

M^a Paz Holanda Blas

Juan Carlos Bermejo Ortega



DESCRIPCIÓN Y APLICACIONES

MADRID 1998

PREFACIO

Desde que en 1957 el lanzamiento del Sputnik-1 supuso el comienzo de la era de los satélites artificiales y su posterior uso en aplicaciones para el interés de la comunidad mundial, la tecnología ha avanzado en este aspecto de manera espectacular, y uno de los campos en los cuales se ha manifestado especialmente dicho avance, es en las aplicaciones que conciernen a las ciencias de la Tierra, y dentro de ellas, de manera notable en el estudio de su forma y dimensiones (*Geodesia*), así como, en el estudio de los fenómenos físicos que afectan y condicionan dicha forma y dimensiones (*Geofísica*).

Dentro de los grupos de Sistemas de Geodesia Espacial, destacan la Constelación NAVSTAR (Navegación por Satélite en Tiempo y Distancia) y la Constelación GLONASS (Sistema Global de Navegación por Satélite). Ambas constelaciones fueron creadas por los Departamentos de Defensa de los Estados Unidos y Rusia, respectivamente, y sus principal cometido era poder posicionar un objeto en la superficie de la Tierra a través de las señales emitidas en forma de ondas de radio por los satélites de dichas constelaciones, que dicho objeto procesaba en la superficie, determinando así su posición con una precisión en función del tipo de información recibida, tiempo de recepción y condiciones de la emisión.

Este posicionamiento se produce sobre un sistema de referencia inercial cartesiano, que en el caso de usar la constelación americana NAVSTAR corresponde al sistema WGS-84, y en el caso de usar la constelación rusa GLONASS corresponde al sistema PZ-90.

A principios de los años 80s, se empezaron a utilizar estos métodos para aplicaciones de índole civil, tales como actividades de navegación aérea, marítima y terrestre, lo que supuso un importante avance en la organización y el estado de los transportes y comunicaciones mundiales.

La investigación y el tratamiento de estos sistemas de posicionamiento por satélite, ha llevado en la actualidad a que sean utilizados para fines científicos, destacando el estudio de la Atmósfera terrestre, de sus capas, fenómenos, y muy especialmente para el estudio de la Ionosfera, desconocida en muchos aspectos y con una gran influencia sobre los distintos fenómenos que ocurren en nuestro planeta.

Pero quizá, las aplicaciones en las cuales estos sistemas han calado más hondo son la Geodesia y la Topografía, a partir del descubrimiento de que dichos sistemas de posicionamiento podían aportar las precisiones requeridas para el desarrollo de estas ciencias y su aplicación en el desarrollo de infraestructuras, cartografía, dimensionamientos, sistemas de información geográfica, estudios de movimientos y deformaciones, y para fines más expeditos como la navegación y el ocio.

Es por ello que constituyen, hoy por hoy, unos de los sistemas de medida más usados y con mayores expectativas de futuro. Este hecho los obliga a estar en continua evolución para que la comunidad mundial obtenga resultados cada vez más satisfactorios. Pero es esta comunidad, y en concreto los profesionales de las materias afectadas, los que deben disponer de la documentación y experiencias necesarias para llegar a dominar estos métodos de trabajo y obtener de ellos el máximo rendimiento.

El objetivo de esta publicación no es otro que orientar de forma básica a los usuarios de estos sistemas e invitar a los futuros usuarios a calar en su funcionamiento y posibilidades de desarrollo, abriendo el campo de la medida por satélite como una poderosa herramienta de trabajo, y que hoy por hoy, se está convirtiendo en el método más usado por su precisión y rapidez en los campos antes reseñados, siendo este el motivo por el cual no debe pasar desapercibido por ninguno de nuestros profesionales.

