

FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

CURSOS 2006
CIENCIAS BÁSICAS

CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO DE TOPOGRAFÍA

MÓDULO VI

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO
GLOBAL (GPS)

CA 65

TEMA

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL
(GPS)

EXPOSITOR: ING. GERMAN GARCÍA GONZÁLEZ
DEL 06 AL 10 DE NOVIEMBRE DE 2006
PALACIO DE MINERÍA

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

1.1. INTRODUCCIÓN.

El Sistema GPS (Sistema de Posicionamiento Global) fue creado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD) para constituir un sistema de navegación preciso con fines militares que sustituyeran al antiguo sistema utilizado, que no era otro que las mediciones Doppler sobre la constelación Transit.

Para ello, aprovecharon las condiciones de la propagación de las ondas de radio de la banda L en el espacio, así como la posibilidad de modular las ondas para que en ellas se pueda incluir la información necesaria que permita posicionar un objeto en el sistema de referencia apropiado.

Este proyecto se hizo realidad entre los meses de febrero y diciembre de 1978, cuando se lanzaron los cuatro primeros satélites de la constelación NAVSTAR, que hacían posible el sistema que resolvería la incógnita de nuestra posición en la Tierra.

A continuación vamos a describir las generalidades del sistema GPS y sus características más importantes. Para ello, debemos dividir el sistema en tres sectores fundamentales y dependientes entre sí, el *sector espacial*, el *sector de control* y el *sector de usuarios*.

1.2.- DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

EL SECTOR ESPACIAL.

Este sector lo forman los satélites de la constelación NAVSTAR (Navegación por satélite en tiempo y distancia). La constelación está formada por seis planos orbitales, y en cada uno de ellos existe una órbita elíptica casi circular donde se alojan los satélites regularmente distribuidos. Los planos tienen una inclinación de 55° respecto al plano del ecuador, y se nombran como A, B, C, D, E y F. Cada órbita contiene al menos cuatro satélites, aunque pueden contener más. Los satélites se sitúan a una distancia de 20200 Km respecto del geocentro, y completan una órbita en doce horas sidéreas. Estos satélites son puestos en funcionamiento por el Comando de las Fuerzas Aéreas Espaciales de U.S.A (AFSPC).

Con estos fundamentos, se garantiza la presencia de al menos cuatro satélites sobre el horizonte en todos los lugares de la superficie de la Tierra.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SATÉLITES.

Los satélites de la constelación NAVSTAR son identificados de diversos modos:

- Por su número NAVSTAR (SVN).
- Por su código de ruido pseudoaleatorio (PRN). En los códigos de transmisión existen características de ruido pseudoaleatorio traducidas en bits que identifican a cada satélite de la constelación.

- Por su número orbital. Un ejemplo sería el satélite 3D, que corresponde al satélite número tres del plano orbital D.

En la actualidad, existe un número de veintisiete satélites operativos, pertenecientes a los bloques IIA y IIR. Se disponen:

- Cinco en los planos A, E y F.
- Cuatro en los planos B, C y D.

Todos disponen de osciladores atómicos de cesio, salvo los SVN 24, 27 y 31 que lo tienen de rubidio. En el caso de los primeros la precisión es de 10-13s, mientras que los de rubidio es de 10-12s. La frecuencia fundamental de emisión de estos osciladores es de 10,23 MHz.

El tiempo utilizado por el sistema GPS es un tiempo universal coordinado denominado UTC(USNO) que define el Observatorio Naval de los Estados Unidos mediante relojes atómicos de hidrógeno. La unidad del tiempo GPS es el segundo atómico internacional y tiene su origen coincidente con el UTC a las cero horas del 6 de enero de 1980.

Así mismo, debemos añadir que los satélites disponen además de:

- Antenas emisoras de ondas de radio (banda L). Con ellas transmiten la información al usuario.
- Antenas emisoras-receptoras de ondas de radio (banda S). Sirven para actualizar su situación a través del sector de control.
- Paneles solares para disponer de la energía necesaria para su funcionamiento.
- Reflectores láser para el seguimiento desde el sector de control.

La vida de los satélites oscila entre los seis y diez años, y es de reseñar que el más antiguo aun operativo tiene una edad de ocho años y medio. El más duradero fue el SVN-3 que duró trece años y medio.

SEÑAL DE LOS SATÉLITES.

Los satélites de la constelación NAVSTAR constan de un oscilador antes mencionado que genera una frecuencia fundamental ν_0 de 10,23 MHz. A partir de esta frecuencia fundamental se generan dos portadoras en la banda L de radiofrecuencia, denominadas L1 y L2.

Además, existen dos formas de código pseudoaleatorio que se modulan sobre estas portadoras, son los códigos C/A y P, además de un mensaje, que da la información de los parámetros orbitales del satélite y del estado del reloj. Los códigos son una secuencia de +1 y -1, correspondientes a los valores binarios de 0 y 1 respectivamente.

Los componentes de la señal y sus frecuencias son:

COMPONENTE		FRECUENCIA(MHz)
<i>Frecuencia Fundamental</i>	v_0	10,23
<i>Portadora L1 154</i>	$154 \cdot v_0$	1.575,42
<i>Portadora L2 120</i>	$120 \cdot v_0$	1 227,60
<i>Código P</i>	v_0	10,23
<i>Código C/A</i>	$v_0/10$	1,023
<i>Código W</i>	$v_0/20$	0,5115
<i>Mensaje de Navegación</i>	$v_0/204.600$	50 · 10 ⁻⁶

El código C/A (*clear/access*) se repite cada milisegundo, dando como resultado un código de 1023 chips, siendo la longitud aproximada de cada chip de unos 300 m. Este código está declarado de uso civil para todos los usuarios.

El código preciso P se compone de 2,3547·10¹⁴ bits y se repite aproximadamente cada 266,4 días. Este código lleva una palabra denominada HOW que indica en que momento del código está cuando el receptor empieza a recibirlo, de este modo el receptor engancha el código y empieza a medir. El código P es secreto y de uso militar. Se origina a partir de la combinación de dos secuencias de bits, generados a partir de dos registros. La longitud de cada chip es de 30 m. Con el fin de proteger el código P, éste se encripta usando un código W, dando lugar al código Y. Si el código W está en curso se habla de que está conectado el A/S (Anti-Spoofing).

El mensaje de navegación es mandado por los satélites, y consta esencialmente de información sobre el reloj de los satélites, parámetros orbitales (efemérides), estado de salud de los satélites y otros datos de corrección. El mensaje consta de 25 grupos de 1500 bits cada uno y divididos en cinco celdas. Cada grupo se transmite con una frecuencia de 50 Hz y tarda 30 s.

Esto supone que el mensaje modulado completo sobre ambas portadoras tiene una duración de 12 min. 30 s. Por razones de índole militar, se introduce un error intencionado en las efemérides radiodifundidas de los satélites, denominado Disponibilidad Selectiva (SA). Esto repercute en el posicionamiento sobre el sistema de referencia WGS84, ya que si la posición de los satélites que nos sirven de referencia está alterada nuestro posicionamiento no se va a realizar en dicho sistema, sino que se va a efectuar en un sistema arbitrario, con un error mayor o menor en función de la cantidad de SA que exista en ese instante. Este problema es importante en posicionamientos absolutos, ya que no podemos saber la posición correcta. Sin embargo, en posicionamientos diferenciales nos afecta en posición pero no en precisión, ya que la posición relativa de un punto respecto a una referencia (sus incrementos de coordenadas) no está afectada de este error.

EL SISTEMA DE REFERENCIA. DATUM WGS-84.

Las coordenadas, tanto de los satélites como de los usuarios que se posicionan con el sistema GPS, están referidas al sistema de referencia WGS84 (Sistema Geodésico Mundial de 1984). Estas coordenadas pueden ser cartesianas en el espacio respecto al centro de masas de la Tierra (X, Y, Z) o geodésicas (φ , λ , h). El sistema tiene las siguientes características:

- Origen en el Centro de Masas de la Tierra.

- El eje Z es paralelo al polo medio.
- El eje X es la intersección del meridiano de Greenwich y el plano del ecuador.
- El eje Y es perpendicular a los ejes Z y X, y coincidente con ellos en el Centro de Masas terrestre.
- Las coordenadas geodésicas están referidas a un elipsoide de revolución con las siguientes características:

- * Semieje mayor (a) : 6.378.137 m.
- * Inversa del aplastamiento (1 / α) : 298,257223563
- Velocidad angular de rotación (ω) : $7.292.115 \cdot 10^{-11}$ rad / s.

La transformación de las coordenadas WGS84 a otro sistema de referencia, y viceversa, es posible con transformaciones tridimensionales de siete parámetros, ya sean calculadas (donde deberemos conocer al menos las coordenadas de tres puntos en ambos sistemas) o establecidas por algún organismo con una gran base de datos. Para realizar una transformación correcta debemos definir el elipsoide al que queremos referir nuestras coordenadas, la proyección y la zona. A modo de ejemplo, si queremos transformar puntos con coordenadas WGS84 a coordenadas en el Datum oficial español, deberemos especificar que se trata del elipsoide Internacional de Hayford, proyección UTM_ED50 y zona 28, 29, 30 ó 31 (según el huso donde se encuentren los puntos).

Existen otros tipos de transformaciones, como las bidimensionales, las de coordenadas planas y altura, y aquellas en que se introducen modelos del Geoide (globales o zonales) con el fin de obtener alturas ortométricas.

EL SECTOR DE CONTROL.

Este sector tiene como misión el seguimiento continuo de todos los satélites de la constelación NAVSTAR para los siguientes fines:

- Establecer la órbita de cada satélite, así como determinar el estado de sus osciladores.
- Hallados los parámetros anteriores, emitirlos a los satélites para que éstos puedan difundirlos a los usuarios.

De este modo, el usuario recibe la información de las efemérides de posición de los satélites y el error que se está produciendo en su reloj, todo ello incluido en el mensaje de navegación.

Las Estaciones de Control de la constelación son fundamentalmente:

- Colorado Springs (U.S.A.). Central de cálculo y operaciones.
- Ascensión (Atlántico Sur).
- Hawai (Pacífico Oriental).
- Kwajalein (Pacífico Occidental).
- Diego García (Indico).

Existen además otras estaciones de seguimiento (láser, radar y ópticas), cuyo fin es la obtención de efemérides que no estén afectadas por la disponibilidad selectiva, denominadas precisas, y que están al alcance del usuario a través de organismos científicos como el IGS (International Geodynamic Service) o el NGS (National Geodetic Survey). Con ellas, tenemos la seguridad de posicionarnos en el sistema WGS84 con los errores típicos del sistema

EL SECTOR DE USUARIOS.

Este sector lo compone el instrumental que deben utilizar los usuarios para la recepción, lectura, tratamiento y configuración de las señales, con el fin de alcanzar los objetivos de su trabajo. Los elementos son el equipo de observación y el software de cálculo, que puede ser objeto de uso tras la campaña de observación, o bien realizable en tiempo real, donde se obtienen los resultados in situ.

Equipo de observación. Lo componen la antena, el sensor y la unidad de control o controlador.

- **La antena de recepción** tiene la misión de recibir las radiaciones electromagnéticas que emiten los satélites y transformarlas en impulsos eléctricos, los cuales conservan la información modulada en las portadoras. Se denomina centro radioeléctrico de la antena al punto que se posiciona en nuestra observación. Dado que éste no suele coincidir con el centro físico, es conveniente orientar todas las antenas de una misma observación en la misma dirección con el fin de que el error se elimine.

- **El sensor** recibe los impulsos de la antena receptora, y reconstruye e interpreta los componentes de la señal, es decir, las portadoras, los códigos y el mensaje de navegación. En definitiva, lo que hace es demodular la señal original.

El proceso es el siguiente, el sensor correla los códigos, es decir, lo compara con una réplica que él mismo genera, y de este modo halla el tiempo que ha tardado en llegar la señal al receptor, obteniendo la distancia al satélite multiplicando esa diferencia de tiempos por el valor de la velocidad de propagación de las ondas en el vacío (aproximadamente unos 300.000 Km/s).

Como estas distancias están afectadas de errores, se las denomina pseudodistancias.

Para obtener medidas de pseudodistancia mediante diferencia de fase de las portadoras, el sensor reconstruye éstas por modulación bifase-binaria de los códigos modulados en ellas.

Las técnicas de obtención de los *códigos* son, entre otras:

- **Correlación estrecha.** Se utiliza para reconstruir los códigos C/A y P, éste último cuando no está encriptado.

- **Correlación cruzada más cuadratura.** Esta técnica se utiliza para desencriptar el código P cuando el A/S está activado. También recibe esta técnica el nombre de "P-code adied".

Se fundamenta en encontrar el código W que es el responsable de que P no esté disponible para

los usuarios.

- **Z-TrackingTM**

Es otra técnica para descryptar el código P. Para ello, utiliza dos filtros de paso bajo para reducir el nivel de ruido. Hasta el momento, es la técnica que menor degradación produce en la señal (18 dB) y mejores resultados proporciona.

Para reconstruir las *portadoras* se utiliza principalmente:

- **Cuadratura.** Consiste en elevar la onda al cuadrado, limpiando dicha onda de toda la información modulada en ella (códigos y mensaje). Este método tiene el inconveniente de que se produce un empeoramiento importante de la relación señal/ruido por el aumento de éste último, produciendo una degradación importante en la señal. Debemos añadir que toda señal recibida con una relación señal/ruido menor de 30 no debe ser considerada como útil en nuestros trabajos.

- **Reconstrucción a partir de los códigos.** Si por algunas de las técnicas anteriores hemos conseguido acceder a los códigos, podemos reconstruir las fases de las portadoras donde están modulados. La portadora L1 se puede reconstruir a través del código C/A y del código P, mientras que la L2 sólo a través del código P, ya que no contiene el C/A.

El sensor tiene unos canales de recepción, de doble señal si es un receptor bifrecuencia y de señal única si es monofrecuencia. Cada canal recibe las señales de un satélite diferente, y dependiendo del número de canales obtendremos mayor o menor información en un momento dado. Los receptores disponen de un reloj u oscilador que sincroniza los tiempos de recepción. Estos relojes suelen ser de cuarzo con una alta estabilidad, dando precisiones de 10^{-7} s. Con ellos se obtiene el desfase respecto al tiempo GPS. Este aspecto es el que supone el añadir una incógnita en el cálculo posterior, que no es otra que el estado del reloj en cada época de grabación.

Es muy frecuente encontrar equipos de observación en los cuales el sensor y la antena forman un elemento único, lo que facilita el paso de información y agiliza el proceso, evitando los retardos que se producen en la transmisión por cable.

- **El controlador** realiza las siguientes tareas:

- * Controlar el sensor.
- * Gestionar la observación.
- Almacenar los datos.

En definitiva, con él vamos a marcar las pautas y modos de trabajo que consideremos oportunos en cada caso. Entre estas pautas destacan:

- * Tipo de observación (estática, stop & go, cinemática, etc.).
- * Parámetros de la observación (máscara de elevación, modo de grabación, determinación de las épocas, datos meteorológicos, etc.).

- * Estado y salud de los satélites.
- * Seguimiento de los mismos y calidad de la señal que transmiten.
- * Filtrado de observaciones y datos.
- * Definición y atributos de los puntos de observación.
- * Estados de aviso en conceptos de geometría y pérdidas de ciclo.
- * Definición del sistema de referencia.
- * Tiempos de observación y actualización de tiempos.
- * Control del nivel energético.
- * Posición inicial y secuencial.

El buen manejo del controlador es fundamental en los procesos de observación, así como el conocimiento y aplicación de los parámetros adecuados en cada situación o necesidad. Los datos suelen ser grabados en unidades independientes de memoria o tarjetas RAM PCMCIA, que varían desde los 512 Kbytes a los 4 Mbytes de capacidad. También pueden ser almacenados directamente en un PC portátil conectado al receptor. Es muy importante controlar la capacidad de grabación de datos y el tiempo de observación marcado. Estos son algunos ejemplos de almacenamiento por tiempo de observación en función del número de satélites y señales recibidas:

	0,5 Mb	1 Mb	2 Mb	4 Mb
6 satélites sobre L1 y L2 con épocas de 2 s.	1h	2h	4h	8h
6 satélites sobre L1 y L2 con épocas de 5 s.	2,4h	4,8h	9,6h	19,2h
6 satélites sobre L1 y L2 con épocas de 15 s.	7,2h	14,4h	28,8h	57,6h

Tras la observación se obtienen los siguientes datos:

- * Mensaje de navegación.
- * Efemérides radiodifundidas por los satélites.
- * Datos meteorológicos.
- * Almanaque de estado de los satélites.
- * Fichero de observación.

Estos datos pueden ser volcados en un ordenador para ser tratados con un software de post-proceso, o bien tratados "in situ" por el mismo controlador si éste dispone de un software de proceso y así obtener los resultados en tiempo real.

El usuario debe saber que los datos citados anteriormente pueden ser transformados a un formato estándar independiente en modo ASCII para insertarlos y ser tratados por cualquier software de proceso de datos GPS. Este formato es el denominado RINEX, que en la actualidad ya figura como RINEX-2, con la posibilidad de incluir observaciones realizadas a través de la constelación GLONASS.

Tipos de receptores.

Fundamentalmente existen:

- *Navegación*. Reciben únicamente observables de código (tiempos). Son los instrumentos menos precisos, aunque su evolución está siendo espectacular. Sus aplicaciones más comunes son la navegación, catastro, GIS y levantamientos de escalas menores de 1/ 5000 en los más sofisticados.

- *Monofrecuencia*. Reciben las observables de código y fase de la portadora L1. La precisión de estos instrumentos ya es significativa, y son de aplicación topográfica y geodésica en pequeñas distancias (hasta 100 km).

- *Bifrecuencia*. Reciben las observables de código y fase de las portadoras L1 y L2. La precisión y el rendimiento son mucho mayores debido a la posibilidad de combinar los datos y formar en post-proceso combinaciones de observables que agilizan el cálculo y eliminan los errores de retardo atmosférico. Están indicados para trabajos de precisión y allí donde el rendimiento y los buenos resultados requeridos sean máximos.

1.3.- LAS OBSERVABLES.

INTRODUCCIÓN.

Las observables del posicionamiento por satélite son fundamentalmente dos:

- Observables de tiempo:

- * Código C/A modulado sobre la portadora L1.
- * Código P modulado sobre la portadora L1.
- * Código P modulado sobre la portadora L2.

- Observables de diferencia de fase de la portadora:

- * Diferencia de fase de la portadora L1, denominado $\Phi 1$.
- * Diferencia de fase de la portadora L2, denominado $\Phi 2$

A partir de estas observables podemos calcular la distancia satélite-receptor, mediante la comparación entre la señal que envía el satélite y la que genera el receptor. Pero estas distancias están afectadas por una serie de errores, por consiguiente se denominan pseudodistancias.

Además con estas observables se pueden formar diferentes combinaciones como las que mencionaremos más adelante.

MEDIDAS DE CÓDIGO.

