural dentro de satélite G.P.S. cumple la función de PROVEER de una frecuencia fundamental de 10,23 MHz sobre la que se estructura y VIAJA todo el conjunto de la señal radiodifundida por el satélite.

Identificación de satélite G.P.S.

Estableciendo un símil sencillo, cada persona humana tiene una serie de características físicas, que comprendidas en una constitución general, no obstante para cada individuo son diferentes, como por ejemplo la voz y el timbre de esta; con los satélites G.P.S. sucede lo mismo, pues cada uno de ellos se identifica de los demás mediante su «VOZ ó RUIDO SEUDO ALEATORIO» conocido por las siglas P.R.N. (Pseudo Randon Noise), conformado por el conjunto de información radiodifundida por la modulación de las Portadoras de Códigos y el Mensaje, elementos que se describen a continuación.

Portadoras

El satélite emite sobre dos ondas portadoras:

La llamada L.1 resultado de multiplicar la citada fundamental (10,23 MHz) por 154 produciéndose 1575,42 MHz cuya longitud de onda $\lambda=19,05$ cm.

La llamada L.2 que usa un factor multiplicada de 120 produciendo un resultado de 1227,60 MHz, con una longitud de onda $\lambda=24,54$ cm.

Un ejemplo comprensible, que describe el sistema de la señal radiodifundida por los satélites es el siguiente: Un ferrocarril de «vía doble» que asimilamos a un conducto (la portadora fundamental), por el que discurren en el mismo sentido de marcha 2 trenes (Portadora L.1 y L.2) que

El tercer código Y es equivalente en su utilización al P, pero al ser su desarrollo secreto, se impide a los usuarios no autorizados su utilización, es decir a los que no dispongan del código secreto W para así descifrar el Y y convertirlo al código P.

Esta técnica se llama ANTI SPOOFING (A.S.) y solo se emplea en casos de emergencia militar o durante periodos de prueba del sistema general.

El cambio que desde el SECTOR de CONTROL, se puede hacer, de cambiar el código P por el Y se le conoce en castellano como ENCRIPtar.

Mensaje

Se denomina con el nombre del MENSAJE al conjunto de información que viaja por así decirlo modulado sobre las dos portadoras citadas.

Esta información es la que permite la OBTENCIÓN de resultados concretos y sin ella este SECTOR ESPACIAL no tendría razón de ser, pues nos encontraríamos con un conjunto de satélites asimilables a cuerpos MUDOS que circunnavegan la tierra, de los cuales no se extrae ninguna operatividad para poder resolver el problema de situación o posicionamiento de un punto en la tierra.

El contenido del MENSAJE es el siguiente:

- Las «EFEMÉRIDES» radiodifundidas por los satélites, o lo que es lo mismo, su posición exacta dentro de su órbita concreta, circunstancia que empieza a producir resultados de un posicionamiento.

- Información sobre el «estado de reloj» de cada satélite, aplicando coeficientes correctores que permiten emitir el tiempo satélite en el tiempo G.P.S. que utiliza el sistema.

- Información referida a la CONDICIÓN de «SALUD» de los satélites, pudiendo estar SANO u operativo (O.R.) o bien ENFERMO o inoperativo (Unhealthy).

- Datos que expresan la «ANTIGÜEDAD» de satélites y correspondientemente a la información que este emite.

- Información sobre el MODELO IONOSFÉRICO que se usa para la obtención de resultados en el caso de receptores «monofrecuencia».

- Datos necesarios para PLANIFICAR observaciones, llamadas ALMANAQUE, que expresan información expedita del conjunto de las órbitas de todos los satélites.

Para terminar se puede afirmar que el MENSAJE es lo que da inteligencia al SECTOR ESPACIAL, en su conjunto diferenciándolo de lo que sería una pura herramienta.

Disponibilidad selectiva (S.A.)

Se puede definir este «parámetro circunstancial», como una DEGRADACIÓN de la información que distorsiona la precisión de resultados para los usuarios del sistema que no debemos olvidar, tiene un dueño que es el Departamento de Defensa de los EE.UU.

Esta circunstancia se decidió implantarla, porque los resultados esperados por los propios diseñadores del sistema G.P.S., fueron mejorados con mucho en la práctica operativa, dado que si el diseño definió precisiones de entre 10 y 20 m en tiempo real para el posicionamiento «preciso» (P.P.S.), estos resultados se obtenían fácilmente con el posicionamiento standard (S.P.S.), destinado en origen a usuarios civiles que operaban con receptores sencillos y baratos, la conclusión final fue que la precisión del sistema G.P.S. operando con «posicionamiento previo» (P.P.S.) era del orden del metro.

Este resultado trajo como consecuencia que para la utilización civil del sistema que operaba con posicionamiento Standard (S.P.S.), el Departamento de Estado de los Estados Unidos implantó la posible DEGRADACIÓN en un lapsus temporal e la propia precisión, ya esta degradación la denominó SELECTIVE AVAILABILITY POLICY o más genéricamente S.A. y traducida como «Disponibilidad Selectiva».

Con esta decisión se impide en un momento que usuarios no autorizados pue-

dan disponer de un sistema de posicionamiento con precisiones mejores de 120 metros; para terminar este apartado se hace notar que:

Para activar la DISPONIBILIDAD SELECTIVA (S.A.), se actúa sobre la información enviada en el mensaje correspondiente a ESTADOS de RELOJES y PARÁMETROS ORBITALES; debe quedar claro con lo citado que ni estado ni órbitas se modifican, lo que se hace es adulterar o falsear la información de estos parámetros que recibe el usuario civil no autorizado.

A continuación describiremos el segundo SECTOR de los tres que conforman el sistema G.P.S. (Figura 4).

Sector de control

Dado que la bondad o garantía del sistema G.P.S. viene definida por el buen funcionamiento permanente de la constela-

ción de satélites que constituye el SECTOR ESPACIAL, se diseñó para el seguimiento y correspondiente conocimiento de todos los parámetros físicos y lógicos que gobiernan el operativo de este sector, un segundo SECTOR llamado de CONTROL, constituido por 5 estaciones terrestres que son según expresa la figura siguiente:

- COLORADO SPRINGS (CENTRAL o MAESTRA DEL SECTOR)
- ISLA de ASCENSION en el Atlántico Sur (SECUNDARIA).
- ISLA de DIEGO GARCIA en el OCEANO INDICO (SECUNDARIA).
- ISLA de KWAJALEIN en el OCEANO PACÍFICO. OCC (SECUNDARIA)
- ISLA de HAWAI en el OCEANO PACÍFICO. ORI (SECUNDARIA)

Estas estaciones terrestres están regularmente espaciadas en longitud, con unas coordenadas muy precisas; reciben continuamente en las dos frecuencias las señales

Figura 4
Sector de Control



de los satélites que navegan en el horizonte local de cada una, obteniendo la información necesaria para establecer con gran precisión las órbitas de los satélites.