INDICE DE CONTENIDOS

PREFACIO	1
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA GPS	4
1. INTRODUCCIÓN.	4
2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.	4
2.1. EL SECTOR ESPACIAL.	4
2.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SATÉLITES	4
2.1.2. SEÑAL DE LOS SATÉLITES	5
2.1.3. EL SISTEMA DE REFERENCIA. DATUM WGS-84.	6
2.2. EL SECTOR DE CONTROL.	7
2.3. EL SECTOR DE USUARIOS.	7
CAPÍTULO II. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA GLONASS.	17
1. INTRODUCCIÓN.	17
2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.	17
2.1. EL SECTOR DE CONTROL.	18
2.2. EL SECTOR ESPACIAL.	20
2.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES.	21
2.2.2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN.	23
2.2.3. SISTEMA DE REFERENCIA. DATUM PZ-90.	23
2.3. EL SECTOR DE USUARIOS.	24
CAPÍTULO III. USO COMBINADO DE LOS SISTEMAS GPS Y GLONASS.	25
1. INTRODUCCIÓN.	25
2. ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE LA UTILIZACIÓN DE AMBOS SISTEMAS Y SU USO COMBINADO.	25
3. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TRANSFORMACIÓN ENTRE PZ-90 Y WGS-84.	27
CAPÍTULO IV. LAS OBSERVABLES.	29
1. INTRODUCCIÓN.	29
2. MEDIDAS DE CÓDIGO.	29
3. MEDIDAS DE FASE.	30
4. COMBINACIÓN DE OBSERVABLES.	31
CAPÍTULO V. CALIDAD Y BONDAD DE LAS OBSERVACIONES.	34
1. INTRODUCCIÓN.	34
2. ERRORES RELATIVOS AL SATÉLITE.	35
2.1. ERROR DEL RELOJ DEL SATÉLITE.	35
2.2. ERRORES EN LOS PARÁMETROS ORBITALES.	35

3. ERRORES RELATIVOS A LA PROPAGACIÓN DE LA SEÑAL.	36
3.1. REFRACCIÓN IONOSFÉRICA.	36
3.2. REFRACCIÓN TROPOSFÉRICA.	38
3.3. DISPONIBILIDAD SELECTIVA.	39
3.4. PÉRDIDAS DE CICLOS.	39
3.5. EFECTO MULTIPATH.	39
4. ERRORES RELATIVOS AL RECEPTOR.	40
4.1. ERROR DEL RELOJ.	40
4.2. ERROR EN EL ESTACIONAMIENTO DE LA ANTENA.	40
4.3. ERRORES EN LA MANIPULACIÓN DE LOS EQUIPOS.	40
4.4. VARIACIÓN DEL CENTRO RADIOELÉCTRICO DE LA ANTENA.	41
5. DILUCIÓN DE LA PRECISIÓN.	41
CAPÍTULO VI. PROCESAMIENTO DE DATOS.	42
1. INTRODUCCIÓN. MODELO DE AJUSTE POR MMCC.	42
2. CÁLCULO DE POSICIONAMIENTOS ABSOLUTOS.	43
3. CÁLCULO DE POSICIONAMIENTOS DIFERENCIALES.	44
3.1. CÁLCULO DEL POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL POR CÓDIGO.	44
3.2. CÁLCULO DEL POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL POR FASE.	46
CAPÍTULO VII. MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO.	52
1. POSICIONAMIENTO ABSOLUTO.	52
2. POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL. (Estático, Reocupación, Cinemático Contínuo, Stop & Go, DGPS)	53
CAPÍTULO VIII. TRABAJO EN TIEMPO REAL.	58
CAPÍTULO IX. CONSIDERACIONES FINALES.	60
1. PLANIFICACIÓN.	62
2. OBSERVACIÓN.	62
3. CÁLCULO.	63
BIBLIOGRAFÍA.	65

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA GPS.

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*.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

2.1. 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.

2.1.1. 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, a fecha Enero-98, 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^{-13} s, mientras que los de rubidio es de 10^{-12} s. 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.

2.1.2. 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>	ν_0	10,23
<i>Portadora L1</i>	$154 \cdot \nu_0$	1.575,42
<i>Portadora L2</i>	$120 \cdot \nu_0$	1.227,60
<i>Código P</i>	ν_0	10,23
<i>Código C/A</i>	$\nu_0/10$	1,023
<i>Código W</i>	$\nu_0/20$	0,5115
<i>Mensaje de Navegación</i>	$\nu_0/204.600$	$50 \cdot 10^{-6}$

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 $2,3547 \cdot 10^{14}$ 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.