Llamamos t_S al tiempo que marca el reloj del satélite cuando emite la señal y t_R al tiempo que marca el reloj del receptor cuando la recibe. Análogamente, los desfases o errores de los relojes con respecto a las Escalas de Tiempo serán δ_s y δ_R . El valor del tiempo de emisión (t_s), es transmitido en el código que envía el satélite. La diferencia entre ambas lecturas de tiempo (Δt) es el tiempo que ha tardado la señal en llegar al receptor:

$$\Delta t = t_R - t^S = (t_R - \delta_R) - (t^S - \delta^S) = (t_R - t^S) + (\delta^S - \delta_R) = \Delta t + \Delta \delta$$

donde $\Delta t = t_R - t^S$ y $\Delta \delta = \delta^S - \delta_R$.

El error del satélite δ^S lo podemos modelar por medio de un polinomio con los coeficientes que son transmitidos del mensaje de navegación. Por lo tanto, suponiendo conocido el valor de δ^S y aplicada esta corrección al valor de t^S , el valor de $\Delta \delta$ será únicamente el valor de $-\delta_R$. El intervalo de tiempo Δt multiplicado por la velocidad a la que viaja la onda, es decir la velocidad de la luz, c , nos da lugar a la medida de pseudodistancia:

$$R = c \cdot \Delta t = c \cdot \Delta t(\text{GPS}) + c \cdot \Delta \delta = \rho + c \cdot \Delta \delta$$

La distancia ρ es la distancia real existente entre el satélite en la época t^S y el receptor en la época t_R .

La precisión de la pseudodistancia derivada de las medidas de código se evalúa normalmente en un 1% la longitud del chip del código. Sin embargo, recientes desarrollos demuestran que es posible llegar a obtener precisiones de 0,1% la longitud del chip del código.

MEDIDAS DE FASE.

La ecuación de fase para ondas electromagnéticas observada por un receptor es:

$$\varphi = \int_{t_0}^t f \cdot dt$$

Asumiendo que la frecuencia se mantiene constante, en el instante inicial se cumple que $\varphi(t_0)=0$, y teniendo en cuenta el tiempo t_p , necesario para que la señal recorra la distancia geométrica ρ entre el satélite y el receptor, la ecuación de fase queda:

$$t_p = \frac{\rho}{c}$$

$$\varphi = f \int_{t_0}^t dt = f \cdot (t - t_p) \quad \text{siendo:}$$

y sustituyendo en la expresión anterior, tendremos : $\varphi = f \cdot (t - \frac{\rho}{c})$

Llamamos $\varphi^S(t)$ a la fase de la portadora recibida por el receptor con una frecuencia f^S Y $\varphi^R(t)$ a la fase de una portadora de referencia generada en el receptor con frecuencia f^R . El parámetro t es una época en la escala de Tiempo del sistema. Para la época inicial (comienzo de la observación), se supone que $t_0 = 0$. A partir de la ecuación de fase anterior se obtiene:

$$\varphi^S(t) = f^S t - f^S \frac{\rho}{c} - \varphi^S_0$$

$$\varphi^R(t) = f^R t - \varphi^R_0$$

Las fases iniciales φ_{S0} y φ_{R0} son causadas por los errores de los relojes del satélite y receptor:

$$\begin{aligned}\varphi_{S0} &= f^s \cdot \delta^s \\ \varphi_{R0} &= f^r \cdot \delta^r\end{aligned}$$

La diferencia de fase entre ambas será:

$$\varphi_{R(t)}^s = \varphi^s(t) - \varphi_R(t) = -f^s \frac{\rho}{c} - f^s \cdot \delta^s + f^r \cdot \delta^r + (f^s - f^r) \cdot t$$

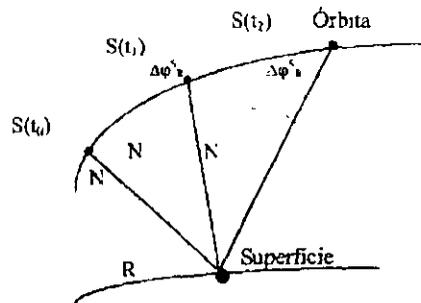
El satélite genera una onda en un instante y el receptor genera otra onda en ese mismo instante y compara, por lo tanto el receptor debe generar una onda de la misma frecuencia a la del satélite para poderlas comparar y medir la diferencia de fase entre ambas, por ello la diferencia de fase es:

$$\begin{aligned}f^s &= f^r = f \\ \varphi_{R(t)}^s &= -f^s \frac{\rho}{c} - f \Delta\delta \\ \text{donde } \Delta\delta &= \delta^s - \delta^r\end{aligned}$$

Si comenzamos la medición en la época t_0 , empezamos a medir diferencias de fase, pero el valor inicial del n° entero de longitudes de onda (N) entre el satélite y el receptor no es conocido. Sin embargo, el valor de N (también llamada **ambigüedad**) es constante en el tiempo y después de un tiempo continuado de observación, la diferencia de fase para la época t será:

$$\varphi_{R(t)}^s = \Delta\varphi_{SR} \int_{t_0}^t + N$$

donde $\Delta\varphi_{SR}$ (medible) es la fracción de fase o lo que ha variado la fase desde t_0 a t . Una interpretación geométrica de esto es:



Se considera que el valor inicial de la diferencia de fase es cero $\Delta\varphi_0 = 0$. Operando y sustituyendo en las expresiones anteriores, y expresando de forma arbitraria el valor de $\Delta\varphi_{SR}$

como $-\Phi$ (para evitar los signos (-) en la expresión), se obtiene la ecuación de medida de fase:

$$\Phi = \frac{1}{\lambda} \rho + \frac{c}{\lambda} \Delta\delta + N$$

donde $\lambda = c / f$

Multiplicando toda la ecuación por la longitud de la onda λ , pasaremos de una medida de fase en ciclos a una medida de fase en unidades de longitud.

$$\Phi \cdot \lambda = \rho + c \Delta\delta + \lambda \cdot N$$

COMBINACIÓN DE OBSERVABLES.

Las combinaciones de observables que se puedan formar van a depender de la cantidad de observables que dispongamos, es decir, se podrán utilizar o no todas las observables dependiendo del tipo de receptor que se utilice (navegador, monofrecuencia, bifrecuencia, etc.).

Cuando disponemos sólo de medidas de código sobre las dos portadoras, es decir, P1 y P2, podemos formar una combinación lineal de ambos códigos que sea, por ejemplo la suma (P1+P2). Además se podrían formar otras combinaciones, de expresiones más complicadas, que tienen la ventaja de suavizar la señal y reducir el ruido.

Cuando disponemos sólo de medidas de código y fase sobre una portadora, es decir, C/A o P, y L1, podemos formar una combinación de medidas de código y fase sobre una portadora.

En este caso, el código se utilizará para obtener una solución aproximada del punto, mejor que la solución de navegación, y tomar ésta para calcular las coordenadas aproximadas del punto que se utilizarán en la ecuación de fase.

Cuando disponemos de medidas de código y fase sobre las dos portadoras, es decir, de todos los observables podemos formar una gran combinación de observables. Como en el caso anterior las medidas de código nos ayudarán a obtener una solución más aproximada del punto, para luego trabajar con las medidas de fase.

Una combinación lineal de fases sobre L1 y L2, en su expresión general, se puede definir como:

$$\phi = n_1 \phi_1 + n_2 \phi_2$$

donde n_1 y n_2 son arbitrarios. Expresando el valor ϕ_1 como $f_1 t$, para las correspondientes frecuencias f_1 y f_2 , tenemos:

$$\phi = n_1 f_1 t + n_2 f_2 t = f \cdot t$$

La frecuencia f será, $f = n_1 f_1 + n_2 f_2$, siendo $\lambda = c / f$, la longitud de la onda de la combinación lineal.

En el caso de señales GPS, se pueden formar unas combinaciones sencillas de las portadoras L1 y L2, como son:

- **La banda estrecha (Ln):** $\Phi_{L1+L2} = \Phi_{L1} + \Phi_{L2}$

Los coeficientes n_1 y n_2 son la unidad
 La longitud de onda es $\lambda_{L1+L2} = 10,7 \text{ cm}$

• **La banda ancha (Lw):** $\Phi_{L1-L2} = \Phi_{L1} - \Phi_{L2}$

El coeficiente $n_1 = 1$ y $n_2 = -1$
 La longitud de onda es $\lambda_{L1-L2} = 86,2 \text{ cm}$

Una ventaja que tienen estas dos combinaciones se produce a la hora del cálculo de las ambigüedades (N), ya que al pasar de las dos frecuencias $L1$ y $L2$ a una, ya sea la formando la banda ancha o la banda estrecha, el cálculo de las ambigüedades es más sencillo, ya que se reduce el espacio de búsqueda de las ambigüedades.

Una combinación lineal de fases que tiene unas características especiales e interesantes es la llamada "combinación libre de efecto ionosférico", o más comúnmente conocida como Φ_{L3} o Lc . Esta combinación se utiliza para eliminar en efecto ionosférico, y los coeficientes n_1 y n_2 con los que se cumple esta condición son :

$$n_1 = 1 \text{ elegido arbitrariamente}$$

$$n_2 = - \frac{f_{L2}}{f_{L1}}$$

Por lo tanto la expresión de Φ_{L3} será:

$$\Phi_{L3} = \Phi_{L1} - \frac{f_{L2}}{f_{L1}} \Phi_{L2}$$

Esta combinación tiene la gran ventaja de eliminar el efecto que produce la Ionosfera sobre la señal que transmiten los satélites, pero por otro lado, con esta combinación el valor N de las ambigüedades pierde su naturaleza de número entero, luego no se podrá fijar el valor entero de las ambigüedades y se tendrá que trabajar con valores reales de ambigüedad.

La principal desventaja que tienen cualquiera de las combinaciones lineales de fases es que si asumimos cierto nivel de ruido en la medida de fases sobre las portadoras $L1$ y $L2$, entonces este nivel de ruido se incrementará para estas combinaciones. Este ruido se puede evaluar aplicando la ley de propagación de errores a partir del ruido de cada portadora.

1.4.-CALIDAD Y BONDAD DE LAS OBSERVACIONES.

INTRODUCCIÓN.

Al igual que cualquier observación de topografía clásica, una observación GPS o GLONASS está sometida a varias fuentes de error que se pueden minimizar o modelar según los equipos y metodología de observación que utilicemos. Un receptor determina las distancias que hay entre su antena y las antenas de los satélites desde los cuales está recibiendo su señal. Basándose en estas distancias y en el conocimiento de las posiciones de los satélites, el receptor puede calcular su posición. Sin embargo, diversos errores afectan a la medida de la distancia y por consiguiente se propagan al cálculo de la posición del receptor.

Las medidas de código y las medidas de fase se ven afectadas por errores sistemáticos y por ruido aleatorio. La precisión en posicionamiento absoluto que un usuario puede alcanzar con un receptor depende principalmente de cómo sus sistemas de hardware y software puedan tener

en cuenta los diversos errores que afectan a la medición. Estos errores pueden ser clasificados en tres grupos: los **errores relativos al satélite**, los **errores relativos a la propagación de la señal** en el medio, y los **errores relativos al receptor**.

ELEMENTO	FUENTE DE ERROR
Satélite	Errores en el oscilador Errores o variaciones en los parámetros orbitales
Propagación de la señal	Refracción ionosférica Refracción troposférica S/A. Disponibilidad Selectiva Pérdidas de ciclos Multipath. Ondas reflejadas
Receptor	Errores en el oscilador Error en las coordenadas del punto de referencia Error en el estacionamiento Error en la manipulación del equipo Variación y desfase del centro de la antena

Algunos de estos errores sistemáticos pueden ser modelados e incluso eliminados utilizando combinaciones apropiadas de los observables a partir de una o dos frecuencias, o trabajando en modo diferencial, utilizando dos receptores.

En la medida de la calidad y bondad de una observación van a influir o contribuir dos términos: el **URE** y el **DOP**. El **URE** (User Range Error) es el error cometido en la medida de la pseudodistancia por el usuario. Este error contempla los errores al predecir las efemérides, inestabilidades en el vehículo espacial, relojes de los satélites, efectos ionosféricos y troposféricos, efecto multipath, ruido de la señal y para GPS, la Disponibilidad Selectiva (SA).

Todos estos errores en su conjunto se recogen en el valor ó URE . El **DOP** o Dilución de la Precisión es la contribución puramente geométrica al error en el posicionamiento de un punto. Es un valor adimensional que da una idea de la solidez de la figura formada por el receptor y los satélites que tiene a la vista. Analizando estos factores de error en su conjunto, el error en el posicionamiento de un punto viene expresado por :

$$\text{error rms de posición} = \sigma_{\text{URE}} \cdot \text{DOP}$$

ERRORES RELATIVOS AL SATÉLITE.

ERROR DEL RELOJ DEL SATÉLITE:

Este error es el desfase que tiene el reloj del satélite respecto al Tiempo GPS o respecto al Tiempo GLONASS. Los satélites llevan relojes atómicos con osciladores de cesio o de rubidio, sin embargo ningún reloj, incluso el atómico es perfecto.

Los errores en los osciladores de los satélites pueden eliminarse mediante las correcciones enviadas en el mensaje de navegación que recibe el receptor, y que son calculadas y actualizadas por las estaciones de seguimiento. Para cada reloj de satélite se determina su desfase para una época inicial, y los coeficientes de la marcha o deriva del estado del reloj.

Estos parámetros se graban en el correspondiente satélite y se incluyen en el mensaje de navegación que manda el satélite. Pero aunque el receptor aplique las correcciones para el error del reloj del satélite, sigue permaneciendo un pequeño error residual estimado en unos 10 nanosegundos o menos, y que es debido a la imposibilidad de predecir exactamente la marcha del estado del reloj del satélite.

ERRORES EN LOS PARÁMETROS ORBITALES.

Para calcular su posición, el receptor debe conocer las posiciones de los satélites. Las estaciones de seguimiento registran datos de pseudodistancia y medidas de fase que mandan a la Estación de Control principal, donde con un sofisticado software se predicen las futuras posiciones orbitales de los satélites, es decir sus efemérides. Éstas son transmitidas en el mensaje de navegación del satélite. Pero las efemérides transmitidas por los satélites tendrán asociado un error a causa de que es imposible predecir exactamente sus posiciones. El efecto del error de las efemérides transmitidas en la medida de la pseudodistancia se obtiene proyectando el vector error de la posición del satélite sobre el vector que une el satélite y el receptor. Los errores en los parámetros orbitales se pueden eliminar trabajando con las efemérides precisas de los días de observación, donde aparecen las verdaderas posiciones de los satélites.

Para líneas base cortas, trabajando en modo diferencial con dos receptores, respecto a los mismos satélites de observación, podemos eliminar todos los errores relativos a los satélites, ya que afectan de igual forma a ambos receptores. Para líneas base largas, el error del reloj del satélite se elimina igual, ya que es independiente de la línea base e igual en ambos puntos, pero los errores en los parámetros orbitales no se eliminan del todo, porque los errores que provocan en la pseudodistancia a un satélite en un punto no son los mismos que los que se producen en el otro punto para el mismo satélite e instante. El error depende de la orientación del vector error de la posición del satélite respecto de los vectores satélite-receptor para cada uno de los puntos.

ERRORES RELATIVOS A LA PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL.

La velocidad de propagación de la señal es crítica para cualquier sistema de medida de distancias. Esta velocidad multiplicada por el intervalo de tiempo en que se propagó la señal nos da una medida de la distancia. Si una onda electromagnética se propaga por el vacío, su velocidad de propagación, sea cual sea su frecuencia es la velocidad de la luz (c). Sin embargo, en el caso de observaciones GPS o GLONASS, las señales deben atravesar las capas de la atmósfera hasta llegar al receptor posicionado sobre la superficie de la tierra. Las señales interactúan con partículas cargadas, que provocan un cambio en la velocidad y dirección de propagación, es decir, las señales son refractadas. Cuando la señal viaja por un medio que no es el vacío, ésta sufre un *retardo* debido a que la velocidad de propagación es menor, y a que la trayectoria aumenta su longitud al curvarse por refracción, si el medio no es isótropo.

REFRACCIÓN IONOSFÉRICA.

La Ionosfera es aquella región de la atmósfera comprendida entre 100 y 1000 Km de altitud, donde las radiaciones solares y otras radiaciones ionizan una porción de las moléculas gaseosas liberando electrones, que interfieren en la propagación de ondas de radio. La Ionosfera es un medio disperso para ondas de radio, por lo tanto su índice de refracción es función de la frecuencia de la onda. También es

función de la densidad de electrones, y en menor grado, de la intensidad del campo magnético de la tierra.

Este error es negativo para la medida de fase (se produce un avance de la portadora y se miden distancias más pequeñas), y positivo para las pseudodistancias (se produce un retardo y se miden distancias más largas), pero tienen el mismo valor absoluto.

$$\lambda\Phi = \rho + c \Delta\delta + \lambda N - \Delta^{\text{iono}}(f)$$

$$R = \rho + c\Delta\delta + \Delta^{\text{iono}}(f)$$

El error es proporcional a la densidad de electrones (TEC-Total Electron Content) a lo largo del camino seguido por la señal, y está en función del cuadrado de la longitud de la onda (inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia de la portadora). Este error varía espacial y temporalmente, es decir, para cada punto según su latitud y longitud, y momento de la observación. Se pueden utilizar modelos ionosféricos, como el de Klobuchar (1986) que establecen la distribución del TEC, pero estas concentraciones de electrones son irregulares y poco predecibles, por lo que cualquier modelo ionosférico es sólo una aproximación. El TEC es función del cambio constante en la ionización solar, de la actividad magnética, de los ciclos de las manchas solares, hora del día, lugar de observación, y dirección del camino de la señal. Una expresión en primer orden de aproximación para este retardo es:

$$\Delta^{\text{iono}} = \frac{40.3}{c f^2} \text{TEC} = \frac{A}{f^2}$$

TEC => electrones por m³. (Valores observados de 10¹⁶ a 10¹⁹).

Debido a la dificultad de encontrar un modelo satisfactorio, se emplea un método más eficiente para eliminar la refracción ionosférica que es la utilización de dos señales con diferentes frecuencias. Como el retardo depende de la longitud de la onda, será distinto para cada frecuencia y podremos observar un retardo diferencial entre ambas, que será mayor cuanto mayor sea el retardo ionosférico sufrido, siendo por tanto este deducible.

También se pueden utilizar combinaciones de las observables que por su naturaleza estén libres del efecto ionosférico. Tal es el caso de la combinación de fases llamada "*combinación libre de efecto ionosférico*", en la que partiendo de la siguiente expresión:

$$\Phi_{L1,L2} = n_1 \Phi_{L1} + n_2 \Phi_{L2}$$

lo que se pretende es obtener qué valores deben tener los coeficientes n₁ y n₂ para que los valores del efecto ionosférico que sufren ambas portadoras sea eliminado. Desarrollando esta expresión, se obtienen los valores de n₁ y n₂ para la *combinación libre de efecto ionosférico*, que quedaría de la forma:

$$\Phi_{L1,L2} = \Phi_{L1} \cdot \frac{f_{L2}}{f_{L1}}$$

La eliminación de la refracción ionosférica es la mayor *ventaja* de la combinación lineal libre de efecto ionosférico, pero el término libre de efecto ionosférico no es del todo correcto, ya que para su obtención hay que considerar algunas aproximaciones. Esta combinación libre de efecto ionosférico tiene la *desventaja* de que si N_{L1} y N_{L2} son valores enteros, la combinación da un valor : $N = n_1 N_{L1} + n_2 N_{L2} = N_{L1} - (f_{L2}/f_{L1})N_{L2}$, que no es un valor entero, luego el concepto de fijar las ambigüedades en este caso no se puede aplicar y este valor va a ser siempre un valor real.