Todos estos datos son enviados a la Estación Central donde se procesan y calculan la EFEMÉRIDES, ESTADOS DE LOS RELOJES y toda la información adicional que se tramite a los satélites que la almacenan en su memoria para radiodifundirlas y usarlas normalmente por extrapolación en cualquier lugar, por supuesto sin alternativa para navegación en tiempo real.

La precisión de estas efemérides permite determinar la posición de un satélite con un error menor de 1 m en el sentido radial y 6 m a lo largo de la trayectoria orbital y 3 m en sentido transversal; la precisión alcanzable final alcanzable por el sistema depende como es lógico de la exactitud de las efemérides en tiempo real, con sus indeterminaciones provenientes del proceso de extrapolaciones.

Para trabajos de gran precisión y no en tiempo Real la obtención de resultados se actúa con EFEMÉRIDES PRECISAS, obtenidas por cálculo posterior a partir de observaciones a los satélites desde puntos de situación conocida y muy precisa; estos son normalmente estaciones V.L.B.I. o S.L.R.

El futuro próximo de este Sector de Control es el de implantación de redes de estaciones Independientes de tipo continental o mundial, solo de seguimiento, manteniéndose por supuesto como «Matriz» de estos sistemas a las 5 estaciones del propio G.P.S.

Sector usuario

Este tercer sector de los que componen el SISTEMA G.P.S., lo constituye el equipamiento instrumental con el que se realizan las observaciones en tierra recibiendo las señales radiodifundidas de los satélites NAVSTAR que componen el sector espacial, para después obtener las coordenadas de los puntos o realizar navegación en tiempo real.

El EQUIPAMIENTO BASICO esta formado por ANTENA y RECEPTOR, complementarios ambos y que están unidos por cable o bien directamente por construcción; haremos notar que el resultado o coordenadas están referidas siempre al centro de la antena.

Antenas

Estos instrumentos, a parte de su posición respecto al receptor, están constituidos esencialmente por el Elemento físico Antena receptora, un Preamplificador y bancada de estacionamiento, los cuales describiremos conceptualmente a continuación.

– La función genérica de una antena es convertir una corriente eléctrica en una radiación electromagnética y viceversa. La antena (EMISORA) de los satélites hace lo primero y la de los instrumentos receptores lo segundo.

– El elemento Físico Antena Receptora son de diferentes tipos constructivos, los más comunes son los de DIPOLO, DIPOLO CURVADO, CÓNICO ESPIRAL, HELICOIDAL, PLANA, etc, pero en todos ellos la corriente eléctrica incluida en nuestra antena por las señales radiadas recibidas de los satélites, posee toda la información modulada sobre dichas señales.

– Las antenas G.P.S. que se aplican a las ciencias geográficas, deberán construirse con un LÓBULO de RECEPCIÓN HEMISFÉRICO, es decir capaces de recibir señales con igual sensibilidad en todas direcciones, desde el cenit hasta el horizonte limitado. Con esta condición constructiva de este tipo de antenas se evita la recepción de señales reflejadas en el terreno o bien en objetos cercanos al estacionamiento, lo que «estropea» y distorsiona la precisión de la observación en general, este es un problema clásico en Radiotransmisión y Distanciometría electromagnética, conocido como EFECTO MULTICAMINO (multipath), que en las antenas modernas se evita situando un plano de tierra al efecto.

– La gran ventaja de las antenas G.P.S., es que sus exigencias de estacionamiento son muy inferiores a la de los instrumentos de observación clásica: la altísima estabilidad posicional imprescindible para observar con un teodolito de precisión (Pilar de hormigón y pesada basada en observación geodésica o trípode perfectamente estacionado en topografía, por ejemplo), ya no es necesaria, porque las pequeñas vibraciones, torsiones o desplazamientos, en NADA afectan a las observaciones a satélites situados a 20.180 Km del punto.

– Otra ventaja que ofrece el sistema G.P.S., en relación directa con sus antenas receptoras, es que se puede situar sobre señales mínimas que materialicen el punto concreto, evitando la circunstancia de tener que construir ESTABLES y COSTOSOS monumentos de hormigón, por otro punto indispensables para efectuar correctas observaciones con aparatos angulares o de distanciometría. Hasta en el apartado de la MONUMENTACIÓN el G.P.S. ha tenido una clara y favorecedora influencia en el aspecto económico de esta fase importante de trabajos.

Preamplificador de antena

Se explica este elemento, desde el punto de vista conceptual de considerar a la antena y al receptor separados constructivamente y unidos mediante cable conector.

- En la parte inferior de la Antena se conecta el cable a la salida de un PREAMPLIFICADOR que tiene la función de «amplificar» la débil corriente eléctrica generada en aquella por la recepción de las señales, y evitar de esta forma el posible desvanecimiento de la corriente en el recorrido por el cable entre antena y receptor.

- Por otro lado el preamplificador o en argot eléctrico simplemente PREVIO, ha de amplificar las frecuencias L1 o L1 y L2 según corresponda y de paso ignorar todas las señales radio de frecuencias diferentes de las que deseamos recibir, amplificando las correctas para su envío por el cable de conexión al receptor.

- Como se indicó al comienzo de este apartado consideramos a la antena y receptor separados y unidos por un conector electrónico idóneo, si bien se ha generalizado lo contrario o sea que ambos elementos estén unidos o superpuestos, lo cual no impide en absoluto la tarea necesaria que hemos indicado realiza el preamplificador.

Receptores de señales - Etapa receptora

En las antenas G.P.S. se han de generar TANTAS SEÑALES como SATÉLITES por CANALES estemos recibiendo. Por ejemplo un Receptor de 2 canales bifrecuencia recibe 16 señales si sigue a 8 satélites.

Podemos entonces afirmar que un RECEPTOR realiza la función básica de AISLAR y SEPARAR las señales para procesarlas independientemente, contando para ello con dispositivos electrónicos o CANALES en número suficiente y relativo al máximo de posibles señales a procesar.