2.1.3. 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 aplanamiento ($1 / \alpha$) : 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.

2.2. 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.

2.3. 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 descifrar 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 el usuarios.

- **Z-TrackingTM.** Es otra técnica para descifrar 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.
- * Etc.

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

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.

A continuación se va a describir los distintos tipos de ficheros RINEX-2 para que el usuario pueda interpretar, tratar y modelar sus observaciones:

1.- Características del fichero de observación:

ETIQUETA DE CABECERA	DESCRIPCIÓN
RINEX VERSION / TYPE	- Versión de RINEX. - Tipo de fichero (“O” observ.) - Sistema de satélite: <ul style="list-style-type: none">* G: GPS.* R: GLONASS.* T: NNSS Transit.* M: Mixto.
PGM / RUN BY / DATE	- Programa de creación del fichero. - Agencia de creación del fichero. - Día de creación del fichero.
COMMENT	- Comentarios.
MARKER NAME	- Nombre del punto de observación.
MARKER NUMBER	- Número del punto de observación.
OBSERVER / AGENCY	- Nombre del observador y agencia.
REC # / TYPE / VERS	- Número de receptor, tipo y software.
ANT # / TYPE	- Número y tipo de antena.

APPROX POSITION XYZ	- Posición absoluta aproximada del punto en la última época.
ANTENNA: DELTA H/E/N	- Altura de antena y excentricidades relativas al este y al norte (m).
WAVELENGTH FACT L1/2	- Factores de λ para L1 y L2: * 1: Ciclo completo. * 2: Medio ciclo (cuadratura). * 0 en L2: Sólo una frecuencia. - Número de satélites con estos factores. - Lista de PRNs satélites.
# / TYPES OF OBSERV	- Número de observables grabados. - Tipos de observables grabados. * L1,L2: Medidas de fase L1 o L2. * C1: Pseudodist. con C/A en L1. * P1,P2: Idem con P en L1 o L2. * D1,D2: Doppler en L1 o L2. * T1,T2: Transit Integrated Doppler en 150 o 400 MHz. - Las unidades de las medidas son: * Fase: ciclos enteros. * Pseudodistancia: metros. * Doppler: Hz. * Transit: ciclos.
INTERVAL	- Intervalo de observación (épocas) en s.
TIME OF FIRST OBS	-Tiempo de la primera época de grabación (año, mes, día, hora, minuto y segundo). - Sistema de tiempo: * GPS: tiempo GPS. * GLO: tiempo UTC.
TIME OF LAST OBS	- Tiempo de la última época de grabación. La estructura es análoga a la anterior.
LEAP SECONDS	- Salto de segundos desde el 6-1-1980. Es recomendable su uso con datos mixtos.
END OF HEADER	- Final de cabecera.
OBS RECORD	- Epoca (año, mes, mes, día, min, seg). - Señal 0 (OK) ó 1 (falta de sincronismo entre la época anterior y la actual). - Número de satélites en la época actual. - Lista de PRNs en la época actual. - Valores de las observables. - Desfase del reloj del receptor.