Si sólo se registran medidas en una sola frecuencia, tanto en pseudodistancias como en medida de fase, entonces se tiene que emplear un procedimiento alternativo para eliminar el efecto ionosférico. Normalmente se usan modelos empíricos para corregir el efecto, en los que se modela el TEC en función del tiempo, lugar de observación y dirección de la señal. En el mensaje de navegación se incluyen unos parámetros para tal modelo. Usando este modelo se pueden llegar a reducir en un 50% los efectos de la Ionosfera.

Actualmente, estamos saliendo de un mínimo en la actividad de las manchas solares (11 años de ciclo), por lo que las condiciones ionosféricas son ahora más idóneas. Pero dentro de unos 4 años, estaremos cerca del máximo, y entonces los efectos de la Ionosfera en las señales serán mucho peores.

El retardo ionosférico depende del ángulo de elevación del satélite, siendo menor en el cenit, y mayor cuando disminuye el ángulo de elevación. En observaciones nocturnas, los niveles de TEC son menores que durante el día, lo que implica un menor error en la pseudodistancia.

Pero después de la aplicación del modelo empírico transmitido puede quedar algún error ionosférico residual que afectará principalmente a la componente altimétrica del punto y a la estimación del error del reloj del receptor. Este error contribuye poco a la posición planimétrica cuando la concentración de electrones encima del receptor es uniforme.

REFRACCIÓN TROPOSFÉRICA.

La Troposfera es la última zona o capa de la atmósfera (hasta unos 80 Km, pero sólo en los últimos 40 se producen retardos significativos), donde se produce retardo y donde las temperaturas decrecen con el incremento de altura. El espesor de la Troposfera no es el mismo en todas las zonas. La presencia de átomos y moléculas neutros en la Troposfera afecta a las señales de propagación electromagnética. El índice de refracción para un área parcial es función de su temperatura, de la presión de los gases secos y del vapor de agua. Esta atmósfera neutra es un medio no disperso con respecto a las ondas de radio de frecuencias superiores a 15 GHz, por lo tanto, la propagación es independiente de la frecuencia. Consecuentemente, no es necesario distinguir entre medidas de código y fase sobre las portadoras L1 y L2. La desventaja está en que no es posible eliminar la refracción troposférica con medidas en las dos frecuencias. El retardo troposférico experimentado por una señal que va desde un satélite a un punto en la superficie, puede ser expresado en primera aproximación por la siguiente integral a lo largo del camino recorrido por la señal:

$$\Delta^{Trop} = \int (n - 1) ds$$

Se introduce la aproximación de que la integral se realiza a lo largo del camino seguido por la señal. Usualmente, en lugar del índice de refracción se utiliza la refractancia:

$$N^{Trop} = 10^6 (n - 1)$$

$$\Delta^{Trop} = 10^{-6} \int N^{Trop} ds$$

La integral puede ser evaluada conociendo el índice de refracción, o puede ser aproximada por funciones analíticas. Pero lo más normal es utilizar aproximaciones basadas en modelos atmosféricos simplificados. Algunos de estos modelos son: el modelo de Hopfield (1969), modelo de Saastamoinen (1972), modelo de Hopfield modificado, Goad y Goodman (1974), Black (1978), Robinson (1986), etc. En la mayoría de los casos, se considera por separado la *componente seca* y la *componente húmeda*

$$N^{Trop} = N_d^{Trop} + N_w^{Trop}$$

donde la componente seca resulta de la atmósfera seca y la componente húmeda del vapor de agua.

Se puede mejorar el cálculo del retardo troposférico tomando datos meteorológicos en el lugar de observación. A diferencia de la componente seca, la componente húmeda varía espacialmente y temporalmente. La componente seca es la causante de un 90% del total del retardo y puede ser obtenido con precisión de algunos milímetros a partir de medidas de presión en superficie. La componente húmeda es función del vapor de agua a lo largo del camino de la señal.

El gradiente térmico admite modelación con precisión aceptable, pero el principal problema está en la forma de modelar el vapor de agua, que tiene una irregular distribución. El simple uso de medidas meteorológicas en superficie no puede dar la precisión alcanzable con los radiómetros de vapor de agua. Estos instrumentos miden la radiación basal que se recibe desde el espacio en la dirección de la observación, y son capaces de medir el contenido de vapor de agua en la atmósfera.

El retardo se puede evaluar en 1.9-2.5 m en la dirección cenital e incrementa aproximadamente con la cosecante del ángulo de elevación, llegando a ser de 20-28 m a unos 5°.

El efecto del *retardo ionosférico y el troposférico* debido al vapor de agua sobre las emisiones de la banda radioeléctrica es menor cuanto mayor sea la frecuencia, o cuanto menor sea la longitud de la onda. La refracción ionosférica y troposférica puede ser eliminada trabajando en modo diferencial, pero esto es sólo cierto para líneas base pequeñas, donde las medidas de distancias satélite-receptor se ven afectadas de igual forma por la refracción. De otro modo, ya vimos que la refracción ionosférica puede ser eliminada utilizando una adecuada combinación de datos en doble frecuencia.

DISPONIBILIDAD SELECTIVA.

La Disponibilidad Selectiva supone una alteración o manipulación de la información que los satélites de la constelación GPS envían a los usuarios en su mensaje de navegación, manipulación que realiza el Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DoD). Se actúa sobre los estados de los relojes y parámetros orbitales. Trabajando con posicionamiento relativo o diferencial se puede eliminar este error.

PÉRDIDAS DE CICLOS.

Las pérdidas de ciclos suponen un salto en el registro de las medidas de fase, producido por alguna interrupción o pérdida de la señal enviada por el satélite. Estas pérdidas de ciclos pueden ser causadas por la obstrucción de la señal del satélite debido a la presencia de árboles, edificios, puentes, montañas, etc. Esta causa es la más frecuente, pero también pueden ser debidas a una baja SNR (calidad señal-ruido) debido a unas malas condiciones ionosféricas, efecto multipath, receptores en movimiento, o baja elevación del satélite. Otra causa puede ser un fallo en el software del receptor, que conduce a un procesamiento incorrecto de la señal. Una última causa de pérdida de ciclo, aunque suele darse en raras ocasiones, es aquella debida a un mal funcionamiento del oscilador del satélite.

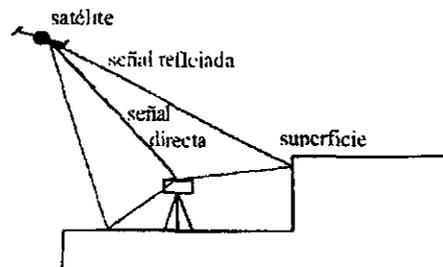
La detección de una pérdida de ciclo y su reparación requiere la localización del salto y determinación de su tamaño. La detección se lleva a cabo por medio de un chequeo o test de cantidad, estos test

pueden ser medida de la fase en bruto, combinaciones de fase, combinaciones de código y fase, etc. Una vez determinado el tamaño de la pérdida de ciclo, la reparación se hace corrigiendo a todas las observaciones de fase siguientes para este satélite y su portadora, según una cantidad fija. El software interno del receptor es capaz (in situ) de detectar y corregir las pérdidas de ciclo.

EFEECTO MULTIPATH.

El efecto multipath o multicamino es causado principalmente por múltiples reflexiones de la señal emitida por el satélite en superficies cercanas al receptor. Estas señales reflejadas que se superponen a la señal directa son siempre más largas, ya que tienen un tiempo de propagación más largo y pueden distorsionar significativamente la amplitud y forma de la onda.

Este efecto puede ser considerablemente reducido eligiendo puntos de estación protegidos de reflexiones (edificios, vehículos, árboles, etc.), es decir, evitar las superficies reflectantes en las proximidades del receptor; y por un apropiado diseño de la antena, como es la utilización de planos de tierra, que reducen las interferencias de señales con baja elevación o incluso con elevación negativa, que son las que provocan el multipath, en otras palabras, se intenta reducir la intensidad de las señales secundarias y aislar a la señal directa. El efecto multipath depende de la frecuencia de la portadora. Por lo tanto, las medidas de fase se verán menos afectadas que las medidas de código, donde el efecto multipath puede alcanzar hasta el nivel de metro.



Efecto Multipath.

ERRORES RELATIVOS AL RECEPTOR.

ERROR DEL RELOJ.

Cuando un receptor recibe una señal de un satélite, en ese momento su reloj interno tendrá un desfase o error con respecto a la Escala de Tiempo. Este error afectará a todas las medidas de pseudodistancias realizadas para cada época.

Los errores en los osciladores de los receptores los podemos eliminar trabajando con posicionamiento relativo por medidas de fase, planteando las ecuaciones de dobles diferencias.

ERROR EN EL ESTACIONAMIENTO DE LA ANTENA.

Los errores en el estacionamiento de la antena tienen menos influencia y las exigencias de estacionamiento son muy inferiores a las de los instrumentos de observación clásica. No necesitan una altísima estabilidad, ya que pequeños desplazamientos, vibraciones o torsiones en nada afectan a la observación de las señales de los satélites.

ERRORES EN LA MANIPULACIÓN DE LOS EQUIPOS.

Los errores de manipulación se producen cuando no se siguen las instrucciones del fabricante del instrumento o cuando éstas suelen descuidarse cuando se trabaja rutinariamente.

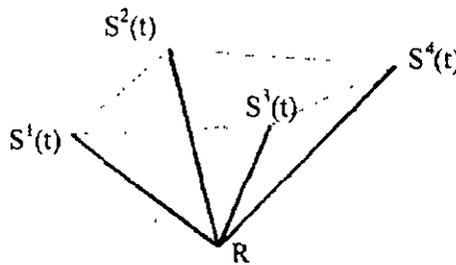
Por ejemplo, es importante no comenzar una observación hasta que no se hayan sincronizado perfectamente todos los satélites, ya que lo único que estaremos haciendo es introducir ruido a la observación.

VARIACIÓN DEL CENTRO RADIOELÉCTRICO DE LA ANTENA.

La variación y desfase del centro de la antena se debe a la falta de coincidencia entre el centro radioeléctrico o punto que realmente se posiciona, ya que es el punto al que llega la señal; y el centro mecánico o físico, generando un error residual por excentricidad que puede ser de unos milímetros. Para evitar este error en posicionamiento relativo se recomienda una orientación aproximada común para todas las antenas, ya que el fabricante monta en el interior de todas las carcasas el elemento físico receptor en la misma posición respecto a alguna referencia exterior del conjunto, y trabajando en modo diferencial este error se eliminará en ambas estaciones.

DILUCIÓN DE LA PRECISIÓN.

La geometría de los satélites visibles es un factor importante a la hora de conseguir altas precisiones en el posicionamiento de un punto. Dicha geometría cambia con el tiempo como consecuencia del movimiento orbital de los satélites. Un factor que mide la bondad de esta geometría es el denominado factor de dilución de la precisión (dilution of precision , **DOP**).



El valor del DOP puede ser interpretado geoméricamente como el volumen del cuerpo formado por los satélites y el receptor. Cuanto mayor sea el volumen de este cuerpo mejor será la geometría, y por lo tanto menor será el valor del DOP, siendo el valor ideal la unidad. Como ya se vio anteriormente, el valor del DOP es el factor por el que debe ser multiplicado el error obtenido en las pseudodistancias para obtener el error final en el posicionamiento. Los valores de DOP más utilizados son los siguientes:

- * **GDOP:** Dilución de precisión en posición y estado del reloj.
- * **PDOP:** Dilución de precisión en posición.
- * **TDOP:** Dilución de precisión en el estado del reloj.
- * **HDOP:** Dilución de precisión en planimetría.

- * **VDOP**: Dilución de precisión en altimetría.
- * **RDOP**: Dilución de precisión relativa entre dos puntos.

PROCESAMIENTO DE DATOS.

INTRODUCCIÓN. MODELO DE AJUSTE POR MMCC.

Antes de introducirnos en el procesamiento de los datos, ya sea para el cálculo de *posicionamientos absolutos* o puntos singulares (single points), o para el cálculo de *posicionamientos diferenciales*, debemos analizar el modelo de ajuste a utilizar.

Se pueden utilizar diversas técnicas de ajuste, pero aquí nos vamos a basar en el método de ajuste estándar por mínimos cuadrados, basado en la utilización de una serie de ecuaciones, donde las observaciones son expresadas en función de los parámetros incógnitas. En el caso de que las ecuaciones no sean lineales, es preciso linealizarlas por medio del desarrollo en serie de Taylor, para lo cual es preciso conocer unos valores aproximados de las incógnitas. El desarrollo en serie de Taylor puede ser truncado a partir de los términos de segundo orden, con el fin de obtener una función lineal con respecto a las incógnitas.

El modelo de observación lineal conseguido tras aplicar el desarrollo en serie de Taylor, puede ser expresado en forma matricial de la siguiente forma : $L = A \cdot x$.

Donde :

L : Vector columna de las observaciones.

A : Matriz de diseño.

x : Vector columna de las incógnitas.

Si suponemos el caso en el que tengamos “n” ecuaciones y “u” incógnitas, siendo $n > u$, entonces la matriz de diseño, A, tendrá “n” filas y “u” columnas. Pero para estas condiciones, tendremos un sistema de ecuaciones compatible sobredeterminado (es decir existen más ecuaciones que incógnitas), y por lo general, debido a los errores inherentes de la observación, no será un sistema consistente, existiendo unos residuos, V, para cada ecuación. Por lo tanto, teniendo en cuenta estos residuos, el modelo queda de la forma :

$$L + V = A \cdot x$$

La resolución de este sistema se realiza aplicando el principio de mínimos cuadrados, que es:

$V^T P V = \text{mínimo}$. La aplicación de este principio en las ecuaciones de observación lleva al siguiente sistema de ecuaciones normales:

$$A^T \cdot P \cdot A \cdot x = A^T \cdot P \cdot L$$

donde la solución para los parámetros incógnita, x, es:

$$x = (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot L$$

que puede ser simplificada por:

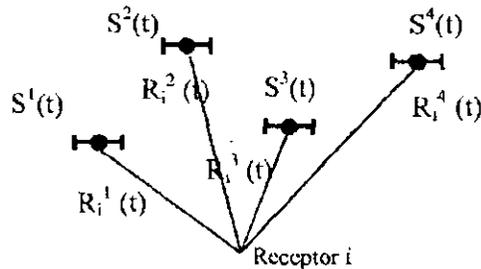
$$x = N_A^{-1} \cdot t$$

donde $N_A = (A^T \cdot P \cdot A)$ y $t = A^T \cdot P \cdot L$.

CÁLCULO DE POSICIONAMIENTOS ABSOLUTOS.

La expresión de la pseudodistancia para medidas de código para una época t correspondiente al receptor "i" y al satélite "j", tiene la siguiente expresión:

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) + c \cdot \delta_i^j(t) - c \cdot \delta_i(t)$$



Siendo:

$R_{ij}(t)$: La pseudodistancia entre el satélite y el receptor.

$\rho_{ij}(t)$: La distancia geométrica real entre el satélite y el receptor.

c : Velocidad de la luz en el vacío.

$\delta_{ij}(t)$: Término que representa los errores o desfases de los relojes respecto a la escala de tiempos.

Pero en esta ecuación, la expresión de la distancia geométrica real entre satélite-receptor, ρ , tiene una forma no lineal, y por lo tanto, tendremos que linealizarla aplicando el desarrollo en serie de Taylor y partiendo de unos valores aproximados de las coordenadas del punto (X_{i0} , Y_{i0} , Z_{i0}). En el modelo que vamos a considerar, únicamente tendremos en cuenta los errores de los relojes, sin considerar los efectos ionosféricos y troposféricos. La ecuación, una vez linealizada la expresión de la pseudodistancia queda de la siguiente forma:

$$R_i^j(t) = \rho_{i0}^j(t) - \frac{X^j(t) - X_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta X_i - \frac{Y^j(t) - Y_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta Y_i - \frac{Z^j(t) - Z_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta Z_i + c \cdot \delta_i^j(t) - c \cdot \delta_i(t)$$

siendo i el punto sobre la superficie y j el satélite. Operando, y dejando en la parte derecha de la expresión únicamente los parámetros incógnita y en la izquierda los valores conocidos, tenemos que:

$$R_i^j(t) - \rho_{i0}^j(t) - c \cdot \delta_i^j(t) = - \frac{X^j(t) - X_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta X_i - \frac{Y^j(t) - Y_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta Y_i - \frac{Z^j(t) - Z_{i0}}{\rho_{i0}^j(t)} \Delta Z_i - c \cdot \delta_i(t)$$

- 90 -

el término $\delta_i(t)$ no se considera como incógnita, puesto que se supone conocido a partir de los datos que envía el satélite en su mensaje de navegación.

La expresión anterior, válida para la época t contiene cuatro incógnitas (ΔX_i , ΔY_i , ΔZ_i , $\delta_i(t)$), por lo tanto, si dispusiéramos de una única época t y quisiéramos resolver el sistema, necesitaríamos un mínimo de 4 satélites. En este caso, nos encontramos ante un sistema compatible determinado, en el que

existe solución única. El sistema de ecuaciones formado por las 4 pseudodistancias a los 4 satélites se podría expresar de la forma $A \cdot x = L$, y los valores de la incógnitas los obtendríamos mediante $x = A^{-1} \cdot L$. Si se mide el valor de la pseudodistancia a un n° de satélites mayor que 4, sean j satélites en una época t, se puede plantear un sistema de j ecuaciones de pseudodistancia con 4 incógnitas y resolver por MMCC, siendo la expresión del vector de incógnitas, x, como se vio anteriormente, es decir, $x = N_{A-1} \cdot t$.

Obteniendo los valores de las incógnitas del punto $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ para cada época t, podemos añadir estos valores a las coordenadas aproximadas del punto y obtener los valores X,Y,Z de las coordenadas del punto de estación. Hay que recalcar que la selección de los valores aproximados de las coordenadas del punto es completamente arbitraria, incluso pueden ser cero, pero esto requiere más iteraciones.

El posicionamiento absoluto de un punto se puede aplicar en cada época. Pero si tenemos un cierto n° de épocas registradas, podremos resolver el sistema para cada época, obteniendo las coordenadas del punto en cada época y luego hacer una media de todas estas coordenadas para obtener una mejor solución en el posicionamiento del punto. Este proceso de cálculo recibe el nombre de “ **cálculo de un punto simple o single point** ”.