También existen receptores de un SÓLO CANAL FÍSICO pero de recepción CONMUTADA para seguir a todas las posibles señales. Solo pudiendo recibir una señal a la vez, va saltando rapidísimamente de una a otra, tomando «datos» o muestras a mayor velocidad, a la que se suceden los cambios en las señales, lo que permite reconstruir cada señal individual, dado que conocemos a priori la estructura de cada una.

El problema fundamental que se produce en los receptores MULTICANALES, es que la manipulación o tratamiento de una señal con frecuencia muy alta es muy dificultoso; se necesita una señal que manteniendo integra la información que la antena del receptor recibe, tenga una frecuencia menor para posibilitar su utilización. Para ello se aplica un proceso clásico en electrónica, llamado HETERODINO que consiste en obtener una frecuencia más alta y otra más baja que la frecuencia recibida, mediante la mezcla de diferentes frecuencias. Las MÁS BAJA es la que se utilizará, llamada FI o Frecuencia In-

termedia que mantiene la fase y modulación de la recibida en alta frecuencia y es la que emplea en el proceso de medida.

Existe una alternativa operativa a este problema anterior, que se aplicará siempre sobre la portadora modulada recibida de un satélite, para así, disponer de la citada portadora LIBRE de MODULACIÓN, lo que nos permitirá medir sobre ella la evolución de la distancia SATÉLITE-ANTENA receptora; esta alternativa tiene dos variantes llamadas CORRELACIÓN y CUADRATURA.

Para aplicar este principio por CORRELACIÓN hace falta que el receptor cuente con dos circuitos fundamentales:

- el 1º permitirá seguir solo a los CÓDIGOS posibilitando la medida de distancias o mejor dicha SEUDODISTANCIAS al satélite y disponer de la portadora original limpia de modulación, este sistema se usa en navegación permitiendo el posicionamiento en tiempo real.

- el 2º circuito seguirá a la portadora original, permitiendo observar en ella como aumentan o disminuyen los ciclos y las fracciones de ciclo o diferencias de fase entre satélite y receptor, consiguiendo de esta forma medir aumentos o disminuciones de la distancia en función del tiempo; a esta técnica se la conoce por MEDIDA de FASE.

Ambos sistemas anteriormente descritos se explican al referirnos a los diferentes sistemas o técnicas de medición a partir de los observables que llegan a la antena del receptor.

Relojes/osciladores

Para realizar todas las labores descritas anteriormente para la etapa receptora, son precisas frecuencias de referencia obtenidas a partir de la frecuencia fundamental generada por el Reloj/oscilador principal del receptor.

Normalmente estos instrumentos de medida, son osciladores de cuarzo de altísima calidad y estabilidad que, en los receptores modernos permiten la conexión a una fuente de frecuencia exterior de mayor rango, como un reloj atómico, eliminando

así la incógnita del estado del reloj/oscilador propio del receptor.

Los receptores actuales de DOBLE FRECUENCIA ya llevan incorporado como elemento estándar el reloj atómico y son los utilizados en las más exigentes aplicaciones científicas y oficiales.

En el otro extremo del espectro operativo, sobre todo en topografía, permanecerán en uso los receptores MONOFRECUENCIA con reloj/oscilador de cuarzo y con hasta 8 canales de recepción, opción económica y perfectamente operativa.

Información que ofrecen

Antes de citar esta en sus diferentes apartados, conviene que citemos que esto apartados se dividen como todos los instrumentos electrónico modernos en: Elemento FÍSICO o HARDWARE y la programación interna permanente llamada FIRMWARE.

Ya una vez en funcionamiento el receptor, a través de su pantalla y después de manipular conveniente el teclado simple, el receptor puede aportar al operador una amplia y diversa información sobre como discurre el proceso de observación, mientras está recibiendo las señales radio de los respectivos satélites.

Aunque existe variación informativa en función de los diferentes modelos de receptores, los parámetros básicos son los siguientes:

1. Resultado de la comprobación interna inicial, chequeo funcional (START CHECK).
2. Información del estado y versión del FIRMWARE utilizado.
3. Tiempo transcurrido entre el encendido y la hora de recepción de la señal del 1º satélite.
4. Satélites seleccionados manualmente para trabajar con ellos
5. Satélites localizados.
6. Satélites en seguimiento
7. Acimut de cada uno de los satélites seguidos.
8. Elevación de cada satélite en seguimiento.

9. Número de observables completos o eventos registrados de cada satélite en seguimiento.

10. Intensidad de cada señal recibida y relación señal/ruido.

11. Salud o condición operativa de cada satélite en seguimiento con especial atención a fallos de MENSAJE, PORTADORAS, MODULACIÓN y FALLO GENERALIZADO, descrito y difundido mediante códigos específicos establecidos en el sistema.

12. Datos del calendario temporal G.P.S (semana, día y tiempo G.M.T), después de recibir los datos del primer satélite, tiempo G.M.T. es tiempo de GREENWICH.

13. Datos geográficos de la posición actual (Latitud, longitud y altura).

14. Bondad de la Geometría de la figura/as observadas.

15. Bondad de la medida que puede hacerse a cada satélite (Definición de U.R.A).

16. Antigüedad o Edad de la información ofrecida por cada satélite.

17. Evolución o Progreso de la observación, hace referencia a satélites que se captan y pierden y nº de observaciones a cada uno (redundancia).

18. Opción del sistema de observación elegido, ESTÁTICA o DINÁMICA y ABSOLUTA o RELATIVA con datos adicionales para poder operar en el sistema de observación empleado.

19. NOMBRE y NÚMERO de sesión que asignamos a una estación o posicionamiento, con identificación del operador y notas varias.

20. Registros de datos meteorológicos introducidos en la sesión.

21. Nombre y longitud y capacidad que ocupa en el ordenador, el archivo en el que se almacenan las observaciones de una sesión.

22. Estado de la fuente de alimentación del receptor, para su posible realimentación.

23. Puertos de comunicación elegidos y protocolo de salida de datos observados.

Con estos puntos se condensa toda la posible información de utilidad para el usuario.

Sistemas de medida

El G.P.S, es un sistema que permite determinar posiciones terrestres mediante medición de distancias entre las antenas emisoras de los satélites y la receptora (antena) del ó de los equipos de observación (receptores).

Hay dos posibilidades para medir la distancia entre los satélites G.P.S y los receptores de los usuarios: SEUDODISTANCIAS y MEDIDA de FASE también llamada esta segunda Diferencia de Fase, las cuales se describen a continuación.