Ejemplo de fichero de observación bifrecuencia para datos **GPS**:

```

2          OBSERVATION DATA          RINEX VERSION / TYPE
OBSTORNX          Version 2.1          08-OCT-97 13:39 PGM / RUN BY / DATE
                                                OBSERVER / AGENCY
BIFRE           MARKER NAME
BIFRE           MARKER NUMBER
-30541          SR399                 3.7      REC # / TYPE / VERS
149231          internal              ANT # / TYPE
  4855544.6069 -308073.2051  4111359.4373 APPROX POSITION XYZ
    0.0000      0.0000      0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
      1         1                                     WAVELENGTH FACT L1/2
      4      P1  L1   P2   L2                       # / TYPES OF OBSERV
1997      10   8     9     4   60.000000          TIME OF FIRST OBS
                                                END OF HEADER
97 10  8  9  4  55.0000000  0  7G14G16G15G29G 7G18G25          0.000000789
20334437.585  106858192.87049  20334432.094  83266097.29548
21069475.052  110720842.32949  21069470.067  86275958.60948
21114179.659  110955756.93548  21114174.583  86459014.94248
21615000.501  113587593.78448  21614995.008  88509788.36048
21818293.814  114655901.16948  21818288.971  89342245.03147
23855069.991  125359245.22047  23855066.453  97682506.77646
24828116.724  130472667.93945          0.000  0.00040
97 10  8  9  5  0.0000000  0  7G14G16G15G29G 7G18G25          0.000000774
20334920.310  106860729.54049  20334914.789  83268073.91348
21068014.636  110713167.72749  21068009.637  86269978.39448
21115965.620  110965142.22548  21115960.552  86466328.12448
21616369.479  113594787.93848  21616363.995  88515394.19748
21816559.604  114646787.64448  21816554.738  89335143.57247
23851498.353  125340476.07447  23851494.780  97667881.49746
24827247.528  130468100.22145          0.000  0.00040

```

Ejemplo de fichero de observación monofrecuencia para datos **GPS**:

```

2          OBSERVATION DATA          RINEX VERSION / TYPE
OBSTORNX          Version 2.1          08-OCT-97 13:40 PGM / RUN BY / DATE
                                                OBSERVER / AGENCY
MONOFRE         MARKER NAME
MONOFRE         MARKER NUMBER
095141          SR261                 3.52      REC # / TYPE / VERS
096446          external without GP ANT # / TYPE
  4855541.2873 -308058.4193  4111402.0074 APPROX POSITION XYZ
    0.0000      0.0000      0.0000 ANTENNA: DELTA H/E/N
      1         0                                     WAVELENGTH FACT L1/2
      2      C1  L1                                     # / TYPES OF OBSERV
1997      10   8     9     5   5.000000          TIME OF FIRST OBS
                                                END OF HEADER
97 10  8  9  5  5.0000000  0  6G14G 7G15G16G18G29          -0.000000657
20335021.239  106861263.86749
21816663.151  114647339.66448
21116064.242  110965689.54748
21068117.944  110713706.05148
23851605.473  125341102.74247
21616468.709  113595311.77348
97 10  8  9  5  10.0000000  0  6G14G 7G15G16G18G29          -0.000000678
20335456.952  106863553.55549
21814882.551  114637982.55148
21117802.817  110974826.82048

```

Ejemplo de fichero de observación monofrecuencia para datos combinados **GPS / GLONASS:**

```

2          OBSERVATION DATA          RINEX VERSION / TYPE
RINEX      Version 2.1                08-OCT-97 13:40  PGM / RUN BY / DATE
MONOFREMIXTO                                     OBSERVER / AGENCY
MONOFREMIXTO                                     MARKER NAME
5141          S61                          3.52      MARKER NUMBER
446          external without GP          REC # / TYPE / VERS
          4855541.2873 -308058.4193 4111402.0074  ANT # / TYPE
          0.0000          0.0000          0.0000  APPROX POSITION XYZ
          1          0          ANTENNA: DELTA H/E/N
          2  C1  L1      WAVELENGTH FACT L1/2
          11      # / TYPES OF OBSERV
1997  10  8  9  5  5.000000  LEAP SECONDS
                                     TIME OF FIRST OBS
                                     END OF HEADER
97 10  8  9  5  5.000000  0  9G14G 7G15G16G18G29R12R 3R10
20335021.239  106861263.86749
21816663.151  114647339.66448
21116064.242  110965689.54748
21068117.944  110713706.05148
23851605.473  125341102.74247
21616468.709  113595311.77348
20335456.952  106863553.55549
21814882.551  114637982.55148
21117802.817  110974826.82048

```

2.- Características del fichero del mensaje de navegación:

ETIQUETA DE CABECERA	DESCRIPCION
RINEX VERSION / TYPE	- Formato y tipo de fichero("N" Naveg.)
PGM / RUN BY / DATE	- Nombre, agencia y día de creación.
COMMENT	- Comentario.
ION ALPHA	- Parámetros ionosféricos A0-A3 del almanaque.
ION BETA	- Parámetros ionosféricos B0-B3 del almanaque.
DELTA-UTC: A0,A1,T,W	- Parámetros del almanaque para calcular el tiempo en el sistema UTC: * A0,A1: Términos del polinomio. * T: Tiempo de referencia para datos UTC. * W: Número de la semana UTC de referencia.
LEAP SECONDS	- Error en el tiempo por el salto de segundo
END OF HEADER	- Final de cabecera.