Todo este proceso de cálculo de medidas de pseudodistancia por código puede ser planteado para la portadora L1 y para la portadora L2, utilizando el código C/A o P, y el código P, respectivamente. También es posible realizar posicionamientos absolutos con medidas de fase, pero no son aplicables debido a que resulta muy cara la herramienta para la precisión esperada.

CÁLCULO DE POSICIONAMIENTOS DIFERENCIALES.

Mientras que en el *posicionamiento absoluto* sólo interviene un único receptor, del que se pretenden obtener sus coordenadas directamente a partir de las pseudodistancias a los satélites, en el *posicionamiento diferencial* intervienen dos receptores y el objetivo de este tipo de posicionamiento es la determinación de las coordenadas de un punto desconocido a partir de otro punto, cuyas coordenadas son conocidas y del cálculo de la línea base que los une.

Sea A un punto conocido, B un punto desconocido y v_{AB} el vector que los une, podemos expresar el vector de posición de B a partir del vector de posición de A por medio de la siguiente expresión:

$$X_B = X_A + V_{AB}$$

Las componentes del vector son:

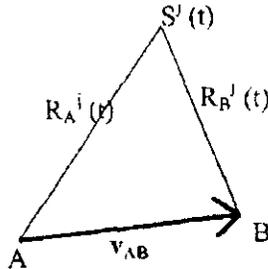
$$v_{AB} = \begin{vmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{vmatrix}$$

CÁLCULO DEL POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL POR CÓDIGO.

Partiendo de la ecuación de la pseudodistancia para medidas de código, ésta puede ser planteada para dos puntos A y B observando a un mismo satélite j y en una misma época de la forma siguiente:

$$R_A^j(t) = \rho_A^j(t) + c \cdot \delta^j(t) - c \cdot \delta_A(t)$$

$$R_B^j(t) = \rho_B^j(t) + c \cdot \delta^j(t) - c \cdot \delta_B(t)$$



El vector v_{AB} puede ser expresado como diferencia de ambas pseudodistancias:

$$v_{AB} = R_B^j(t) - R_A^j(t) = R_{AB}^j(t)$$

Sustituyendo los valores de $R_A(t)$ y $R_B(t)$, se elimina el error del reloj del satélite, quedando:

$$v_{AB} = \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) - c \cdot \delta_B(t) + c \cdot \delta_A(t) =$$

$$= \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) + c (\delta_A(t) - \delta_B(t)) = R_{AB}^j(t)$$

Esta expresión representa la *ecuación en simple diferencias* para posicionamiento relativo por medida de código.

Sustituyendo en la expresión anterior, los valores de $\rho_A(t)$ y $\rho_B(t)$ por su expresión linealizada, y colocando los términos conocidos a la izquierda, queda:

$$R_{AB}^j(t) - \rho_{B_0}^j(t) + \rho_{A_0}^j(t) = - \frac{X^j(t) - X_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta X_B - \frac{Y^j(t) - Y_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Y_B - \frac{Z^j(t) - Z_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Z_B$$

$$+ \frac{X^j(t) - X_{A_0}}{\rho_{A_0}^j(t)} \Delta X_A + \frac{Y^j(t) - Y_{A_0}}{\rho_{A_0}^j(t)} \Delta Y_A + \frac{Z^j(t) - Z_{A_0}}{\rho_{A_0}^j(t)} \Delta Z_A$$

$$+ c \cdot (\delta_A(t) - \delta_B(t))$$

donde inicialmente el n° de incógnitas es 8. Sin embargo, para posicionamiento relativo o diferencial se supone un punto conocido, sea A, y por lo tanto $.x_A = .y_A = .z_A = 0$, y la expresión queda:

$$R_{AB}^j(t) - \rho_{B_0}^j(t) + \rho_{A_0}^j(t) = - \frac{X^j(t) - X_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta X_B - \frac{Y^j(t) - Y_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Y_B - \frac{Z^j(t) - Z_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Z_B$$

$$+ c \cdot (\delta_B(t) - \delta_A(t))$$

dónde las incógnitas se reducen a 5. Una ecuación de este tipo puede ser planteada para cada época t y para cada satélite j , por lo tanto para resolver el sistema en una época se necesitan un mínimo de 5 satélites. Si el n° de satélites es mayor se realiza un ajuste por mínimos cuadrados, como ya vimos en el caso de posicionamiento absoluto.

Por cada época que aumentemos tendremos 2 nuevas incógnitas de los relojes $\delta_B(t)$ y $\delta_A(t)$. Si tenemos un cierto n° de épocas, podemos resolver el sistema para cada época, calculando un valor de $R_{AB}(t)$, y luego hacer una media entre todos los valores obtenidos.

Todo este proceso puede ser planteado tanto para la portadora L1 como para la portadora L2, donde la notación de las expresiones sería $R_{AB;L1}(t)$ y $R_{AB;L2}(t)$, para cada satélite i y cada época t .

CÁLCULO DEL POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL POR FASE.

Simple diferencias.

Partiendo de la ecuación de pseudodistancias para medidas de fase :

$$\Phi_i^j(t) - f \delta_i^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_i^j(t) + N_i^j - f \delta_i(t)$$

ésta puede ser planteada para dos puntos A y B observando a un mismo satélite en una misma época t , de la forma siguiente:

$$\Phi_A^j(t) - f \delta_i^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_A^j(t) + N_A^j - f \delta_A(t)$$

$$\Phi_B^j(t) - f \delta_i^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_B^j(t) + N_B^j - f \delta_B(t)$$

Restando ambas ecuaciones, tendremos:

$$\Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda} (\rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)) + N_B^j - N_A^j - f \cdot (\delta_B(t) - \delta_A(t))$$

obteniendo la *ecuación en simple diferencias*. Podemos reducir la expresión considerando las siguientes notaciones:

$$N_{AB}^j = N_B^j - N_A^j$$

$$\delta_{AB}(t) = \delta_B(t) - \delta_A(t)$$

$$\Phi_{AB}^j(t) = \Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t)$$

$$\rho_{AB}^j(t) = \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)$$

Sustituyendo en la ecuación de simples diferencias:

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - f \delta_{AB}(t)$$

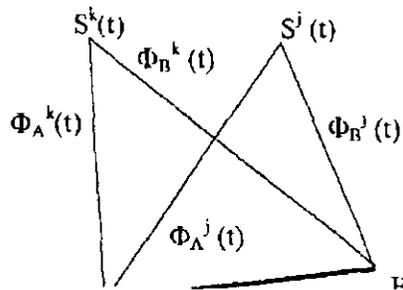
Obteniendo la forma final de la *ecuación de simples diferencias*, donde podemos comprobar que se ha eliminado el error del estado del reloj del satélite ($\delta_j(t)$).

Doble diferencias.

Suponiendo que tenemos dos receptores situados en los puntos de estación A y B, y dos satélites "j" y "k", podemos obtener dos expresiones en simple diferencia:

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j - \delta_{AB}(t)$$

$$\Phi_{AB}^k(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^k(t) + N_{AB}^k - \delta_{AB}(t)$$



Si las frecuencias de emisión de los dos satélites son las mismas ($f_j = f_k$), restando ambas expresiones obtenemos la **ecuación en dobles diferencias** :

$$\Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} (\rho_{AB}^k(t) - \rho_{AB}^j(t)) + N_{AB}^k - N_{AB}^j$$

podemos simplificar la expresión de la siguiente forma:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t) + N_{AB}^{jk}$$

Donde:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t) = \Phi_B^k(t) - \Phi_B^j(t) - \Phi_A^k(t) + \Phi_A^j(t)$$

$$\rho_{AB}^{jk}(t) = \rho_B^k(t) - \rho_B^j(t) - \rho_A^k(t) + \rho_A^j(t)$$

$$N_{AB}^{jk}(t) = N_B^k(t) - N_B^j(t) - N_A^k(t) + N_A^j(t)$$

Como podemos comprobar en esta ecuación de doble diferencias se han eliminado las incógnitas de los estados de los relojes de los receptores. Esto es válido para el caso en el que se realicen observaciones simultáneas y siendo iguales las frecuencias de las señales de los satélites.

Triple diferencias.

Hasta ahora hemos considerado únicamente una época. Pero para eliminar la incógnita de las ambigüedades es necesario hacer la diferencia de dos ecuaciones de doble diferencias para dos épocas. Denotando las dos épocas por t_1 y t_2 , tenemos:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_1) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_1) + N_{AB}^{jk}$$

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_2) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_2) + N_{AB}^{jk}$$

Restando ambas expresiones de doble diferencias, tendremos:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_2) - \Phi_{AB}^{jk}(t_1) = \frac{1}{\lambda} (\rho_{AB}^{jk}(t_2) - \rho_{AB}^{jk}(t_1))$$

obteniendo la *ecuación de triple diferencias*, que puede ser simplificada de la forma:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_2) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_2)$$

Donde:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_2) = \Phi_B^k(t_2) - \Phi_B^j(t_2) - \Phi_A^k(t_2) + \Phi_A^j(t_2) - \Phi_B^k(t_1) + \Phi_B^j(t_1) + \Phi_A^k(t_1) - \Phi_A^j(t_1)$$

$$\rho_{AB}^{jk}(t_2) = \rho_B^k(t_2) - \rho_B^j(t_2) - \rho_A^k(t_2) + \rho_A^j(t_2) - \rho_B^k(t_1) + \rho_B^j(t_1) + \rho_A^k(t_1) - \rho_A^j(t_1)$$

Existen dos grandes ventajas a la hora de trabajar con ecuaciones en triple diferencias como son:

- La eliminación de la incógnita N (ambigüedades).
- La inmunidad de las ecuaciones en triple diferencias a los cambios en las ambigüedades. estos cambios son denominados *pérdidas de ciclo*.

Para desarrollar el cálculo del posicionamiento diferencial con medidas de fase vamos a partir del modelo de ecuación de doble diferencias, que multiplicada por λ para pasar a unidades de longitud, se obtiene:

$$\lambda \Phi_{AB}^{jk}(t) = \rho_{AB}^{jk}(t) + \lambda N_{AB}^{jk}$$

donde el término $\rho_{j,kAB}$, contiene las siguientes distancias geométricas:

$$\rho_{AB}^{jk}(t) = \rho_B^k(t) - \rho_B^j(t) - \rho_A^k(t) + \rho_A^j(t)$$

y cada uno de estos cuatro términos debe ser linealizado partiendo de unos valores aproximados de la coordenadas de los puntos.

Si pasamos los términos conocidos a la parte izquierda de la expresión, el término que denotaremos por $I_{j,kAAB}(t)$ de valores conocidos será:

$$I_{AB}^{jk}(t) = \lambda \Phi_{AB}^{jk}(t) - \rho_{B_0}^k(t) + \rho_{B_0}^j(t) + \rho_{A_0}^k(t) - \rho_{A_0}^j(t)$$

el cual comprende el valor medido $\lambda \Phi_{j,kAB}(t)$ por diferencia de fase y los términos calculados a partir de los valores aproximados de las coordenadas. La ecuación de doble diferencias en su expresión linealizada es:

$$I_{AB}^{jk}(t) = a_{X_A}^{jk}(t) \cdot \Delta X_A + a_{Y_A}^{jk}(t) \cdot \Delta Y_A + a_{Z_A}^{jk}(t) \cdot \Delta Z_A + a_{X_B}^{jk}(t) \cdot \Delta X_B + a_{Y_B}^{jk}(t) \cdot \Delta Y_B + a_{Z_B}^{jk}(t) \cdot \Delta Z_B + \lambda N_{AB}^{jk}$$

donde los coeficientes $a_{jk}(t)$ forman parte de la linealización de la expresión de las distancias geométricas receptor-satélite. Esta expresión representa el caso general de una línea base donde los dos puntos son desconocidos. Sin embargo, en el posicionamiento diferencial las coordenadas de un punto deben ser conocidas, y por lo tanto se reduce el número de incógnitas. Si suponemos que el punto A es conocido, entonces $\Delta X_A, \Delta Y_A, \Delta Z_A = 0$, y la expresión queda de la forma:

$$\rho_{AB}^k(t) = \lambda \Phi_{AB}^k(t) - \rho_{B_0}^k(t) + \rho_{B_0}^j(t) + \rho_A^k(t) - \rho_A^j(t)$$

$$\rho_{AB}^k(t) = a_{X_{AB}}^k(t) \cdot \Delta X_B + a_{Y_{AB}}^k(t) \cdot \Delta Y_B + a_{Z_{AB}}^k(t) \cdot \Delta Z_B + \lambda N_{AB}^k$$

Tomando un satélite de referencia, sea j, una ecuación de este tipo puede ser planteada para cada época t y para cada satélite con el de referencia j. Para una época inicial t_0 , el número entero de longitudes de onda para un satélite S será N. Este valor de N se puede expresar como:

$$N = N_0 + \Delta N$$

donde N_0 es el valor aproximado de las ambigüedades para la época t_0 inicial, calculado a partir de las coordenadas aproximadas del punto, por lo tanto, nuestra incógnita, en realidad es el valor de ΔN , que tenemos que sumar al valor inicial N_0 para obtener el valor de la ambigüedad inicial. Este valor de N se puede considerar constante en el tiempo, y cada vez que la distancia satélite-receptor varíe en una vez el valor de la longitud de la onda, el valor de N variará en una unidad. Por lo tanto, si en un momento determinado calculamos N (el de la época inicial), podremos posteriormente calcular los N para el resto de épocas, ya que los $\Delta\Phi$ de cada época con respecto a la época inicial son conocidos, gracias a las mediciones de diferencia de fase. Hay que considerar un valor N de ambigüedad de cada satélite para la época inicial t_0 , y a partir de aquí considerar el valor de N constante en el tiempo.

Se plantea un sistema de ecuaciones de doble diferencias y se resuelve por MMCC como en los casos anteriores. Se obtienen las coordenadas del punto desconocido y el valor, en número real, de las ambigüedades. Con este valor real de N tenemos que llegar al valor entero utilizando una de las técnicas de búsqueda de ambigüedades.

Las coordenadas aproximadas del punto desconocido se obtienen planteando las ecuaciones de triple diferencias donde se eliminaba el valor de la ambigüedad. Esta solución sólo puede ser aproximada debido a la correlación que existe en estas ecuaciones, pero que sin embargo, mejora la solución del punto obtenida por medidas de código. Estos valores aproximados de X_{B_0}, Y_{B_0} , y Z_{B_0} serán utilizados para los valores de $\rho_{B_0}^k(t)$ a cada uno de los satélites en cada época en las ecuaciones de dobles diferencias.

Todo esto puede ser planteado tanto para la portadora L1 como para la portadora L2. Si se poseen medias de fase sobre ambas portadoras L1 y L2 pueden ser planteadas algunas de las combinaciones tratadas.

Técnicas para la resolución de ambigüedades.

a) Resolución de ambigüedades para medidas de fase de una sólo frecuencia.

Este método tiene su más directa aplicación cuando sólo se dispone de las medidas de fase en una única frecuencia (L1 o L2). Las medidas son modeladas por medio de la ecuación anterior, y tras linealizarla es procesada. Dependiendo del modelo elegido, se tienen en cuenta en un ajuste común las incógnitas (coordenadas del punto, errores de los relojes, ...) junto con el valor de N. La naturaleza entera del valor de N se pierde y es estimado como valor real. Para fijar las ambigüedades a valores enteros, se realiza un ajuste secuencial, analizando la desviación estandar de N para ser determinada con mayor fiabilidad.

b) Resolución de ambigüedades para medidas de fase de doble frecuencia.

La resolución de ambigüedades para medidas de fase de doble frecuencia cambia significativamente. Hay muchas ventajas en este caso porque se pueden formar varias combinaciones lineales. Se han propuesto varias técnicas como la de la *banda ancha*, y la de la *banda estrecha*.

La expresión de la banda ancha es la siguiente : $\Phi_w = \Phi_{L1} - \Phi_{L2}$. La frecuencia de esta señal es $f_w = 347,82$ MHz y la longitud de onda correspondiente es $\lambda_w = 86,2$ cm. Esto significa un incremento importante comparado con las longitudes de onda originales 19 cm ($L1$) y 24,4 cm ($L2$). El uso de la banda ancha (L_w) proporciona una reducción del espacio búsqueda de ambigüedades. Esto es la clave para una solución más sencilla del valor entero de las ambigüedades. El ajuste basado en el modelo de banda ancha da como resultado ambigüedades de banda ancha N_w , que son más fáciles de resolver que las ambigüedades de la portadora base.

Lo mismo ocurre cuando se utiliza la banda estrecha.

Técnica de búsqueda.

La información resultante de la matriz de varianza-covarianza del ajuste de las ambigüedades, puede ser usada como una técnica de búsqueda. En esta técnica, todos los valores enteros localizados en una determinada región de confianza alrededor de la solución, son considerados candidatos para la solución final de la ambigüedad. Por lo tanto, todas las combinaciones posibles de estas ambigüedades son consideradas como valores conocidos y sustituidos en subsiguientes ajustes. Del conjunto de soluciones, la mejor solución que se toma es la combinación de valores enteros en los que es menor el error medio cuadrático para la posición que es tomada como mejor solución. Esta solución se elige cuando el ratio (que indica la fiabilidad del cálculo) del error medio cuadrático entre la mejor y la segunda mejor solución es mayor de 2 ó 3. Este método solo se aplica para el cálculo de una única línea base.

Un método ligeramente más sofisticado es el denominado Método Rápido de Resolución de Ambigüedades por Aproximación (*FARA*), desarrollado por Frei y Beutler (1992). Las principales características de este método son:

- Usa información estadística del ajuste inicial para seleccionar un rango de búsqueda.
- Usa información de la matriz de varianza-covarianza para rechazar el conjunto de ambigüedades que no son aceptables desde un punto de vista estadístico.
- Aplica hipótesis estadísticas para seleccionar los valores correctos de las ambigüedades.

El algoritmo de FARA puede ser dividido en cuatro pasos:

- .- Cálculo de una solución flotante para la portadora.
- .- Elección de los conjuntos de valores de las ambigüedades que serán testeadas.
- .- Cálculo de una solución fija para cada conjunto de valores de las ambigüedades.
- .- Comprobación o chequeo estadístico de la solución fijada con la menor varianza.

Se estiman valores reales para las ambigüedades en doble diferencias basándose en las medidas de fase sobre la portadora y realizando un ajuste donde se calcula la matriz cofactor de las incógnitas y la varianza a posteriori de la unidad de peso, de donde se puede calcular la matriz de varianza-covarianza de las incógnitas y las desviaciones estándar de las ambigüedades. El criterio para elegir los valores de las ambigüedades que serán testeadas, está basado en los intervalos de confianza de los valores reales de las ambigüedades. Con este y 51 otros criterios se pretende reducir el número de posibles conjuntos de valores enteros de las ambigüedades. Incluso una más impresionante reducción se consigue si se dispone de medidas de fase en dos frecuencias. Seguidamente se realiza un ajuste por mínimos cuadrados con valores aproximados de las ambigüedades para cada conjunto de valores de las ambigüedades, consiguiendo componentes de líneas base ajustadas y un factor de varianza a posteriori.