Seudodistancias

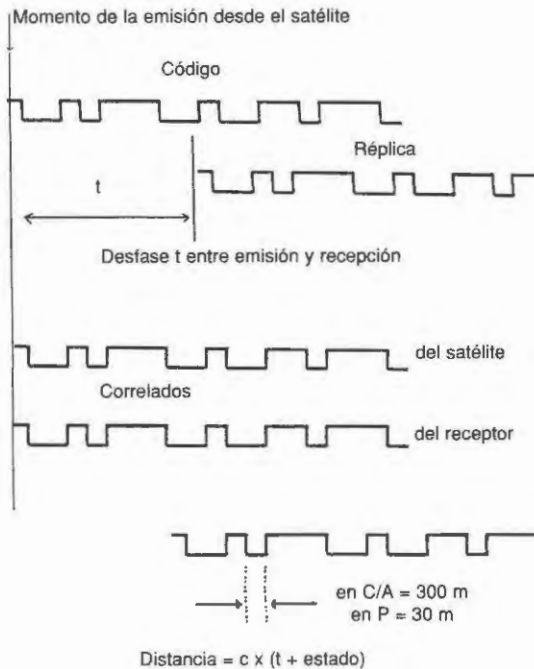
Este método es exclusivo de la técnica G.P.S. Actual como TRILATERACIÓN tridimensional que sitúa la estación en la intersección de las esferas con centro en los satélites y radio de las distancias correspondientes; este sistema es el que se usa en navegación y permite el posicionamiento continuo.

El satélite emite un código, por ejemplo el C/A, que se repite cada milisegundo (Figura 5).

El receptor tiene implantado en su memoria la estructura del citado código, y genera una réplica exacta, que sincroniza con la original recibida, a cuyo efecto, el instrumento comienza a aplicar un retardo. Cuando la sincronía se ha realizado, este tiempo de retardo nos permite calcular una distancia, que no es precisamente la exacta, sino que será una SEUDODISTANCIA ya que aunque conocemos el momento exacto de la emisión del código por el satélite, desconocemos el estado del reloj del receptor.

Para explicar de manera conceptual y sencilla, como hallamos el estado del reloj propio, supongamos que la antena está situado en el centro de una pequeña esfera

Figura 5
Emisión de código por satélite



(Figura 6), tangente a todas las sucesivas esferas y con centro en cada posición instantánea de los satélites y radio la correspondiente SEUDODISTANCIA observada. La citada pequeña esfera con centro de la antena, tiene por radio el algebraicamente correspondiente en tiempo/luz al estado del reloj propio (Δt).

Es conocido y evidente que tres esferas (3 satélites), producen un solo punto de intersección pero sin comprobación, siendo por tanto preciso disponer de un cuarto satélite para determinar el estado del reloj propio del receptor. En este caso hay cuatro incógnitas x , y , z y Δt .

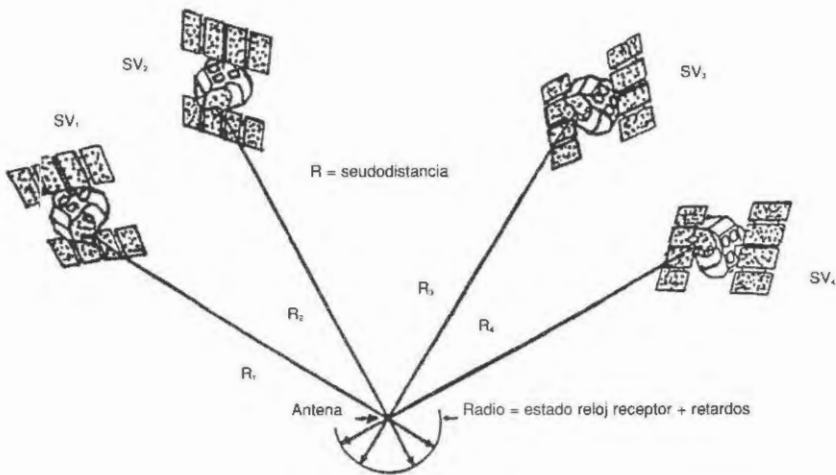
Este método de posicionamiento es esencial en navegación por dar resultados en

tiempo real, pero para usos topo-geodésicos carece de interés, dada la precisión decamétrica obtenible; no obstante este método de posicionamiento se emplea como PRE-POSICIONAMIENTO automático, ó obtención de un breve posicionamiento aproximado, en los instrumentos receptores modernos que emplea observación por medida de fase.

Medida de Fase

Este método de medida es el que permite la mayor precisión, su fundamento es el siguiente: una frecuencia de referencia, obtenida del oscilador que controla el receptor, se compara con la portadora demodulada que se ha conseguido tras la co-

Figura 6
Seudodistancias



relación; la base de este método es que se «controla en fase» una emisión radioeléctrica originada en un satélite, de frecuencia conocida y desde posición conocida.

La onda portadora, al llegar a la antena habrá recorrido una distancia D , correspondiente a un cierto número entero N de sus longitudes de onda, más una parte de longitud de onda $\Delta\phi$ (Figura 7). Así:

El observable es $\Delta\phi$ y puede valer entre 0° y 360° , al crecer $\Delta\phi$ llegará a 360° y entonces el valor de N aumenta un entero y entonces $\Delta\phi$ pasa a valer 0° . En el caso decreciente o contrario del razonamiento entonces N disminuirá un entero.

Teniendo en cuenta que la λ (longitud de onda) de la portadora L_1 es de 20 cm, y que se puede apreciar el $\Delta\phi$ con precisión mejor del 1%, la resolución interna es de carácter submilimétrico, confiriendo a este sistema de medida una gran precisión, de ahí su aplicación en GEODESIA y TOPOGRAFÍA.