OBS. RECORD	Grupo 1	<ul style="list-style-type: none"> -Número PRN, año,mes,día,hora,min.,sec. - Error del reloj del satélite (s). - Deriva del reloj del satélite (s/s). - Período de deriva (s^{-1}).
	Grupo 2	<ul style="list-style-type: none"> - Edad de las efemérides (s). - Corrección Crs (m). - Diferencia media de movimiento (rad / s). - Anomalía media (rad).
	Grupo 3	<ul style="list-style-type: none"> - Corrección Cuc (rad). - Excentricidad. - Corrección Cus (rad). - Raíz cuadrada del semieje mayor ($m^{1/2}$).
	Grupo 4	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo de las efemérides (segundos de semana GPS). - Corrección Cic (rad). - Nodo de longitud (OMEGA) (rad). - Corrección Cis (rad).
	Grupo 5	<ul style="list-style-type: none"> - Inclinação (rad). - Corrección Crc (m). - Argumento del perigeo (omega) (rad). - Velocidad del nodo de longitud (OMEGA DOT) (rad / s) .
	Grupo 6	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de inclinación (IDOT) (rad / s) - Códigos en el canal L2. - Semana GPS. - Aviso de datos de código P en L2.
	Grupo 7	<ul style="list-style-type: none"> - Precisión del satélite (m). - Salud del satélite (entrada MSB). - Retardo ionosférico (TGD) (s). - Edad de los datos del reloj (s).
	Grupo 8	<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo de transmisión del mensaje (s de semana GPS). - De repuesto / sin información. - De repuesto / sin información. - De repuesto / sin información.

Ejemplo de fichero de navegación de datos GPS:

```

      2          NAVIGATION DATA          RINEX VERSION / TYPE
EPHTORNX      Version 2.1                08-OCT-97 13:39    PGM / RUN BY / DATE
                                                    END OF HEADER
14 97 10  8  9 59 60.0 0.228183344007D-04 0.341060513165D-12 0.000000000000D+00
    0.590000000000D+02-0.460312500000D+02 0.431589386451D-08 0.123485942917D+01
   -0.239536166191D-05 0.151082023513D-02 0.914372503757D-05 0.515376567459D+04
    0.295200000000D+06 0.279396772385D-07 0.136000332260D+01 0.130385160446D-07
    0.969519034508D+00 0.206718750000D+03 0.294364805951D+01-0.789104337429D-08
    0.140720143871D-09 0.100000000000D+01 0.926000000000D+03 0.000000000000D+00
    0.700000000000D+01 0.000000000000D+00-0.232830643654D-08 0.590000000000D+02
    0.000000000000D+00
16 97 10  8  9 59 44.0 0.310195609927D-04 0.159161572810D-11 0.000000000000D+00
    0.820000000000D+02-0.466250000000D+02 0.445554260153D-08 0.109773916963D+01
   -0.235624611378D-05 0.221713271458D-02 0.879168510437D-05 0.515362895393D+04
    0.295184000000D+06 0.465661287308D-07 0.136628704583D+01 0.186264514923D-07
    0.965927376055D+00 0.210343750000D+03 0.664243366688D-01-0.796533150549D-08
    0.717887069235D-10 0.100000000000D+01 0.926000000000D+03 0.000000000000D+00
    0.700000000000D+01 0.000000000000D+00-0.232830643654D-08 0.820000000000D+02
    0.000000000000D+00

```

3.- Características del fichero de datos meteorológicos:

ETIQUETA DE CABECERA	DESCRIPCION
RINEX VERSION / TYPE	- Formato y tipo de fichero ("M" met.).
PGM / RUN BY / DATE	- Programa, agencia y día de creación.
COMMENT	- Comentario.
MARKER NAME	- Nombre de la estación.
MARKER NUMBER	- Número de la estación.
# / TYPES OF OBS	- Número y tipos de observación grabados. * PR: presión (mbar). * TD: temperatura seca (°celsius). * HR: humedad relativa (%).
SENSOR MOD/TYPE	- Sensor de observación meteorológico: * Modelo. * Tipo. * Precisión. * Observable (PR, TD o HR).
SENSOR POS XYZH	- Posición aproximada del sensor. * XYZ geocent. (ITRF o WGS84). * H elipsoidal. * Tipo de observable (PR,TD,HR).
END OF HEADER	- Final de cabecera.

OBS. RECORD

- Epoca en tiempo GPS
(año,mes,dia,hora,minuto y segundo).
- Datos PR, TD y HR.

Ejemplo de fichero de datos meteorológicos:

```
      2          METEOROLOGICAL DATA          RINEX VERSION
XXRINEXM V9.9AIUB          2-APR-97 00:10    PGM / RUN BY / DATE
EJEMPLO DE FICHERO METEOROLOGICO          COMMENT
A 1000          MARKER NAME
      3          PR          TD          HR          # / TYPES OF OBS
METEORO          234-655          0.2          PR          SENSOR MOD / TYPE
METEORO          234-655          0.2          TD          SENSOR MOD / TYPE
METEORO          234-655          3.0          HR          SENSOR MOD / TYPE
          3333.3          3333.3          3333.3          345.1223          SENSOR POS / XYZH
          END OF HEADER
97      4          1          0          0          15          988.0 15.2 88.0
97      4          1          0          0          30          988.2 15.4 88.0
97      4          1          0          0          45          988.2 15.2 88.3
```

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.

CAPÍTULO II. INTRODUCCIÓN AL SISTEMA GLONASS.

El Sistema de Posicionamiento Global NAVSTAR no es el único Sistema de Posicionamiento existente. El Sistema Ruso GLONASS es también operativo, y a pesar de que actualmente la constelación no está completada, proporciona a los usuarios civiles unas precisiones en el posicionamiento absoluto típicamente mejores que las que proporciona el Sistema GPS, debido a la aplicación de la degradación intencionada de la información denominada Disponibilidad Selectiva (SA).

1. INTRODUCCION.

A principios de los 70s, quizá como una respuesta al desarrollo del Sistema GPS, el antiguo Ministro de Defensa Soviético desarrolló el Global' naya Navigatsionnaya Sputnikova Sistema o Sistema Global de Navegación por Satélite (GLONASS). El Sistema GLONASS es similar al GPS en muchos aspectos, aunque como se verá también hay muchas diferencias.

En el año 1993, oficialmente el Gobierno Ruso colocó el programa GLONASS en manos de Fuerzas Espaciales Militares Rusas (RSF). Este organismo es el responsable del desarrollo de satélites GLONASS, de su mantenimiento y puesta en órbita, y certificación a los usuarios. Este organismo opera en colaboración con el CSIC (Coordinational Scientific Information Center), el cual publica la información sobre GLONASS.

Durante los 80s, la información acerca de GLONASS era escasa. No se sabía mucho de las órbitas de los satélites ni de las señales usadas para transmisión de las señales de navegación. Pero actualmente, gracias a estudios e investigaciones sobre este sistema, se dispone ya de gran cantidad de información acerca GLONASS. Los Rusos, a través del RSF y del CSIC publican el documento ICD (Interface Control Document). Este documento es similar en estructura al Segmento Espacial del sistema NAVSTAR GPS, donde se describe el sistema, sus componentes, estructura de la señal y el mensaje de navegación para uso civil.

La constelación ha experimentado un gran progreso desde los años 1994 y 1995. Los planes de GLONASS son ofrecer dos niveles de servicio:

- El **Channel of Standard Accuracy (CSA)**, similar al Standar Positioning Service (SPS) del Sistema GPS, disponible para uso civil.
- El **Channel of High Accuracy (CHA)**, similar al Precise Positioning Service (PPS) del Sistema GPS, disponible solo para usuarios autorizados.