Finalmente se investiga la solución con la menor varianza a posteriori. Las componentes de la línea base para esta solución son comparadas con la solución flotante o fluctuante (float). Si la solución es compatible, se acepta. Esta *compatibilidad* puede ser chequeada por medio de la distribución χ^2 , que testea la compatibilidad de la varianza a posteriori con la varianza a priori.

Lo que es más, se puede aplicar un test de Fisher a la solución con la menor varianza y a la de segunda menor varianza para asegurar que no están correlados. Euler en 1990 presentó técnicas de búsqueda muy eficientes y rápidas, basadas en la técnica FARA. Primero, se introduce un conjunto de valores enteros de las ambigüedades en el proceso de ajuste, consiguiéndose de este modo un constreñimiento de las soluciones de las ambigüedades, así como del valor de la varianza a posteriori. La influencia de otros conjuntos de ambigüedades sobre la solución inicial y la varianza a posteriori se determina sin recalcularse el ajuste enteramente. Esta influencia puede ser calculada por medio de alguna matriz simple y por la intervención de un vector donde debe ser invertida solo una matriz reducida con la dimensión de las ambigüedades constreñidas.

1.5.-MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO.

Podemos diferenciar dos modos de posicionamiento, y dentro de ellos las variantes que se pueden considerar. Fundamentalmente son el absoluto y el diferencial.

1. POSICIONAMIENTO ABSOLUTO.

Se realiza con un único receptor, y consiste en la solución de una intersección directa de todas las distancias receptor-satélite sobre el lugar de estación en un período de observación dado. La medida y la solución son por lo tanto directas.

Para llevar a cabo el posicionamiento, el receptor recibe las señales de los satélites y determina su posición en coordenadas absolutas y en el sistema de referencia al que están referidos los satélites. Las observables utilizadas para el posicionamiento absoluto suelen ser los códigos, pero también se podrían utilizar las diferencias de fase o ambas.

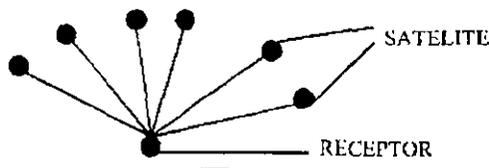
Para resolver un posicionamiento absoluto es necesario recibir la información de al menos cuatro satélites, ya que cada uno de ellos proporciona una ecuación al sistema y nuestras incógnitas son cuatro (X,Y,Z y estado del reloj del receptor). Esto está garantizado gracias a las configuraciones de las constelaciones NAVSTAR y GLONASS, según las cuales siempre tendremos en cualquier lugar del planeta al menos cuatro satélites sobre el horizonte.

El posicionamiento absoluto tiene la ventaja de que con un sólo instrumento de observación podemos obtener nuestra posición, pero posee una serie de inconvenientes que repercuten seriamente en la precisión del posicionamiento, y por ello no hace del método una aplicación apropiada en trabajos de precisión. Entre los inconvenientes más relevantes destacan:

- * Influencia importante de los errores producidos por la atmósfera.
- * En el caso de recibir señales de la constelación NAVSTAR, el efecto de la disponibilidad selectiva (S/A) hace que nuestro posicionamiento no sea el correcto.
- * Imposibilidad de eliminar errores por compensación, como son el efecto multipath, osciladores, excentricidad de la antena, retardo atmosférico, etc.

Esto, hace sea una forma expedita de posicionamiento, resultando útil para usuarios de barcos, aviones, vehículos, deporte, ocio y todas aquellas aplicaciones donde la tolerancia de error al determinar una posición esté por encima de los cien metros, que viene ser la precisión que ofrece generalmente el método, en función del tipo de receptor, estado de la constelación y condiciones de observación. Las soluciones se suelen obtener en tiempo real, bien con solución instantánea de navegación o por

resolución de un sistema minimocuadrático en el que la redundancia del sistema está en función del tiempo de observación. Se habla entonces de los posicionamientos absolutos más precisos (puntos singulares o "single point").



Situación de un posicionamiento absoluto.

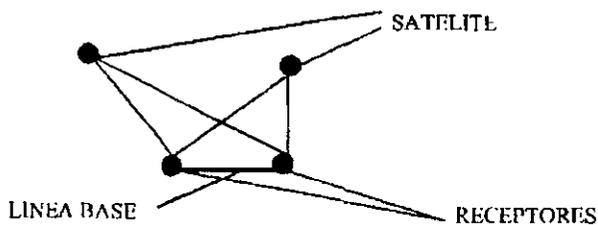
2. POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL.

Es el que se realiza cuando las precisiones requeridas son mayores. Será mejor o peor en función del instrumental utilizado y la técnica de posicionamiento diferencial a la que se recurra.

El posicionamiento diferencial consiste en hallar la posición absoluta de un punto (móvil, objetivo, etc.) mediante las observaciones realizadas desde ese punto a unos determinados satélites, sumadas a las realizadas en ese mismo instante desde otro punto (referencia) a esos mismos satélites. Por lo tanto, aquí aparece el concepto de *línea base*, que es la línea recta que une el punto de referencia y el punto objetivo.

Esta línea base, no es medida de forma directa, ya que nuestras observaciones son sobre los satélites y no entre los puntos. Por lo tanto, la obtención de la línea base se produce de forma indirecta. Es por esto que las incógnitas no son los incrementos de coordenadas entre los dos puntos, sino que son los diferenciales (dx , dy , dz) que hay que añadir a las coordenadas aproximadas absolutas (X_0 , Y_0 , Z_0) de cada punto. Si conocemos de partida las coordenadas del punto de referencia, las incógnitas se reducen a las del punto objetivo, que una vez halladas, unidas a las del punto de referencia, nos darán las componentes y valores de la línea base que los une.

Para resolver estos sistemas, se recurre a los algoritmos de simples, dobles y triples diferencias, explicados en el capítulo anterior, con los que se consigue eliminar gran parte de los errores que afectan a la observación y garantizan una posición relativa excelente entre dos puntos unidos por una línea base. Por lo tanto, con este método podemos tener posiciones relativas muy buenas, pero las posiciones absolutas en el sistema de referencia son igual de precisas que si hubiéramos usado un posicionamiento absoluto. Para solucionar esto, se introducen como puntos de referencia aquellos de los que se tiene conocimiento de su posición absoluta con precisión sobre el sistema de referencia en el que estamos trabajando.



Situación de un posicionamiento diferencial

Dependiendo de las observables, instrumental de observación y software de cálculo utilizados, podemos citar las siguientes técnicas o métodos posicionamiento diferencial:

- **Estático.** Este modo de posicionamiento consiste en el estacionamiento de receptores que no varían su posición durante la etapa de observación. La referencia puede establecerse en cualquiera de ellos y la precisión será función del tiempo de observación, de la geometría y del instrumental utilizado.

Una variante del método estático es el denominado *estático rápido*, el cual se puso en funcionamiento gracias a la inclusión de algoritmos de tratamiento de las señales y espacios de búsqueda de ambigüedades más sólidos y rápidos. De este modo, el tiempo de observación y de cálculo se reducen considerablemente. Sirva como ejemplo que este tiempo se puede reducir a diez minutos en instrumentos monofrecuencia y a un minuto en instrumentos bifrecuencia.

Podemos dar una relación de tiempos mínimos y tiempos aconsejables de un modo general en los cuales los resultados ya son satisfactorios:

	Tiempo mínimo	Tiempo óptimo
Instr. monofrecuencia	10 min	20 min.
Instr. bifrecuencia	1 min.	10 min

Cuando la distancia entre puntos supera los cien kilómetros o la diferencia de altitud entre ellos supera los 500 m, se debe plantear el prolongar estos tiempos de observación para contrarrestar los errores producidos por la Ionosfera y la Troposfera.

El método estático es el que mayor precisión proporciona, pero también es el que más tiempo de observación requiere. Se pueden obtener precisiones mejores de una parte por millón si utilizamos las observables de diferencia de fase.

Este método está especialmente indicado para:

- * Confección de redes fundamentales en las cuales se vayan a apoyar trabajos de Cartografía, Fotogrametría o proyectos de ingeniería.
- * Obtención de puntos de apoyo fotogramétrico y control de puntos existentes.
- * Control de deformaciones en superficies y estructuras.
- * Proyectos de investigación sobre el comportamiento y estructura de la atmósfera terrestre, como afecta a las señales, estudio de precisiones, etc.

No obstante, este método tiene la ventaja de que siempre se puede recurrir a él en caso de problemas con la aplicación de otro, ya que es válido para cualquier aplicación. No hay que olvidar que es el método fundamental y en el que se apoyan el resto de métodos de posicionamiento diferencial.

- **Reocupación o pseudoestático.**

El método de posicionamiento es el estático, pero puede ocurrir que las condiciones de observación no sean idóneas, bien porque la bondad de la geometría es muy alta ($GDOP > 8$) o bien porque disponemos de menos de cuatro satélites por apantallamientos u obstrucciones.

Para poder dar solución al problema, volvemos a repetir la puesta al cabo de un cierto período (que puede ser visionado con los programas de planificación de observaciones a través de almanaques radiodifundidos), con el fin de obtener información de satélites distintos a los de la primera puesta. Para resolver el problema, el software mezcla los datos de las dos puestas para formar un único sistema de resolución como si todo se hubiera realizado una sola vez.

Por lo tanto, el estacionamiento es estático, y la reocupación una forma de solucionar problemas que surgen debido a la falta de información necesaria en posicionamientos estáticos. Las aplicaciones y fundamentos en precisiones y tratamientos de observables son los mismos que los indicados en el método estático, aunque la precisión si que se puede ver mermada en ocasiones.

- Cinemático.

Este método constituye una solución eficaz al inconveniente de los posicionamientos estáticos que requerían períodos de observación prolongados. Esta indicado para el tratamiento de observables de diferencia de fase.

El fundamento es establecer una estación fija de referencia, estática, y otra estación móvil que va a realizar las puestas en los puntos que se consideren necesarios. Para desarrollar este método es necesaria una **inicialización**, que supone calcular todos los parámetros de la línea base que une el móvil y la referencia en un instante. Una vez hecho esto, se conservan los valores de las ambigüedades, lo que hace que el número de incógnitas se reduzca a tres (X, Y, Z del móvil), lo que requiere menos épocas de información para resolver el sistema y por lo tanto menor período de puesta. A modo de ejemplo, si tras la inicialización disponemos de información de seis satélites comunes entre la referencia y el móvil, tendremos en una época cinco ecuaciones en doble diferencia y tres incógnitas, por lo que ya podríamos resolver la posición del móvil. Si tomamos tres épocas, la redundancia es mayor y el resultado más fiable.

Si hemos establecido que una época son cinco segundos, tendremos la solución con tan sólo quince segundos de puesta. El problema puede ser resuelto en tiempo real o en post-proceso.

Este método presenta la gran ventaja de que con él se obtienen resultados fiables y con buena precisión en poco tiempo, pero presenta el inconveniente de la posible pérdida de señal.

Si esto se produce en un instante, las ambigüedades establecidas en la primera inicialización ya no sirven, lo que requiere un nuevo proceso de inicialización en el lugar donde se produjo la pérdida de señal.

Existen varios **modos de inicialización**:

* *Estático rápido*. Se realiza una puesta estática de varias épocas hasta que se haya determinado la posición del móvil de forma satisfactoria. Es el modo más lento de inicialización, y es función del tipo de instrumental utilizado, información recibida y potencia del algoritmo de cálculo. Puede variar de uno a algunos minutos.

* *Estática en punto conocido*. El método es análogo al anterior, pero más rápido, ya que al conocer tres de las incógnitas del sistema (X, Y, Z del móvil) las que quedan por determinar son únicamente los incrementos de los valores de ambigüedad. Por lo tanto, necesitamos menos ecuaciones y en consecuencia menor tiempo de observación para resolver el sistema. Puede variar entre uno y dos minutos en función del tiempo en que se establezcan las épocas de grabación y la potencia del software de cálculo.

* *En movimiento (OTF, On-The-Fly)*. Esta técnica desarrolla un algoritmo que aplica las observaciones recibidas en movimiento y resuelve el sistema sin tener que realizar puestas estáticas. Es muy cómoda, ya que estamos inicializando mientras nos dirigimos al punto objeto de posicionamiento.

La inicialización en modo OTF fue creada para aplicar técnicas de resolución cinemática a elementos que no pueden estar parados para efectuar inicializaciones estáticas, como son barcos y aviones, y facilitar las aplicaciones que les conciernen, como levantamientos batimétricos y vuelos fotogramétricos. En el caso del avión, el objeto es conocer las coordenadas de la cámara en el momento de las tomas, y en el caso del barco tener la información planimétrica puntual que completa las tres dimensiones con la medida directa de la ecosonda. Es evidente que si se produce una pérdida de señal.

la inicialización se vuelve a realizar sin tener que detener los vehículos, cosa harto difícil en los dos casos mencionados.

Pero la inicialización OTF no solamente se aplica en estos campos. sino que actualmente los equipos de observación por satélite terrestres incorporan esta posibilidad para cualquier tipo de trabajo, por su seguridad, rapidez y comodidad. Si las condiciones son favorables, la inicialización se puede realizar en menos de un minuto.

Dentro del modo cinemático, se puede trabajar con el modo *continuo* (denominado cinemático propiamente dicho) o en modo *discontinuo* (stop & go).

- Stop & Go.

Para posicionar un punto con el receptor móvil (tras la inicialización satisfactoria) se realiza una parada en dicho punto de unas pocas épocas, después nos dirigimos al siguiente punto y actuamos de igual modo. El procedimiento se mantendrá hasta completar el trabajo o hasta sufrir una pérdida de señal que obligue a inicializar otra vez.

Este método es apropiado para el levantamiento de puntos cercanos entre sí. Es imprescindible mantener la verticalidad de la antena en todo momento. La precisión del método siempre es función del tipo de instrumentación utilizado. Puede llegar a ser de uno a cinco centímetros en el mejor de los casos. Las aplicaciones más comunes son:

- * Levantamientos taquimétricos en general.
- Determinación de superficies y parcelaciones.
- * Control y evolución de fenómenos y obras.
- * Densificación de información de una zona.
- * Obtención de perfiles transversales.

- Continuo.

También denominado cinemático propiamente dicho. En este caso, el receptor móvil no efectúa ninguna parada, normalmente porque no le es posible. Está indicado para el uso de estaciones móviles ubicadas en vehículos en movimiento, como aviones, trenes, camiones, barcos, turismos, etc. Para su aplicación, basta con indicar el tiempo transcurrido entre una grabación y otra (épocas de grabación) para posicionar las situaciones puntuales del receptor en movimiento continuo. Por ejemplo, si hemos establecido una época como cinco segundos, y queremos que el posicionamiento se produzca cada treinta segundos, deberán transcurrir seis épocas de observación para efectuar el posicionamiento. El intervalo de grabación (épocas) para el método cinemático es aconsejable que sea de cinco segundos o menos.

Este método presenta el mismo inconveniente que el anterior, que es la posible pérdida de señal. Si esto se produce, y se dispone del modo OTF, el vehículo no necesita detener su marcha. Las aplicaciones más comunes de este método son:

- * Determinación de la trayectoria de vehículos en movimiento.
- * Levantamientos batimétricos.
- * Navegación.
- * Determinación de itinerarios (carreteras, caminos, canales, rutas, líneas de enlace de redes, cauces fluviales, etc.).

DGPS. Aunque su traducción es "GPS diferencial", se utiliza esta terminología para trabajos diferenciales en los que solamente intervienen medidas de código (observables de tiempo). Ciertamente, que con las actuales técnicas de posicionamiento conjunto GPS/GLONASS este término no es correcto, pero se sigue utilizando.

Existen ocasiones en las que la precisión en los posicionamientos no requiere recurrir a técnicas de medición de diferencia de fase, lo que supone además un considerable ahorro en instrumental de observación.

El posicionamiento diferencial con medidas de código se realiza resolviendo sistemas en simples diferencias, donde las incógnitas son las tres coordenadas de los puntos y el estado del oscilador de los receptores en cada época.

Los resultados obtenidos con este método de posicionamiento son excelentes en muchos de los casos, siendo mejores en distancias mayores de 200 Km. Las precisiones pueden alcanzar en algunos casos el decímetro, pero los resultados son muy inestables, ya que la geometría de observación, la calidad de recepción de la señal (relación señal /ruido) y el funcionamiento del oscilador del receptor han de ser factores óptimos para obtener estos resultados. Para garantizarlos, se deben realizar puestas largas (15-30 min.) para que se dé la redundancia suficiente. Lo normal es asegurar los 30-50 cm.

La evolución de las técnicas de tratamiento de los códigos en la medida de distancias está siendo espectacular, y este método está llamado a ser la nueva alternativa a los trabajos topográficos y geodésicos por sus altos rendimientos, facilidad en el tratamiento de datos y menor coste económico.

No obstante, las medidas de código pueden ser "suavizadas" por las medidas de diferencia de fase (si en la recepción se obtuvieron éstas) para obtener rendimientos aún mejores. El proceso de los datos con código diferencial puede hacerse en tiempo real y en post-proceso.

Existe la posibilidad de trabajar en DGPS con un único receptor, al que se le debe sumar una unidad de control y un transmisor/receptor de radiofrecuencia que emite los datos de observación a una estación central de referencia, que envía datos de posicionamiento en formato RTCM o RTCA a la estación móvil, obteniendo la posición en tiempo real.

Las aplicaciones más comunes del DGPS son:

- * Navegación de precisión.
- * Levantamientos y apoyo para cartografías de escalas menores de 1/5000.
- * Confección y actualización de sistemas de información geográfica.
- * Todo trabajo en general que no requiera precisiones mayores de 0,3-0,5 m.

1.6.-TRABAJO EN TIEMPO REAL.

En primer lugar, debe quedar claro que el trabajo en tiempo real no es un método de posicionamiento por satélite, sino que es una forma de obtener los resultados una vez procesadas las observaciones.

El procesamiento de estas observaciones puede ser realizado con un software post-proceso, previa inserción de los datos de observación necesarios, ya sea en campo o en gabinete.

Ahora bien, este cálculo puede ser realizado de forma inmediata a la recepción de las observaciones y ser efectuado por la unidad de control, obteniendo las coordenadas en el instante, es decir, en tiempo real. Para ello, se incorporan los algoritmos de cálculo de los software post-proceso, o parte de ellos, a los controladores para este tipo de aplicaciones.

Esto, supone una gran ventaja, ya que todo el tiempo que se invierte en insertar, tratar, chequear y procesar los datos se suprime al obtener los resultados al instante. Pero también tiene una serie de inconvenientes, que lo serán mayores o menores en función del tipo de trabajo y las condiciones de la observación. Entre ellos destacan:

- * *La limitación de los radiomodem de emisión y transmisión de datos.* Chocamos con el problema de las licencias de frecuencias y potencias de señal permitidas. Un equipo que funcione con 0,5 w, que está permitido por las autoridades, está limitado a un radio de acción de unos pocos Km (7-8 Km con seguridad), lo que limita el 58

rendimiento del trabajo. Sin embargo, con potencias de señal mayores se puede llegar a trabajar en radios de hasta 50 km.