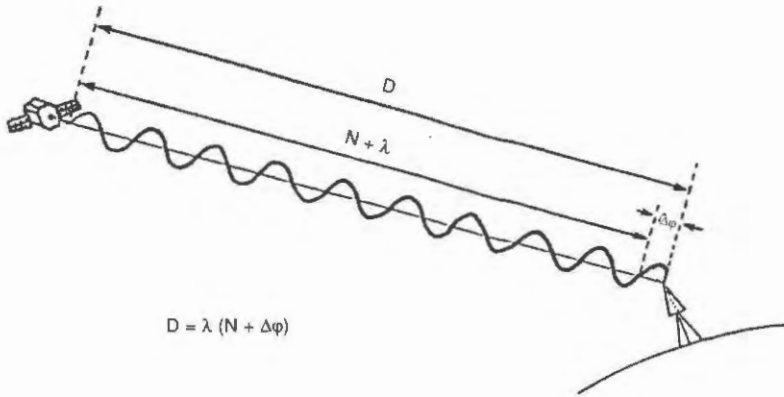
De la observación de la figura 7, observamos que nos hemos referido al N longitudes de onda, pero este valor no tenemos capacidad de observarlo, por lo que se puede afirmar que tenemos una incógnita llamada AMBIGÜEDAD (N).

Esta ambigüedad incógnita se resuelve en el proceso de cálculo, si aplicamos como elemento operativo fijo de la observación, el posicionamiento ESTÁTICO-RELATIVO que es el empleado en las ciencias geográficas, además se obtendrán los tres incrementos de coordenadas entre las dos estaciones.

Si como se ha citado, aplicamos este sistema de observación a dos estaciones, se pueden efectuar las afirmaciones siguientes:

- El tratamiento (cálculo) de las ecuaciones generadas en la RECEPCIÓN INSTANTÁNEA COMÚN de un «mismo satélite» desde las dos estaciones, se llama método de SIMPLES DIFERENCIAS.
- El tratamiento (cálculo) de las ecuaciones generadas en la RECEPCIÓN INS-

Figura 7
Medida de fase



TANTÁNEA COMÚN de «dos satélites», en una posición en la órbita, desde las dos citadas estaciones, se llama método de DOBLES DIFERENCIAS; este método permite eliminar pérdidas de ciclos (cycle slip) y atenuar al máximo o eliminar los errores de reloj en satélites y receptores, posibles indeterminación de las órbitas y otras fuentes de error, porque al ser de magnitudes semejantes, cuando estos parámetros de error son RESTADOS en los procesos de cálculo, tienden a desaparecer.

- Si el planteamiento matemático lo hacemos tratando los datos de la recepción a dos satélites en una posición de la órbita (caso anterior) y luego en otra posición, el método se llama de TRIPLES DIFERENCIAS, eliminando los conocidos errores como en el método anterior pero con el problema de que se cancela la N o ambigüedad de ciclos.

Por último debe destacarse, que es fundamental en este sistema de medida u observación, el no perder el seguimiento de la

fase y así conseguir que la ambigüedad N no varíe en todo el proceso de observación. Si por cualquier circunstancia o causa perdemos el seguimiento de la fase, tendremos una pérdida de ciclos, talón de Aquiles de este método, aunque para el posicionamiento RELATIVO, los procesos de ajuste polinómico del cálculo posterior, permiten restaurar la CUENTA de CICLOS original o lo que es lo mismo LA AMBIGÜEDAD (N) inicial.

Las circunstancias o causas que originan pérdida de ciclos, van desde el paso de un avión por la trayectoria o cercano a ella, hasta relámpagos o disturbios electromagnéticos en la Ionosfera. Pensemos que la fuente radiante o Antena del satélite se puede considerar «puntual», dada su lejanía y poco tamaño físico, por lo que carece prácticamente de penumbra radioeléctrica, teniendo como consecuencias operativa la dificultad de observar en las cercanías de arbolado perenne, tendidos eléctricos, estructuras varias, etc.

Factores de error que condicionan la bondad de las observaciones en el sistema G.P.S.

En las técnicas G.P.S. se pueden considerar dos factores de contribución diferentes al error esperable: Son el UERE y el DOP cuyas descripciones son:

1º. *UERE o error equivalente en distancia por el usuario (user equivalently range error)*

Es el factor que contribuye al posible error en la medida de distancias producida por una sola fuente de error, suponiendo que esta no está correlada con otros fuentes de error.

Las fuentes de error individual mas corrientes son: Incertidumbre de las Efemérides, Errores de propagación radioeléctrica, Marcha y Estado de los relojes y Ruido característico de recepción.

Aplicando un símil puramente conceptual y didáctico, el UERE, vendría a definir a la precisión con que mediríamos los ángulos de una Triangulación, en función de la apreciación angular del instrumento usado, de la metodología de observación empleada, de la visibilidad existente en la zona y de la ecuación del observador concreto.

2º. *DOP o factor de error en precisión (dilución of precisión)*

Es el factor de error puramente geométrico que contribuye a la incertidumbre de un posicionamiento.

El DOP se define como un «valor aritmético indicativo de la solidez de la figura» observable distanciométricamente constituida por el receptor y los vectores o lados que determina con los satélites a la vista. Su valor ideal es 1, y si la figura o geometría empeora, este valor aumenta, llegándose a producir una situación de «fuera de rango», en la que aunque tengamos sobrados satélites a la vista, deba

suspenderse la observación porque el DOP llegue a exceder de cierto valor preestablecido, como 6 por ejemplo, que es el límite habitualmente empleado.

Aplicando una analogía como la antes citada, de una triangulación clásica, el mejor DOP se correspondería con los ángulos de la figura mas cercanas en conjunto a los 100°, y cuanto mas nos separásemos de este valor ideal consecuentemente mayor sería el valor del DOP.

Para terminar este apartado descriptivo de los factores que distorsionan la bondad de las observaciones en el Sistema G.P.S., se citará los DOP, mas utilizados:

- GDOP - Tres coordenadas de posición y estado de reloj.
- PDOP - Tres coordenadas de posición.
- HDOP - Define posición solo planimétrica.
- VDOP - Define altitudes
- TDOP - Define estado de relojes

Métodos de Posicionamiento

Determinación de posiciones antes de citar los diferentes métodos, conviene hacer notar que estos tienen una estrecha relación con dos condiciones básicas que se enumeran a continuación:

1. Definición de posicionamiento en función del sistema de obtención de coordenadas que empleemos.

2. Definición del posicionamiento/os en atención así el receptor esta fijo o móvil.

Ya dentro del apartado 1, se puede decir que los métodos básicos en uso son dos:

Absoluto

En este método, al posicionarnos en un punto y realizar la observación, obtendremos una «tercia de coordenadas», con origen y orientación previamente conocidas, formando un grupo de coordenadas aislado, como por ejemplo un vehículo en el desierto a bien un navío en un océano. La precisión puede ser desde metros a decámetros en función del sistema de medida usado.