- * *Imposibilidad de chequear los ficheros de observación.*
- * *Limitación en las correcciones de tipo atmosférico.*
- * *Limitación en los procesos de transformación de coordenadas.*
- * *Pobre tratamiento e información estadística.*
- * *Escasa manipulación de los parámetros de cálculo*

Es evidente que los fabricantes no van a proporcionar herramientas que den resultados erróneos, ya que pasan severos controles de calidad, pero puede ocurrir que en ocasiones, debido a malas recepciones de señal o a planteamientos equivocados en las observaciones se cometan errores que no pueden ser detectados si no se revisan los ficheros de proceso con información detallada y completa.

Por todo esto, es conveniente y recomendable que los usuarios incorporen en sus gabinetes un software completo de procesamiento de datos por satélite, para su uso en trabajos donde la precisión es muy importante y además para comprobar y verificar que se repiten los resultados obtenidos previamente en tiempo real.

En el argot actual de la Topografía aplicada al posicionamiento por satélite, se denomina *equipo de trabajo con módulo RTK* (Real Time Kinematic) a aquel que incorpora un software completo en la unidad de control y un sistema de transmisión de información que permite la obtención de resultados en tiempo real. Los módulos RTK pueden procesar observables de código y de diferencia de fase, y son aplicables a cualquier trabajo donde el posicionamiento por satélite sea necesario.

Las fases del trabajo en tiempo real con módulo RTK son las siguientes:

- El equipo de trabajo mínimo son dos equipos de observación (sensor y antena), dos radiomodems (transmisor y receptor) y un controlador en la unidad móvil con un software de proceso de datos.
- En primer lugar, se estaciona el equipo de referencia (sensor, antena y radiomodem transmisor), que va a permanecer fijo durante todo el proceso. El radiomodem transmisor va a transmitir sus datos de observación por ondas de radio al receptor incorporado en el equipo móvil, que a su vez almacenará en la unidad de control.
- En segundo lugar, si el método escogido es el posicionamiento estático, el controlador calculará la posición del móvil en tiempo real. Si el método elegido es del tipo cinemático (stop & go o cinemático continuo), se debe proceder a la *inicialización*, necesaria para poder efectuar estos modos de posicionamiento. Tras efectuarse con éxito, se pueden determinar coordenadas de puntos en pocos segundos. En ocasiones la inicialización es muy rápida y con una fiabilidad muy alta, pero conviene comprobar las coordenadas obtenidas sobre un punto conocido para verificar que la inicialización a sido correcta.

Hasta aquí hemos descrito el funcionamiento del módulo RTK, que como se ha podido ver, está asociado a trabajos de cierta precisión, pero existen otras formas de trabajo en tiempo real. Es cierto que en posicionamientos absolutos, la solución instantánea por navegación la estamos obteniendo en tiempo real.

Otro sistema de trabajos diferenciales en los cuales se pueden obtener resultados en tiempo real es con métodos DGPS. En este caso, se trabajan con observables de código en modo diferencial, donde se pueden obtener precisiones por debajo del metro, muy indicadas para otras aplicaciones. Estos trabajos pueden ser solucionados si disponemos de un módulo RTK, pero también a través de correcciones RTCM o RTCA recibidas de una estación de referencia que calcula y determina nuestra posición en modo diferencial (al contrario que con RTK, que es el móvil el que incorpora el proceso de cálculo) y nos las envía a través de ondas de radio. De este modo, con un equipo de observación, un radiotransmisor/receptor y un contrato de uso, podemos posicionarnos en modo diferencial. Estas

emisiones suelen ser realizadas a través de satélites destinados para ello o por repetidores de superficie. Este método de trabajo es, hoy por hoy, uno de los más usados en navegación, apoyos para cartografías de pequeña escala, confección y actualización de GIS, control de volúmenes y superficies, deporte y ocio, etc.

Es evidente que la obtención de resultados en tiempo real es una gran ventaja en todos los trabajos de índole topo-geodésicos, así como en todos los campos donde esté presente el posicionamiento por satélite. Pero quizás, la aplicación donde mayor beneficio representa es en la *topografía y replanteo de obras de ingeniería*.

En la actualidad, los software de los controladores incorporan potentes programas para hallar datos de replanteo en cualquier sistema de referencia. Apoyados en la estación de referencia, podemos replantear cualquier punto en la superficie, ya que obtenemos información en tiempo real de la situación y dirección a seguir desde la referencia deseada (ya sea una base de replanteo, el punto anterior u otro que resulte de interés) para localizar y materializar el punto correspondiente.

Todos los aspectos reseñados dan fuerza a recurrir a estas técnicas cuando el objeto buscado es la **producción rápida y eficaz con buenos resultados**, que es, hoy por hoy, esencial en el desarrollo tecnológico y económico de cualquier ente.

CONSIDERACIONES FINALES.

El Sistema de Posicionamiento por Satélite, ya sea con GPS, GLONASS o GPS/GLONASS, es una herramienta imprescindible en la sociedad de nuestros días, y que los técnicos en todas las materias afectadas deben saber tratar, manipular y ejecutar correctamente, ya que supone, como hemos dicho, un adelanto en la calidad y rendimiento de los trabajos respecto a los métodos clásicos, que nunca se deben abandonar, pero que la evolución de otras técnicas obliga a ir dejando a un lado y recurrir a técnicas, no sólo más modernas, sino más fructíferas y que en un futuro cercano estarán en el idioma y rutina cotidiano de los profesionales de estos campos.

Se citan a continuación las **ventajas** que ofrece el posicionamiento por satélite en nuestro trabajo:

- No es necesaria la intervisibilidad entre estaciones, ya que el sistema de medida es indirecto entre ellas y directo a los satélites. Esto reduce el número de estacionamientos al poder salvar los obstáculos y reduce los errores accidentales y sistemáticos al no tener que realizar punterías ni tantos estacionamientos con intervisibilidad entre los puntos. En definitiva, se reduce el tiempo de observación y los errores que se producen en ella. Debemos añadir además que la observación nocturna es totalmente operativa.
- Al trabajar con ondas de radio, estas no sufren efectos significativos a causa de la niebla, lluvia, fríos y calores extremos, y otros tipos de incidencias.
- El rango de distancias que se pueden alcanzar es mucho mayor, al no ser medidas directas. El mejor de los distanciómetros no supera los 4-5 Km de distancia, además del error que introduce. Con el posicionamiento por satélite podemos medir bases desde unos pocos metros hasta centenas y miles de Km.
- Dado que no se dispone de sistemas ópticos, su fragilidad es menor y su mantenimiento y calibración no es requerido con la frecuencia que lo requieren los instrumentos ópticos. Los costes de mantenimiento por ello son menores.
- El servicio de las señales que ofrecen los sectores espaciales y de control es totalmente gratuito. lo que supone sólo desembolsos en instrumentación de observación, cálculo y gastos para I+D.
- La obtención de los resultados es rápida, máxime si sumamos la obtención de los mismos en tiempo real (RTK). Además, las observaciones y los resultados son interpretables y tienen comprobación.
- La variedad de métodos de posicionamiento hace que sean sistemas apropiados y aptos para cualquier tipo de trabajo.

Por otro lado, los *inconvenientes* más relevantes son :

- No puede ser utilizado en obras subterráneas y a cielo cerrado.
- Tiene dificultades de uso en zonas urbanas, cerradas, con altos edificios y zonas arboladas y boscosas, debido a las continuas pérdidas de la señal de los satélites. Este problema, no obstante, se está solucionando, y de forma satisfactoria, con el uso combinado de las constelaciones GPS y GLONASS para mantener siempre cinco o más satélites sobre el horizonte.
- El desconocimiento del sistema. El sistema de posicionamiento por satélite es una gran herramienta, y de fácil uso, pero ello no lleva consigo eximirse de su conocimiento y del tratamiento de sus observables correctamente, ya que de lo contrario, se pueden obtener resultados poco satisfactorios en precisión y rendimiento.

Hoy por hoy, podemos enumerar los siguientes campos en los que el Sistema de Posicionamiento por Satélite está presente :

*** GEODESIA.**

- . Determinación de las Redes fundamentales para la Cartografía, Topografía, Ingeniería y control de un país, región o localidad.
- . Obtención de la ondulación del Geoide de forma regional o global.

*** GEOFÍSICA.**

- . Estudio de deformaciones de la superficie terrestre.
- . Determinación de la estructura de las distintas capas de la Atmósfera y comportamiento de las mismas.

*** TOPOGRAFÍA Y FOTOGRAMETRÍA.**

- . Densificación de Redes Geodésicas.
- . Levantamientos taquimétricos.
- . Apoyo fotogramétrico.
- . Determinación de las coordenadas del centro óptico de la cámara en el momento de la toma.

*** INGENIERÍA.**

- . Redes fundamentales para cartografías donde se apoyen los proyectos de arquitectura o infraestructuras de todo tipo.
- . Establecimiento de Redes básicas para el replanteo de una obra de ingeniería.
- . Replanteo de puntos de un proyecto de ingeniería.
- . Control de calidad en obra.
- . Control de deformaciones de estructuras.

*** HIDROGRAFÍA.**

- . Levantamientos batimétricos.
- . Estudios y análisis de la evolución de las cuencas hidrográficas.
- . Determinación de itinerarios fluviales y marítimos.

* SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

. Obtención de los datos geográficos para la formación y actualización de bases de datos georeferenciadas y la cartografía de un Sistema de Información Geográfica.

* NAVEGACIÓN.

. Situación instantánea de vehículos sobre un sistema de referencia.
. Actualización de cartas de navegación
. Determinación de itinerarios idóneos.
Deducción de la evolución e itinerario de un vehículo en movimiento.
. Inventarios de redes viales, fluviales, aéreas, navales y espaciales.

* DEFENSA.

. Localización de objetivos de cualquier tipo.
. Evaluación de zonas y recorridos por las mismas.

* OCIO Y DEPORTE.

. Localización y situación en expediciones, safaris, rallyes, viajes, competiciones, excursiones en zonas de cartografía desconocida, etc.

A continuación, vamos a describir las etapas y parámetros fundamentales que se deben seguir en todo posicionamiento por satélite donde se requiera precisión y rendimiento en el trabajo. Las etapas son fundamentalmente tres : *planificación, observación y cálculo.*

1. PLANIFICACIÓN.

Es conveniente, para evitar pérdidas de tiempo en repeticiones de puestas y variaciones de planes, realizar una buena planificación de las observaciones y determinar cuál es la hora del día donde hay un mayor número de satélites, así como cuándo la geometría de la observación es más idónea, además de determinar el estado de salud de los satélites.

Para llevar a cabo esta etapa, los software para el post-proceso incorporan módulos de planificación, los cuales, a través de los almanaques radiodifundidos de las constelaciones, que podemos ir almacenando periódicamente o los almanaques ya existentes, y de las posiciones de los lugares de observación, podemos conocer el número de satélites, salud, bondad de la geometría de la observación, periodo óptimo de observación, etc. Podemos, además marcar la obstrucciones que puedan existir en el lugar de la observación. Esto se puede realizar para cualquier lugar del planeta durante las 24 horas del día.

2. OBSERVACIÓN.

Una vez decidido el lugar, el día y la hora de la observación, debemos elegir el método de posicionamiento adecuado en función del tipo de trabajo a realizar y de sus precisiones.

Una vez en el campo, debemos introducir en la unidad de control del receptor los parámetros de la observación, entre los que destacan como más importantes :

- Método de posicionamiento para que el software del receptor almacene correctamente los datos.
- Máscara de elevación. Se recomienda no usar máscaras inferiores a 10° sexagesimales. Debemos tener en cuenta que en la etapa de observación podemos usar máscaras amplias, y que luego en la etapa de cálculo las podemos reducir, es decir aumentar el ángulo de elevación, si lo consideramos oportuno.

- Establecimiento del intervalo de grabación en segundos (épocas). Cada época va a ser un tiempo de grabación de datos. Se pueden elegir y establecer en múltiplos de 60, es decir, épocas de 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30, etc. segundos. Hay que tener en cuenta que a menor valor de época, mayor cantidad de datos almacenados en la tarjeta, y por lo tanto, se deberá elegir un menor tiempo de puesta de observación para no agotar su capacidad. A modo de ejemplo, se puede decir que 15 minutos de observación grabando épocas cada 5 segundos equivale a 45 minutos grabando épocas cada 15 segundos, ya que la cantidad de información grabada y la capacidad agotada de almacenamiento de la tarjeta es prácticamente la misma, en función del número de satélites y de la cantidad de observables que se recojan en la observación. Existen instrumentos que son capaces de grabar la información en modo compacto, es decir, utilizan toda información disponible entre una época de grabación y la siguiente, en lugar de grabar sólo la información del instante en el que se materializa la época.

3. CÁLCULO.

En primer lugar se debe proceder a insertar los datos de las observaciones en el software. En el caso de trabajar en tiempo real, esto lo realiza la propia unidad de control. Así mismo, se deben comprobar todos los datos y atributos referentes a cada punto, tales como nombres, alturas de antena, etc.

A continuación, se procede a calcular un punto singular o single point de todos los puntos que hayan constituido una estación en el trabajo.

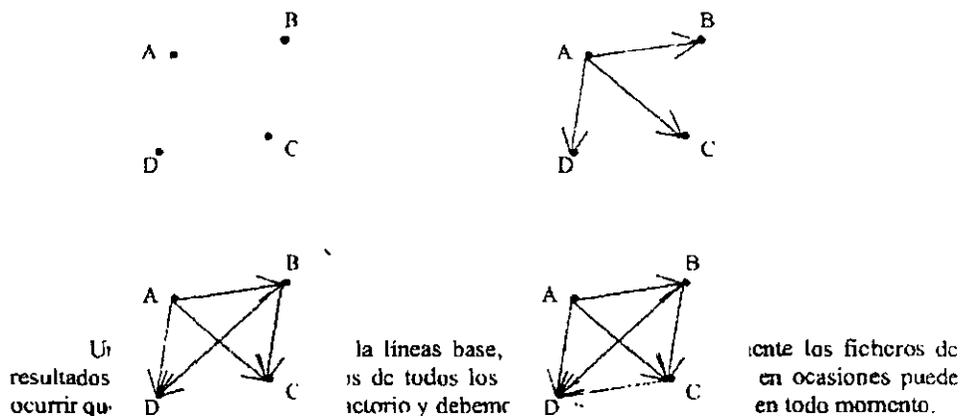
El siguiente paso es determinar los parámetros correctos y apropiados para el cálculo de las líneas base, es decir :

- . Máscara de elevación.
- . Corrección ionosférica y troposférica.
- . Tipo de efemérides usadas.
- . Combinación de observables a utilizar.
- . Parámetros estadísticos de errores máximos tolerables (ratio, pérdidas de ciclo, señal/ruido, satélite de referencia, etc. ...)

Seguidamente, se procede al cálculo de las líneas base de una manera ordenada, es decir, siguiendo algún criterio, como puede ser aquel de calcular todas las líneas base que lleguen a un mismo punto antes de tomar éste como referencia para calcular otras líneas base, o algún otro criterio que se estime adecuado.

Es importante que una línea base nunca debe ser calculada en las dos direcciones con los mismos datos de observación, ya supondría incluir líneas linealmente dependientes en el sistema.

Un criterio de cálculo puede ser el representado las siguientes figuras :



Una vez calculadas todas las líneas base, se deben revisar totalmente los ficheros de resultados, así como los resultados de todos los test estadísticos, ya que en ocasiones puede ocurrir que el cálculo no sea satisfactorio y debemos ser conscientes de ello en todo momento.

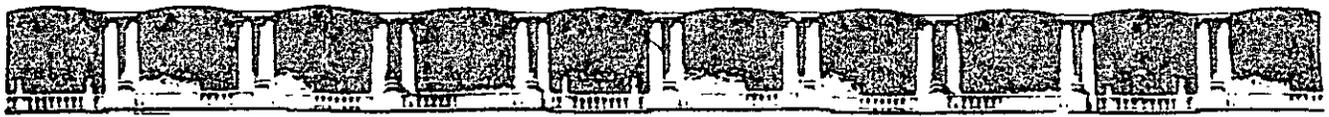
Tras el cálculo satisfactorio de las líneas base, el siguiente paso es realizar el ajuste de la figura formada por todas las líneas base calculadas. Los paquetes de software incorporan un módulo de ajuste que utilizan la técnica de mínimos cuadrados y donde el usuario debe seleccionar una serie de parámetros para realizar el ajuste como son :

- . El número de iteraciones
- . Parámetros estadísticos del test de detección de errores groseros.
- . Pesos de las observaciones, etc.

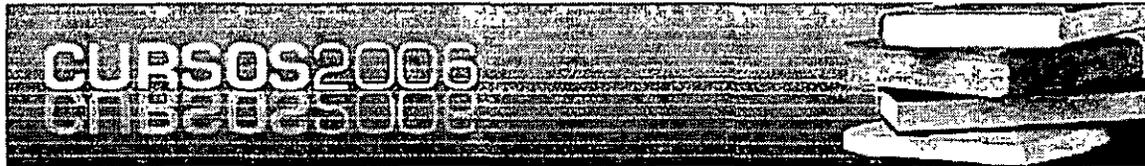
Finalmente, una vez obtenidas las coordenadas ajustadas de todos los puntos, puede ser necesario realizar una transformación de coordenadas para pasar los puntos al sistema de coordenadas locales. Para ello, los paquetes de software disponen de un módulo de transformación de coordenadas, en donde, a partir de una serie de puntos con coordenadas en los dos sistemas se calculan los parámetros de transformación de un sistema a otro por mínimos cuadrados, parámetros que se aplican al resto de los puntos para transformarlos al sistema local.

Para realizar la transformación debemos elegir el elipsoide al que queremos referir las coordenadas, la proyección y la zona que determinan ese sistema local.

Una vez que ya tenemos las coordenadas de todos los puntos en el sistema de coordenadas locales, queda finalizada la etapa del cálculo.



FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA



CURSOS ABIERTOS

DIPLOMADO DE TOPOGRAFÍA
MÓDULO VI

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO
GLOBAL (GPS)
CA 65

TEMA
DIAPOSITIVAS

EXPOSITOR: ING. GERMAN GARCÍA GONZÁLEZ
DEL 06 AL 10 DE NOVIEMBRE DE 2006
PALACIO DE MINERÍA

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA

SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS)

PERIODO: Es el tiempo que tarda el satélite en dar una vuelta completa a la tierra.

TRANSIT : Es el primer sistema de navegación por satélite. Fue desarrollado por la marina de los EE.UU. y puede considerarse como el antecesor del NAVSTAR-GPS.

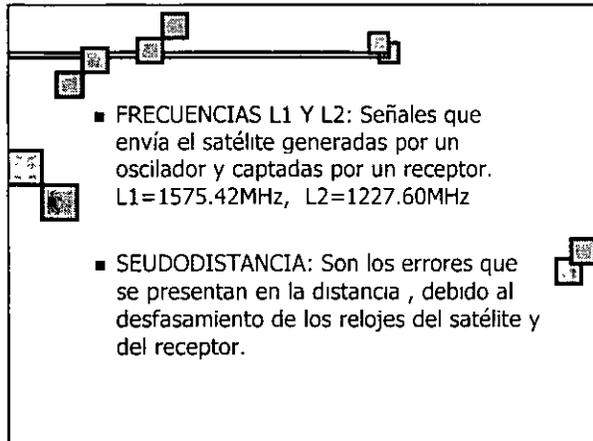
■ **EFEECTO DOPPLER:** Es la magnitud en el cambio de la frecuencia.

■ **LATITUD GEOGRÁFICA:** Es el ángulo que se mide a partir de Ecuador, hacia el Norte o hacia el Sur y varía de 0° a 90° .

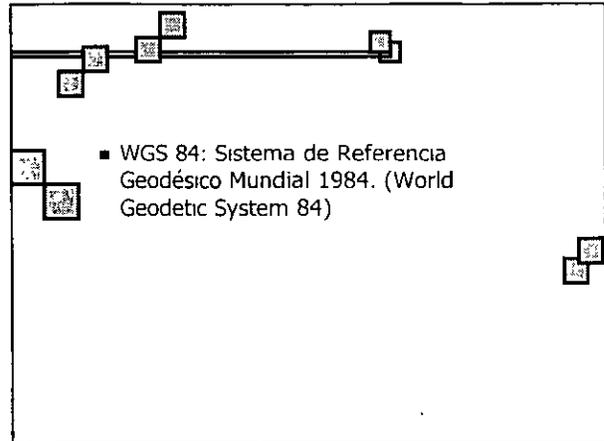
■ **LONGITUD GEOGRÁFICA:** Es el ángulo que se mide a partir del meridiano origen, hacia el Este o hacia el Oeste y varía de 0° a 180° .

■ **ELIPSOIDE:** Es la superficie geométrica que se obtiene al girar una elipse alrededor del eje polar de la Tierra.

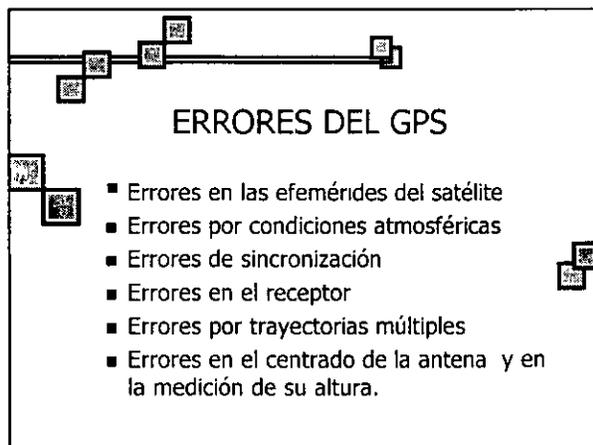
■ **EFEMÉRIDES:** Es un archivo de datos mediante el cual es posible calcular las órbitas y la posición de cada uno de los satélites.



- FRECUENCIAS L1 Y L2: Señales que envía el satélite generadas por un oscilador y captadas por un receptor. L1=1575.42MHz, L2=1227.60MHz
- SEUDODISTANCIA: Son los errores que se presentan en la distancia, debido al desfase de los relojes del satélite y del receptor.

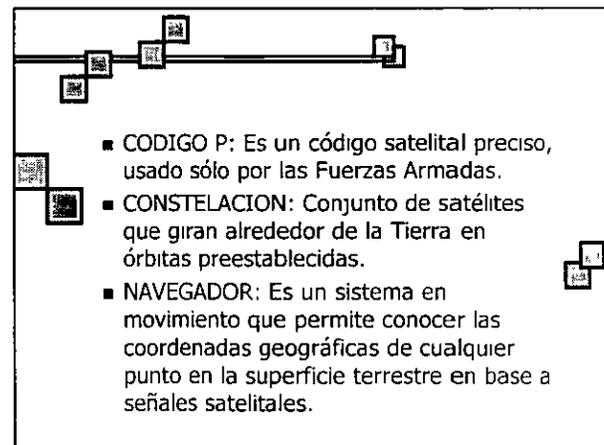


- WGS 84: Sistema de Referencia Geodésico Mundial 1984. (World Geodetic System 84)



ERRORES DEL GPS

- Errores en las efemérides del satélite
- Errores por condiciones atmosféricas
- Errores de sincronización
- Errores en el receptor
- Errores por trayectorias múltiples
- Errores en el centrado de la antena y en la medición de su altura.



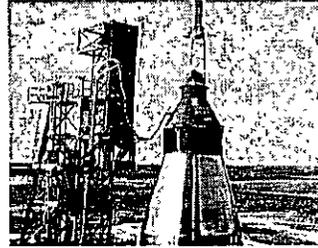
- CODIGO P: Es un código satelital preciso, usado sólo por las Fuerzas Armadas.
- CONSTELACION: Conjunto de satélites que giran alrededor de la Tierra en órbitas preestablecidas.
- NAVEGADOR: Es un sistema en movimiento que permite conocer las coordenadas geográficas de cualquier punto en la superficie terrestre en base a señales satelitales.

NOCIONES HISTORICAS

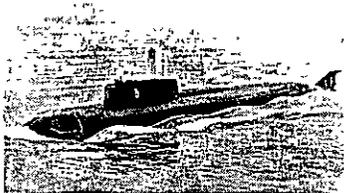
- El NAVSTAR (GPS) surge de investigaciones realizadas por ingenieros militares. Objetivo: guiado de misiles y posicionamiento de tropas.



- Los sistemas de posicionamiento global por satélite se originaron en el programa espacial norteamericano.



- Específicamente de investigaciones de la marina estadounidense, relacionadas con la navegación de los submarinos Polaris.



- La primera generación de sistemas de posicionamiento por satélite operó con el efecto Doppler, y utilizó los satélites llamados TRANSIT.

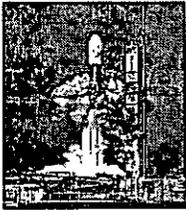
- Al principio los instrumentos eran voluminosos y caros, las sesiones de observación eran largas y poco precisas.

■ La utilización del programa comenzó en 1958, y el primer uso no militar de los satélites con fines de posicionamiento tuvo lugar en 1967.

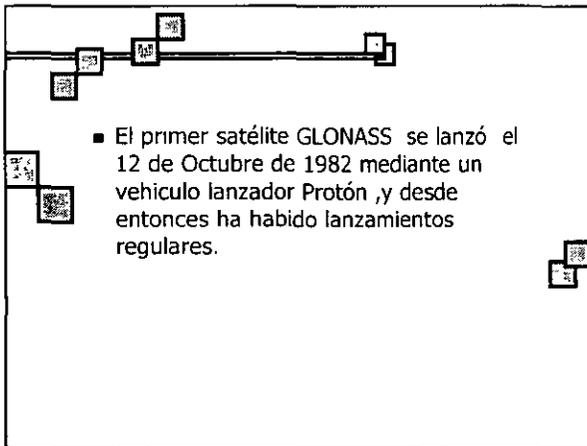
■ En los años 70 y 80 existe un sustancial desarrollo de los sistemas GPS.

■ El GPS es un área de rápida expansión y nuevas aplicaciones y capacidades ocurrirán en el futuro.

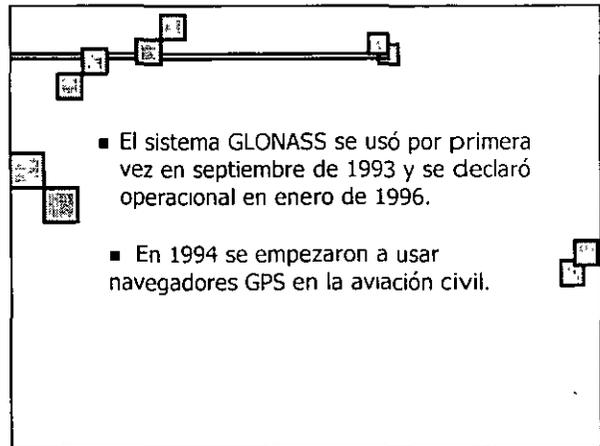
■ El primer satélite NAVSTAR para el sistema GPS se lanzó en 1978, y satélites adicionales se agregaron en años sucesivos.



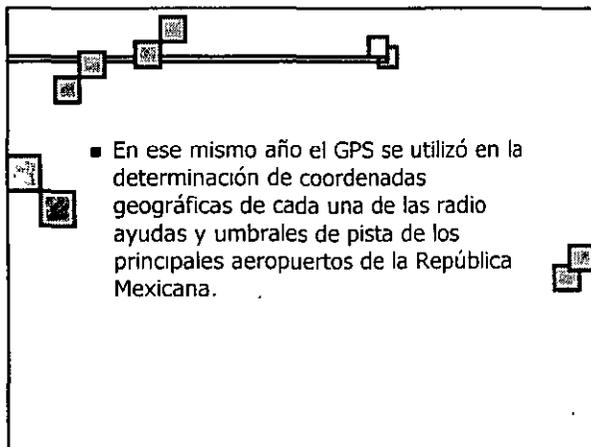
■ La explosión durante el despegue del transbordador CHALLENGER en enero de 1986 demoró en forma considerable la implantación del sistema hasta diciembre de 1993.



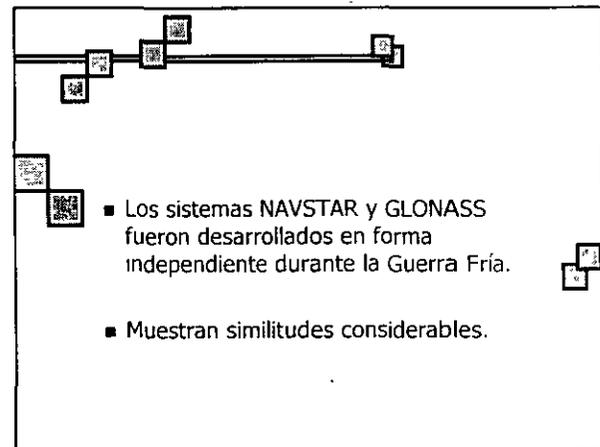
- El primer satélite GLONASS se lanzó el 12 de Octubre de 1982 mediante un vehiculo lanzador Protón ,y desde entonces ha habido lanzamientos regulares.



- El sistema GLONASS se usó por primera vez en septiembre de 1993 y se declaró operacional en enero de 1996.
- En 1994 se empezaron a usar navegadores GPS en la aviación civil.



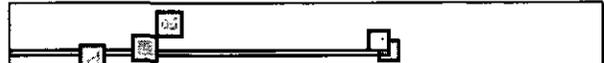
- En ese mismo año el GPS se utilizó en la determinación de coordenadas geográficas de cada una de las radio ayudas y umbrales de pista de los principales aeropuertos de la República Mexicana.



- Los sistemas NAVSTAR y GLONASS fueron desarrollados en forma independiente durante la Guerra Fría.
- Muestran similitudes considerables.



- Existen receptores que son capaces de trabajar con ambos sistemas, lo que mejora la disponibilidad de satélites y la precisión.



- El sistema Z-Surveyor de Ashtech es la primera unidad comercial en usar datos de satélites del GPS y del GLONASS

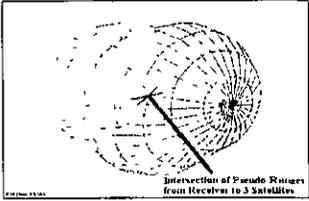


SISTEMA GPS

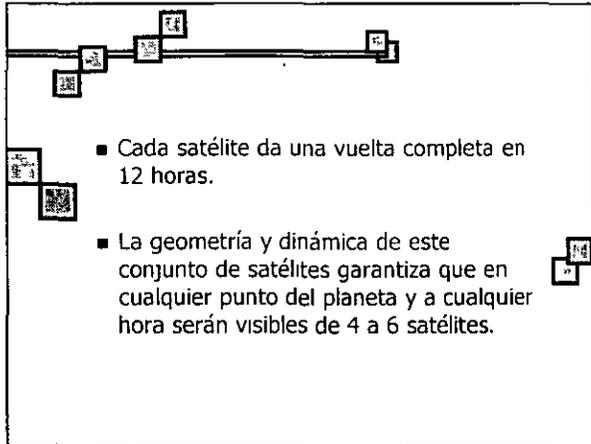
- El sistema NAVSTAR (GPS), cuenta con 28 satélites en órbita alrededor de la tierra.



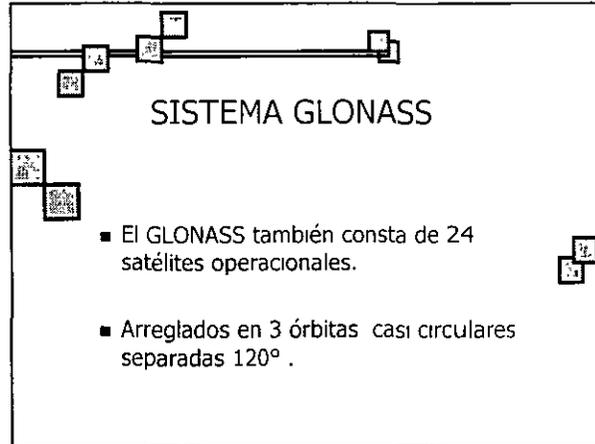

- 24 satélites se encuentran a una altura de 20 200 Km y están colocados en 6 planos orbitales inclinados a 55° respecto al Ecuador.



Intersection of Pseudo Range from Receiver to 3 Satellites

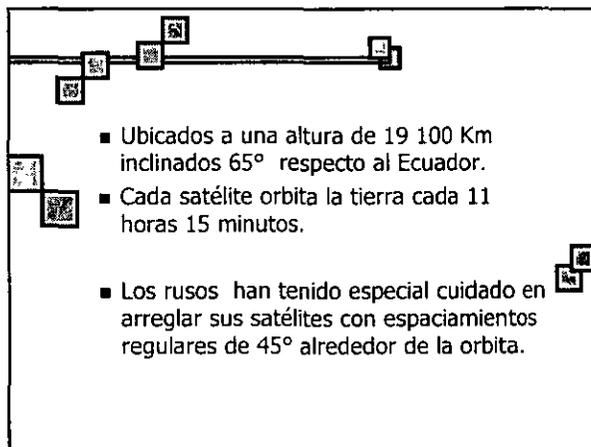


- Cada satélite da una vuelta completa en 12 horas.
- La geometría y dinámica de este conjunto de satélites garantiza que en cualquier punto del planeta y a cualquier hora serán visibles de 4 a 6 satélites.

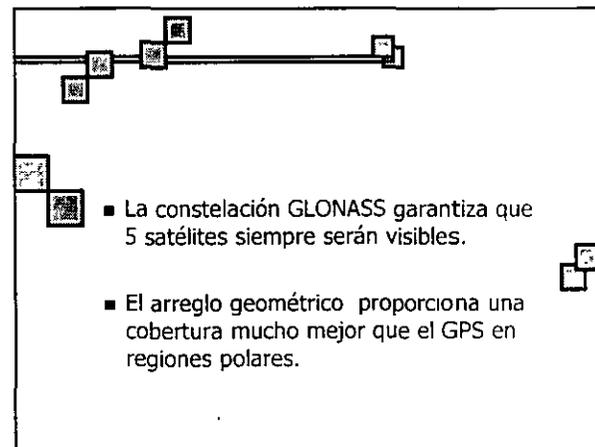


SISTEMA GLONASS

- El GLONASS también consta de 24 satélites operacionales.
- Arreglados en 3 órbitas casi circulares separadas 120° .



- Ubicados a una altura de 19 100 Km inclinados 65° respecto al Ecuador.
- Cada satélite orbita la tierra cada 11 horas 15 minutos.
- Los rusos han tenido especial cuidado en arreglar sus satélites con espaciamentos regulares de 45° alrededor de la orbita.



- La constelación GLONASS garantiza que 5 satélites siempre serán visibles.
- El arreglo geométrico proporciona una cobertura mucho mejor que el GPS en regiones polares.



- Cuando el GLONASS se usa en conjunción con el GPS se tiene una constelación total de 48 satélites.
- La diferencia principal entre NAVSTAR y GLONASS es que el segundo es más preciso
- Esto implica que normalmente son visibles 9 satélites con la posibilidad de ver 12.



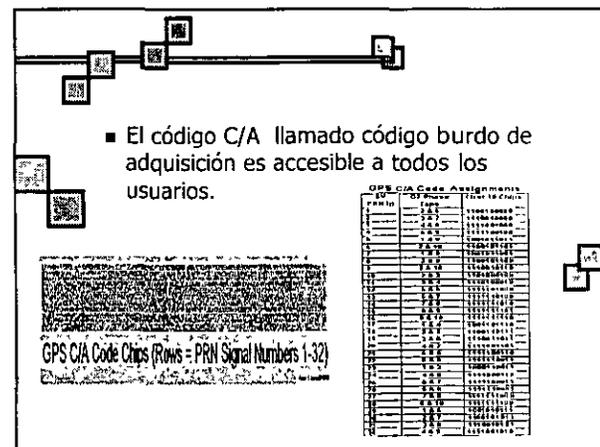
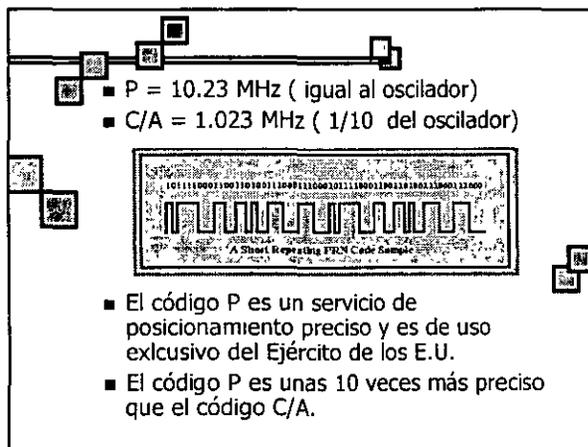
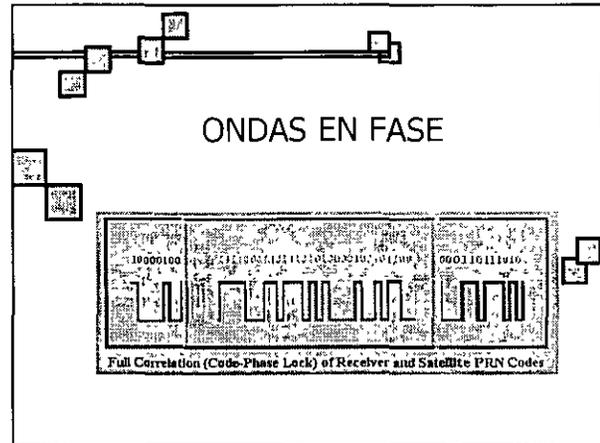
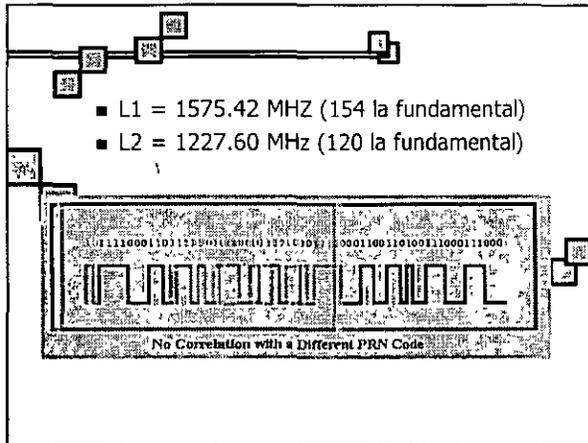
- Los satélites GPS se impulsan solarmente con baterías de níquel-cadmio.