Relativo

Este método de posicionamiento es el usado normalmente en Geodesia y Topografía. Su aplicación o utilización implica siempre que estén involucrados más de un receptor de forma simultánea, siendo uno de ellos el que establece el sistema Local o bien General sobre el que se posicionan los restantes receptores. En el operativo consiguiendo lo que se usa realmente no son las coordenadas del sistema, sino que se trabaja con incrementos de estas entre la antena referencial que fija el sistema y las de los otros puntos o posiciones o lo que es lo mismo la DIFERENCIA DE SITUACIÓN entre ellos.

Por lo citado a este método se le debe denominar DIFERENCIAL, pero se ha divulgado la costumbre de citarlo con el término RELATIVO.

La gran ventaja de este posicionamiento, es que los errores comunes o iguales que pudieran presentarse entre dos puntos, no tiene afectación sobre los valores de las coordenadas de estos; Así por ejemplo, si tenemos 2 puntos separados entre sí 15 km, pueden tener un error de situación ABSOLUTO hacia el N.W de 10 y 10,05 m respectivamente, pero el error de posición de una respecto al otro sería realmente de 5 cm y el lado/vector que los define estaría bien en magnitud y orientación, pues el error común en ambos de 10 m se anula mutuamente.

Por lo citado se puede afirmar que en lo referente a operativos Geodésico y Topográficos, la precisión alcanzable con este método es enormemente superior a la obtenida utilizando el posicionamiento absoluto.

Para terminar citaré que siempre con este método la ESCALA y ORIENTACIÓN son absolutas.

Cuando, como se ha citado en el punto 2, lo que nos interesa es describir el posicionamiento en atención al «movimiento o inmovilidad del receptor», tendremos los métodos siguientes de posicionar.

Estático

Aclararé en primer lugar que el concepto expresado anteriormente referido al movimiento del receptor, no deja de ser una licencia lingüística pues es sabido que realidad a lo que nos referimos siempre es al «movimiento de la antena» que es la que recibe el radiomensaje.

Este posicionamiento estático, determina una terna única de coordenadas de una antena en tiempo diferido, o sea tras su proceso posterior a partir de una serie de observaciones, realizadas durante un tiempo en el cual no se sufren desplazamientos de rango superior al del propio sistema.

Con este método estático, se obtienen soluciones MÁS o MENOS REDUNDANTES en función de si prolongamos más o menos el tiempo límite de observación, y esas soluciones pueden acrecentarse en su precisión si empleamos este método en la modalidad relativa antes citada.

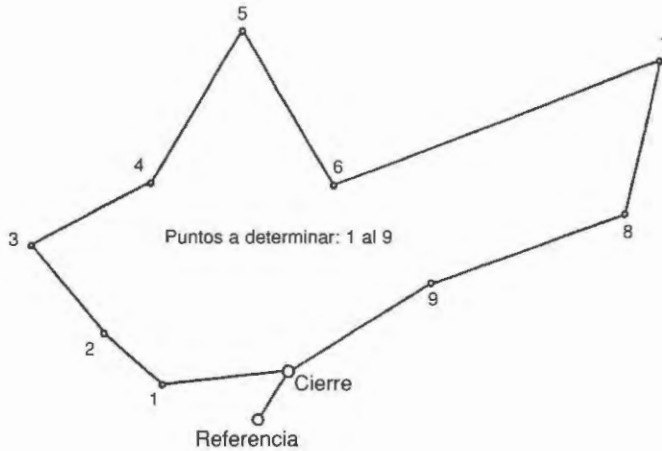
Existe un variante de este método, conocida como ESTÁTICO/RÁPIDO, relativo, desarrollada por el Dr. Blewit, que es solo aplicable utilizando «receptores de dos frecuencias» que realicen la medida de fase tras las demodulación de la portadora por correlación con ambos códigos (C/A y P). El que podamos fijar en el tiempo el instante de salida o emisión de la 2ª frecuencia al correlar el código P, ofrece la posibilidad de resolver todas las incógnitas en breve tiempo, pudiendo hacer en 10 minutos, las observaciones que nos llevarían 45 minutos al no contar con el código P, ofreciendo sin duda igual redundancia y por tanto precisión.

Es obvio que estos receptores bifrecuencia son bastantes más caros que los llamados Monofrecuencia por las circunstancias referidas anteriormente, pero además, efectúan la correlación por cuadratura, en el caso de que como se citó el dueño del SISTEMA GPS active el AS en tiempo de crisis.

Cinemático

Este método o técnica mixta, se llama CINEMÁTICA, y es aplicable a la resolución

Figura 8
Método cinemático



de los mismos problemas que efectúa el posicionamiento estático; fue presentada en el año 1985 por el Dr. Remondi, de US National Geodetic Survey.

El operativo, consiste fundamentalmente en la obtención en forma ESTÁTICA RELATIVA respecto de un punto fijo, de únicas ternas de incrementos de coordenadas, correspondiendo cada una de esta a uno de los puntos que conforman un itinerario cerrado; por lo tanto se obtiene una terna de incrementos de coordenadas por cada punto que tengamos.

La precisión de este método, es similar a la obtenida con el sistema Estático Relativo de medida de fase, pero con la ventaja de una gran ahorro de tiempo.

El operativo de la observación consiste en elegir dos puntos fundamentales (Figura 8), que llamamos Referencia y Cierre, y con los demás puntos de la figura se conforma un itinerario que pasando por ellos tenga origen y final en el cierre.

Se usan dos receptores, uno considerado FIJO (MASTER) y otro MÓVIL (RO-

VER); el fijo permanecerá continuamente estacionado en el punto Referencia y el móvil recorrerá el itinerario prefijado que empieza y termina en el punto Cierre.

Lo esencial de este método, es que desde el comienzo al final de la observación, los dos receptores efectúen observación continuada de la fase portadora de 4 satélites de común seguimiento.

La observación, considerada como una fase de trabajo, se divide siempre en dos partes claramente diferentes, que son, INICIACIÓN y ITINERACIÓN que a continuación se describen:

Iniciación

Esta parte fundamental de la observación tiene como objetivo básico, la determinación para la pareja de receptores en funcionamiento, de unas constantes instrumentales y sobre todo de las correspondientes «ambigüedades» de cada receptor respecto a cada satélite seguido; citare que existen tres sistemas de INICIACIÓN: Base

Estática, Base Conocida e Intercambio, todas ellas referidas a las observaciones realizadas en los puntos REFERENCIA y CIERRE y a la correspondiente fase que establecen entre ellos; Aunque sea una repetición citaré que esta parte de trabajo y sus resultados consecuentes se realiza sobre y únicamente los dos puntos citados.