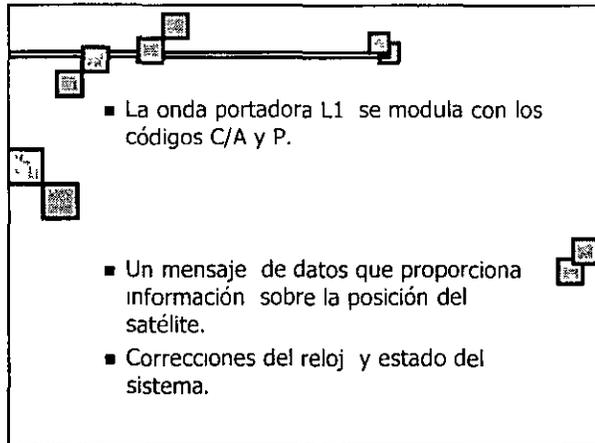


- Estas baterías impulsan 4 relojes atómicos, 2 de rubidio y 2 de cesio, cruciales para la exactitud del sistema.



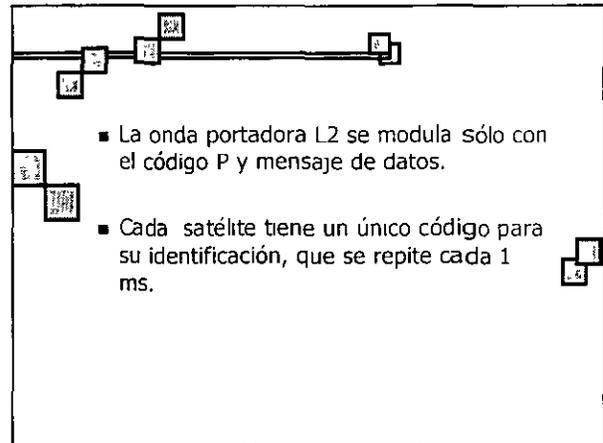
- Un oscilador a bordo trabaja a una frecuencia fundamental de 10.23 MHz.
- Transmite de manera continua dos señales portadoras.
- Emite con una potencia de 700W





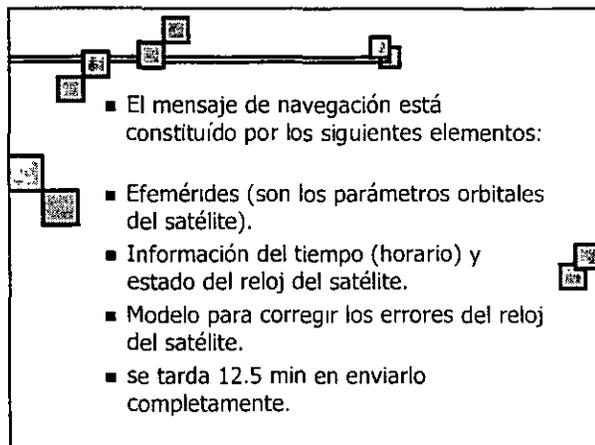
The diagram shows a horizontal line representing the L1 signal structure. Above the line, there are several small square boxes containing symbols, representing different components of the signal. Below the line, there are three bullet points describing the signal's modulation and data content.

- La onda portadora L1 se modula con los códigos C/A y P.
- Un mensaje de datos que proporciona información sobre la posición del satélite.
- Correcciones del reloj y estado del sistema.



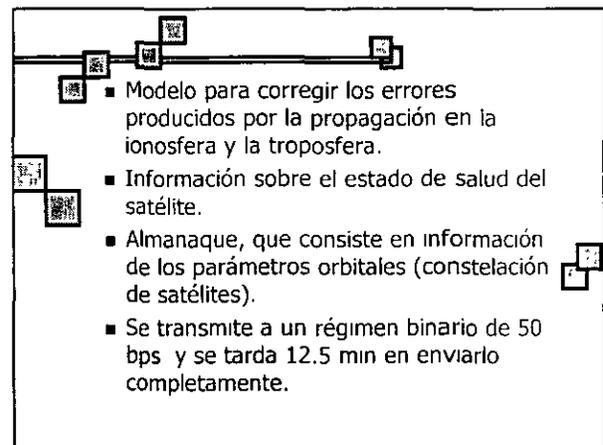
The diagram shows a horizontal line representing the L2 signal structure. Above the line, there are several small square boxes containing symbols. Below the line, there are two bullet points describing the modulation and identification code.

- La onda portadora L2 se modula sólo con el código P y mensaje de datos.
- Cada satélite tiene un único código para su identificación, que se repite cada 1 ms.



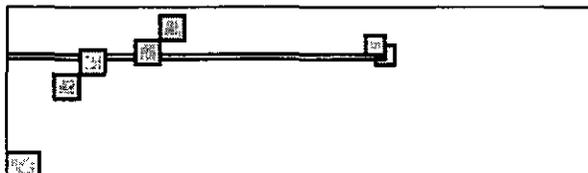
The diagram shows a horizontal line representing the navigation message structure. Above the line, there are several small square boxes containing symbols. Below the line, there are five bullet points detailing the components of the navigation message.

- El mensaje de navegación está constituido por los siguientes elementos:
- Efemérides (son los parámetros orbitales del satélite).
- Información del tiempo (horario) y estado del reloj del satélite.
- Modelo para corregir los errores del reloj del satélite.
- se tarda 12.5 min en enviarlo completamente.

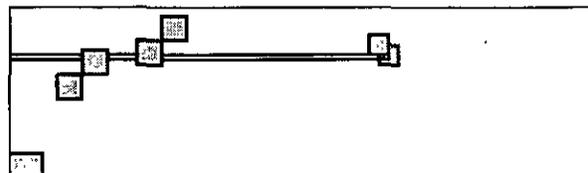


The diagram shows a horizontal line representing the correction and almanac data structure. Above the line, there are several small square boxes containing symbols. Below the line, there are four bullet points describing the data content and transmission rate.

- Modelo para corregir los errores producidos por la propagación en la ionosfera y la troposfera.
- Información sobre el estado de salud del satélite.
- Almanaque, que consiste en información de los parámetros orbitales (constelación de satélites).
- Se transmite a un régimen binario de 50 bps y se tarda 12.5 min en enviarlo completamente.



- Los satélites GLONASS también se controlan por relojes atómicos de cesio.
- Igual que los GPS, tienen 2 ondas portadoras L1 y L2, que ofrecen 2 niveles de servicio.

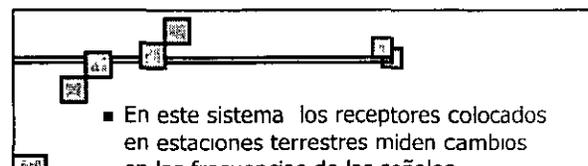


- El canal de precisión estándar (CSA channel of standard accuracy).
- El canal de alta precisión (CHA channel of high accuracy).

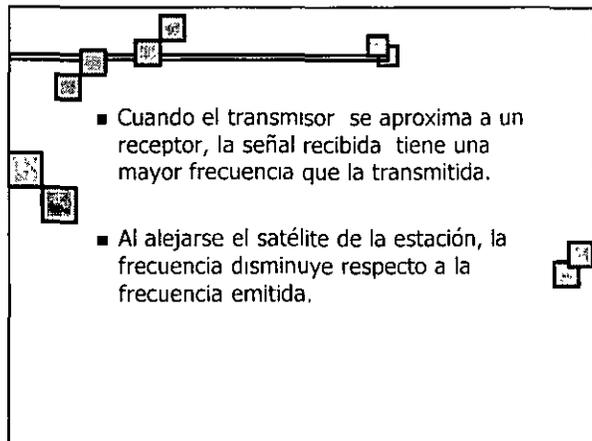


EFECTO DOPPLER

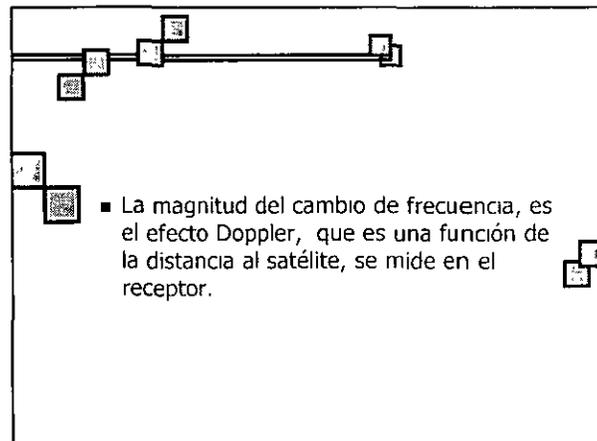
- La primera generación de GPS operó con el efecto Doppler.
- Utilizó los satélites de navegación de la marina llamados TRANSIT.



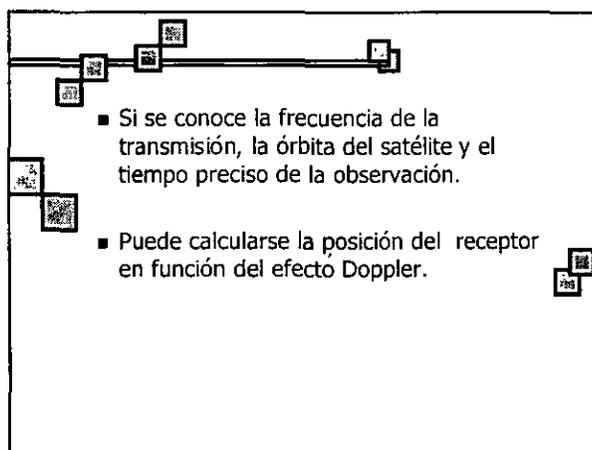
- En este sistema los receptores colocados en estaciones terrestres miden cambios en las frecuencias de las señales satelitales.
- Al pasar el satélite sobre la estación de observación, transmite en forma continua y con mucha precisión una frecuencia de radio controlada.



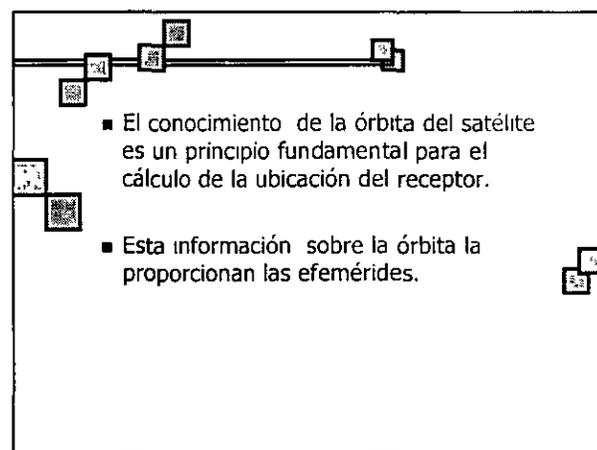
- Cuando el transmisor se aproxima a un receptor, la señal recibida tiene una mayor frecuencia que la transmitida.
- Al alejarse el satélite de la estación, la frecuencia disminuye respecto a la frecuencia emitida.



- La magnitud del cambio de frecuencia, es el efecto Doppler, que es una función de la distancia al satélite, se mide en el receptor.



- Si se conoce la frecuencia de la transmisión, la órbita del satélite y el tiempo preciso de la observación.
- Puede calcularse la posición del receptor en función del efecto Doppler.



- El conocimiento de la órbita del satélite es un principio fundamental para el cálculo de la ubicación del receptor.
- Esta información sobre la órbita la proporcionan las efemérides.



SEUDODISTANCIA

- El posicionamiento por satélite es un método unidireccional de medición de distancias.
- Depende de la medición precisa del tiempo y de la sincronización precisa de los relojes en el satélite y en el receptor.



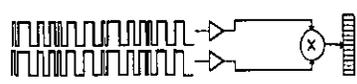
- Debido a que esto último es casi imposible, el procedimiento se conoce como pseudodistancia.



- El satélite transmite de manera continua su código el cual se repite cada 1 ms.
- El receptor puede conectarse a él y establecer el patrón.
- El receptor genera un código réplica en su propio marco de tiempo.
- Se compara entonces con el patrón que se recibe del satélite.



- Se demora en forma progresiva hasta que los 2 patrones coincidan en fase.
- Este desplazamiento de fase indica el tiempo de viaje de la señal.



- Puede convertirse en una distancia multiplicándola por la velocidad de la luz.

WGS 84

- Las coordenadas que resultan de las mediciones GPS están en el sistema DATUM del satélite, WGS 84 (World Geodetic system).
- Es un sistema de coordenadas cartesianas (X,Y,Z) cuyo origen es el centro de la tierra.

SEGMENTO ESPACIAL

- NAVSTAR GPS está constituido por una constelación de 24 satélites localizados a 20,200 kilómetros de la superficie de la tierra.

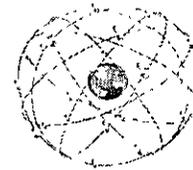
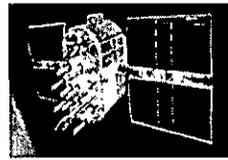


Tabla I.

Características	NAVSTAR GPS	GLONASS
Compañía Impulsora	Departamento de Defensa de EUA	Federación Rusa
Número de satélites	24 en 6 planos orbitales	24 en 3 planos orbitales
Tipo de órbita	H=20 200 Km Inclina.=55° Periodo= 12 hr	H=19 100 Km Inclina.=65° Periodo=11h 15m
Vida útil aprox.	7.5 años	7.5 años

SEGMENTO DE CONTROL

- El control del GPS se realiza desde cinco estaciones de monitoreo
- Una estación maestra (Master Control Station), en Colorado Springs E.U (Base Fuerza Aérea), y otras cuatro alrededor de la tierra.

- En la isla Ascensión (Atlántico Sur)
- Diego García (Océano Índico)
- Kwajalein (Pacífico Occidental)
- Hawaii (Pacífico Central)

- Existe una estación maestra de control (situada en Colorado Spring Estados Unidos), la cual se encarga de calcular las efemérides para cada uno de los satélites.

The diagram shows a satellite in orbit labeled 'GPS'. A ground station labeled 'CONTROL STATION' is connected to the satellite with a dashed line labeled 'DATA LINK'. Another ground station labeled 'RECEIVER' is also connected to the satellite with a dashed line labeled 'DATA LINK'. Below the ground stations, the text 'GPS CONTROL' is written.

Ubicación geográfica de las estaciones de rastreo del Sistema de Posicionamiento por satélite.

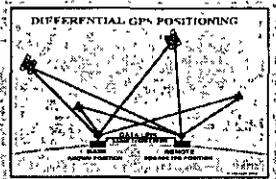
The map shows the locations of GPS ground stations across the globe. Key locations labeled include: Colorado Springs, Ascension Island, Diego Garcia, Hawaii, Kwajalein, and others. The text 'Global Positioning System (GPS) Master Control and Monitor Station Network' is visible at the bottom of the map.

SEGMENTO DE USUARIO

- Consiste de receptores GPS que proporcionan instantáneamente la posición, altitud, velocidad y tiempo preciso al usuario desde cualquier parte del mundo.

Sistema GPS diferencial

- Esta forma de GPS esta siendo probada y llevándose a cabo la certificación para sistemas de aproximación y aterrizaje de precisión.



The diagram illustrates the Differential GPS (DGPS) system. It shows a ground station (labeled 'GROUND STATION') and a user receiver (labeled 'USER RECEIVER') both receiving signals from a constellation of GPS satellites. The ground station compares its known position with the satellite signals to calculate correction data, which is then transmitted to the user receiver to improve its accuracy.

- Actualizaciones de la posición de 0.5 a 1 segundos.
- Precisión en torno a 15m.

APLICACIONES DEL GPS EN OTRAS ÁREAS

- MARITIMO



The image shows a large cargo ship at sea, illustrating the application of GPS in maritime navigation.

- TERRESTRE



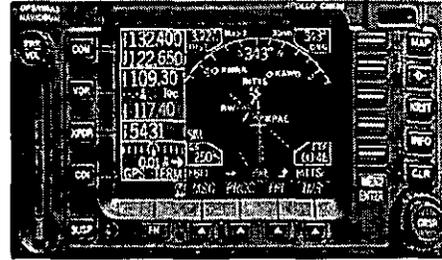
The image shows a handheld GPS device, illustrating its use in terrestrial applications.

MODELOS DE EQUIPOS GPS

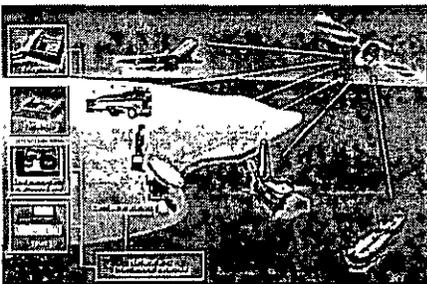
- FIJO



AEROTRANSPORTABLE



- TERRESTRE



PROCEDIMIENTOS DE NAVEGACIÓN GPS

- ESTÁTICO

Se caracteriza por la determinación de las coordenadas de un punto estacionario.

- ESTÁTICO RÁPIDO
- Método en el que se lleva acabo una ocupación por corto tiempo con equipo de 2 bandas y activación del código de precisión.

- ESTÁTICO RÁPIDO
- Método en el que se lleva acabo una ocupación por corto tiempo con equipo de 2 bandas y activación del código de precisión.

- PSEUDOCINEMÁTICO
- Método en que se requiere la reocupación de cada punto de interés.

- CINEMÁTICO EN TIEMPO REAL
- Requiere de un receptor que opere simultáneamente con 5 satelites.
- Un receptor ocupa una estación de referencia y radiodifunde obsevaciones GPS a la unidad movil (radio-modem).
- En el receptor movil, las mediciones GPS de ambos receptores se procesan en tiempo real por la computadora interna de la unidad para producir una determinación inmediata de su posición.

SESIÓN DE PRÁCTICAS

■ EJEMPLO NUMÉRICO

The image shows a rectangular frame with a black border. Inside the frame, the text "SESIÓN DE PRÁCTICAS" is centered in the upper half. Below it, the text "■ EJEMPLO NUMÉRICO" is centered. There are several small, square icons scattered around the text: one at the top left, one at the top center, one at the top right, one on the left side, one on the right side, and one at the bottom right. A horizontal line is drawn near the top of the frame, with some icons positioned above it.