Itineración

Es la 2ª parte de la observación, y como su nombre indica en ella se realiza el Itinerario proyectado de puntos: Como ya conocemos, en el punto Referencia y con seguimiento ininterrumpido a los satélites, estará el receptor fijo. En el punto Cierre y en las mismas condiciones, estará el receptor móvil a partir de aquí este receptor móvil recorrerá los puntos del itinerario, deteniéndose brevemente en cada punto (3 minutos), hasta volver al punto cierre del que partió.

Este método cinemático, ofrece un gran potencial de rendimiento, pero con la salvedad inexcusable de no perder por cualquier causa el seguimiento de los satélites; la utilidad de este método se empieza a vislumbrar en los campos de la Topografía y Cartografía, al permitir que se puedan formar varias parejas de receptores, manteniendo como es lógico «común» el fijo para distintos móviles.

Tratamiento de las observaciones mecánica operativa y obtención de resultados

Teniendo en cuenta lo que se ha citado anteriormente, las coordenadas obtenidas a partir de observaciones G.P.S son cartesianas referidas al Sistema Geodésico Mundial WGS-84 y el sistema de coordenadas para España es el oficial ED-50, tenemos obligatoriamente que relacionar ambos, para lo cual se actuará de la forma operativa siguiente:

Como comienzo operativo de un trabajo G.P.S, resolveremos la relación existente en-

tre los dos sistemas referenciales citados; para esto se elegirán los «vértices geodésicos» que cubran con holgura la zona donde tenemos proyectadas y señalizada la Red Básica o Local, sobre los cuales se efectúa un estacionamiento primario de obtención de datos (observables) necesarios para la TRANSFORMACIÓN HELMERT a realizar y de la que se obtienen los PARAMETROS de TRANSFORMACIÓN que posteriormente se aplicarán a todos los observables obtenidos en el conjunto de puntos que conforman la citada Red Local, y de esta forma hemos efectuado el paso global de nuestro trabajo G.P.S al sistema de Referencia Local (en el Estado Español es el U.T.M.).

Una vez realizada el estacionamiento primario, por ejemplo si actuamos con tres receptores, uno de ellos se mantendrá fijo sobre la Geodesia y los dos restantes o móviles van recorriendo de manera aleatoria los demás puntos o vértices; conviene que este movimiento de receptores las «PUESTAS» de observación sean simultáneas en este caso por parejas de puntos.

El tiempo de observación de este posicionamiento de los tres receptores para obtención de datos de transformación, será para receptores BIFRECUENCIA de 10 minutos y para receptores MONOFRECUENCIA de 45 minutos y ya para el recorrido de los móviles bastará con 8 minutos (BIFRECUENCIA) y 30 minutos (MONOFRECUENCIA).

Descrito breve y conceptualmente el operativo de un trabajo G.P.S, a continuación se describe el proceso de tratamiento de observaciones, que dividiremos en dos partes claramente diferenciadas: CÁLCULO y AJUSTE.

Cálculo de coordenadas aproximadas

Esta parte del proceso sigue el siguiente planteamiento general:

a) Cálculo de líneas base observadas y correspondiente control de calidad de resultados.

b) Creación de un fichero ASCII con los datos siguientes: Punto de Estación, Punto Visado y la línea base (dx, dy, dz) en el sistema WGS-84.

c) Creación de un fichero ASCII con las coordenadas U.T.M en el sistema ED-50 vigente en España para los vértices geodésicos.

d) Transformación de las coordenadas U.T.M a geodésicas (B,L) latitud y longitud.

e) Determinación de la Ondulación del Geoide (N) en estos puntos, aplicando el módulo correspondiente, que nos permita obtener una precisión relativa en zona de $\pm 0,005$ metros por kilómetro aproximadamente. Luego tenderemos:

$(B,L,H+N) \rightarrow (B,L,h)$ siendo h la altura sobre el elipsoide en el sistema ED-50.

f) Transformación de las coordenadas (B,L,h) en ED-50 a coordenadas tridimensionales (X,Y,Z),

$$(B,L,h) \rightarrow (X,Y,Z)_{ED-50}$$

g) Determinación de la transformación Helmert (dL, W_x, W_y, W_z) entre los Sistemas ED-50 y W.G.S.84 a partir de las coordenadas (X,Y,X)_{ED-50} y las observaciones G.P.S (dx, dy, dz).

h) Se aplicará a todas las líneas base (dx,dy, dz) observadas en WGS.84 la transformación del Helmert obtenida, con lo que tendríamos estos incrementos en el sistema Local ED.50

$$(dx, dy, dz)_{WGS,84} \rightarrow (dx, dy, dz)_{ED-50}$$

i) Con las coordenadas (X,Y,Z) de los geodésicos en ED-50, y de las observaciones G.P.S transformadas, se realiza el cálculo de las coordenadas de todos los puntos de la Red Local, realizándose al mismo tiempo un primer control de calidad de las citadas observaciones.

j) Las coordenadas anteriormente obtenidas se transforman a geodésicas (B,L,h) y restando la ondulación del Geoide (N) se obtendrán (B,L,H) aproximadas para poder a continuación entrar en fase de compensación de la Red.

Proceso de ajuste de la Red

El ajuste de la Red se realiza en las siguientes fases:

a) Transformación de las observaciones G.P.S (dx,dy, dz) en observaciones geodésicas de ACIMUT, DISTANCIA REDUCIDA al ELIPSOIDE y DIFERENCIA de ALTITUD.

$$(dx, dy, dz) \mp (A,d, dh)$$

b) Transformación de la diferencia de altitud (dh) al elipsoide, en diferencia de altitudes al Geoide (dH), con la introducción de la diferencia de ondulación del Geoide (dN).

$$dH = d_h - dN$$

c) Se realiza la ponderación de las observaciones, obteniéndose dos ficheros ASCII, uno para las observaciones planimétricas y otro para las diferencias de altitud.

d) El método básico de este proceso de ajuste, es el de Variación de Coordenadas, y la Técnica de Estimación la de «mínimos cuadrados», aplicándose un test previo para detección de errores groseros. Mediante una ordenación adecuada de los vértices de la Red Local se obtendrá una matriz normal tipo banda que se invierte por el método de Cholesky. Los resultados del ajuste se pueden resumir en:

- Coordenadas ajustadas de la red y su matriz de covarianzas
- Residuos estimados y su matriz de covarianzas
- Estimación de la varianza de peso unidad
- Detección de errores groseros
- Elipses de errores absolutos y relativos
- Parámetros de redundancia

Conviene terminar citando que el ajuste de la planimetría se realizará en primer lugar, y tenidas las X, Y planimétricas compensadas, de esta forma se realiza el ajuste altimétrico que tiene una secuencia de planteamiento similar a la expresada para la planimetría.

Conclusiones operativas y características fundamentales del sistema G.P.S.

La utilización del Sistema G.P.S., ha significado para las ciencias geográficas, una

revolución, al permitir «situar o posicionar» puntos con una gran precisión en aplicaciones o trabajos geodésicos y topográficos y precisiones sobradamente satisfactorias para navegación en tiempo real ya sea aéreo, marítimo o terrestre.

Las condiciones operativas y características fundamentales del G.P.S. son:

I. El G.P.S. puede utilizarse en topografía, cuyas aplicaciones fundamentales son la siguientes:

A. Implantación de Redes Locales y apoyos fotogramétricos para cartografía urbana (importante).

B. Establecimiento de Bases de Replanteo en obras lineales de largo recorrido y de Marcos o Redes de alta precisión para encuadramiento de bases de replanteo.

C. Para protección civil, la localización y delimitación de zonas afectadas por grandes desastres prácticamente en tiempo real. (Incendios, riadas, etc.)

D. En el ámbito de los GIS y la Cartografía soportado en ellos, gran rapidez en captura de nuevos datos, tanto mayores ambas circunstancias cuanto menor sea la escala de trabajo.

E. Aplicándolo a la Geodesia, en observación de redes de cualquier orden y en determinación del Geoide en conjunción con otras técnicas.

F. Orientación de cámaras fotogramétricas en vuelos.

G. Batimetrías para descripción de fondos.

II. No obstante lo citado, el sistema G.P.S. es un instrumento topográfico más, a sumar a los existentes, nunca se le debe de considerar la panacea, que lógicamente y con este supuesto halla arrumbado los sistemas topográficos convencionales de distanciametría. Por ejemplo citaré lo siguiente:

A. Con el G.P.S. no se puede realizar un levantamiento de «detalle urbano» por el problema del apantallamiento, teniéndose que aplicar Taquimetría Numérica para resolver dicho levantamiento.

III. El Sistema G.P.S. en su fase de Recepción obtiene:

A. Diferencias de tiempos (de salida de la señal desde el satélite y de llegada al receptor).

$$\begin{aligned} \text{Si } t_R &= t_{\text{receptor}} \\ t_S &= t_{\text{satélite}} \end{aligned}$$

$d = c (t_R - t_S)$ siendo c = velocidad de la luz

B. Diferencias de Fase similar al funcionamiento del distanciometro.

IV. El sistema G.P.S. permite obtener resultados con diferentes precisiones en función principalmente del tipo de observable utilizado (Código o Fase).

V. La distanciametría resuelve el problema de la distancia, mediante el problema de la Distancia Límite.

La ecuación teórica en definitiva (para distanciametría o G.P.S.) es:

$$D = L + n \lambda \text{ donde «L» lo mide el aparato}$$

λ se conoce
 n, D se calcula.

VI. Para una persona con conocimientos topográficos será relativamente sencillo aprender a utilizar las técnicas G.P.S., de lo contrario es bastante mas complicado.

VII. El conocimiento de la Topografía permitirá a este profesional, adoptar las soluciones metodológicas y el instrumental G.P.S. más adecuado para responder al objetivo planteado.

VIII. Para trabajos topográficos y Geodésicos, se empleará el sistema de posicionamiento ESTÁTICO-RELATIVO que podrá ser en tiempo diferido o tiempo real (si se dispone de Radio-Modem).

IX. Cuando se trabaja con el sistema citado en el punto anterior, a partir de un punto de coordenadas conocidas, lo que determina el G.P.S. son los (Dx, Dy y Dz) vectores entre puntos, y sus correspondientes coordenadas a partir de los vectores citados.

X. Las coordenadas obtenidas primariamente, el G.P.S. las ofrece en un SISTEMA de REFERENCIAS GLOBAL que es el del propio Sistema G.P.S.; como cualquier usuario en cualquier parte del globo, las coordenadas que necesita son referidas al SISTEMA LOCAL (ya sea oficial o particu-

lar), entonces tendremos que tener un mínimo de 3 puntos en la zona de trabajo que tengan coordenadas en el sistema local y a partir de esta premisa convertir mediante una Transformación Helmert en 3D (3 translaciones, 3 giros y un factor de escala) que nos permita pasar de un sistema de coordenadas (WGS-84) a otro (por ejemplo ED-50 y proyección U.T.M.)

XI. Las operaciones y cálculos descritos en los puntos IX y X los realiza, el soporte G.P.S. en una tarea de Pos-proceso inmediato, una vez realizado el conjunto del trabajo de observación.

XII. Como el G.P.S. permite posicionar o situar «puntos», solamente con la condición de que tengan Horizonte DESPEJADO de obstáculos, esto nos puede llevar a situarlos con entera independencia, pero con «NULA» utilidad operativa futura;

El profesional de la Topografía debe diseñar en gabinete la geometría y situación de estos puntos y sus condiciones o no de intervisibilidad todo ello en función de la uti-

lidad operativa posterior a su emplazamiento (Ejemplo: Conexión directa entre Bases de Replanteo, emplazamiento de vértices de Marco Básico de una Red Local, etc.)

Para trabajos topográficos de levantamiento de puntos actuando en terrenos «despejados» de construcción en altura, el G.P.S. tiene variables instrumentales que permiten obtener coordenadas (U.T.M.) con precisión @ 1m, lo que le hace plenamente aplicable para trabajos de puesta al día de información catastral rústica.

Para terminar citaré que a parte de las aplicaciones citadas, el G.P.S. ahora mismo se puede aplicar en multiplicidad de tareas civiles, de las que como ejemplo citaré los SISTEMAS ANTISECUESTRO DE VEHICULOS MOVILES y LOS VEHICULOS MOVILES INTELIGENTES, donde a partir de una cartografía georreferenciada y un receptor G.P.S. sobre dichos vehículos tenemos localizado y sabemos hallar rutas alternativas de trabajo en el ámbito urbano y general respectivamente. ■