La Organización Internacional de Aviación Civil (ICAO) aceptó formalmente en Julio 1996, el uso de GLONASS/CSA para uso en aviación civil, como ya se hizo en 1994 con el GPS/SPS.

2. DESCRIPCIÓN Y CONSTITUCIÓN DEL SISTEMA.

El Sistema GLONASS, al igual que el Sistema GPS, está formado por tres sectores fundamentales: el *Sector de Control*, el *Sector Espacial* y el *Sector Usuario*.

2.1. SECTOR DE CONTROL.

El Sector de Control está formado por un Sistema Central de Control (SCC) en la región de Moscú (Golitsyno-2) y una red de estaciones de seguimiento y control (Command Tracking Stations, CTS), emplazadas por todo el área alrededor de Rusia. El Sector de Control GLONASS, al igual que el de GPS debe seguir y vigilar el estado de sus satélites, determinar las efemérides y errores de los relojes de los satélites, es decir, la diferencia entre el tiempo GLONASS y la escala de tiempo UTC(SU). Además también deben actualizar los datos de navegación de los satélites. Estas actualizaciones se realizan dos veces al día.

Las estaciones de control (CTSs) realizan el seguimiento de los satélites y almacenan los datos de distancias y telemetría a partir de las señales de los satélites. La información obtenida en las CTSs es procesada en el Sistema Central de Control (SCC) para determinar los estados de las órbitas y relojes de los satélites, y para actualizar el mensaje de navegación de cada satélite. Esta información es enviada a cada satélite por medio de las CTSs. Las CTSs calibran periódicamente los datos de distancias a los satélites mediante láser. Para ello, los satélites GLONASS van provistos de unos reflectores especiales.

La sincronización de todos estos procesos en el Sistema GLONASS es muy importante. Para conseguir esta sincronización, se dispone de un reloj atómico de hidrógeno de alta precisión, el cual determina la escala de tiempo GLONASS. Los satélites GLONASS llevan a bordo un reloj de cesio y se sincronizan respecto a la State Etalon UTC(CIS) en Mendeleev, a través de la escala de tiempo del sistema GLONASS.

A todas estas estaciones de control debemos añadir otras estaciones de seguimiento que se utilizan para obtener los parámetros de transformación del Sistema GLONASS PZ-90 al Sistema GPS WGS-84, además de la determinación de las órbitas y observación y análisis de las anomalías de los satélites. Estos parámetros de transformación se aplican cuando se trabaja con el sistema combinado GPS/GLONASS. Estas estaciones están repartidas por todo el mundo y utilizan técnicas láser, radar y ópticas. Estos parámetros son calculados por mínimos cuadrados utilizando 9 días de datos de seguimiento.

La calidad de las posiciones estimadas obtenidas a partir de GLONASS es comparable a la que se obtiene con GPS cuando la Disponibilidad Selectiva está desactivada. El valor del rms (URE) en la determinación de las órbitas para GLONASS es de aproximadamente 10 m.

El Gobierno de la Federación Rusa ha declarado que GLONASS proporcionará a los usuarios civiles una precisión en toda la Tierra para el posicionamiento absoluto en tiempo real basado en medidas de código de unos 60 m en horizontal (99.7%) y de unos 75 m en vertical (99.7%). Los rusos han anunciado que no tienen previsto introducir ninguna medida intencionada de degradación de la precisión del sistema.

Las estaciones de control de las Fuerzas Espaciales Rusas (RSF) publican unos boletines, llamados NAGUS para los usuarios GLONASS con noticias, estado y anomalías del sistema, para así anunciar la inutilidad de alguno o varios satélites. Otras organizaciones, como GLONASS Group del Laboratorio de Lincoln de Massachusetts o el DLR-DFD Neustrelitz Remote Sensing Ground Station en Alemania, también controlan la actividad de GLONASS.

Las anomalías se producen cuando los parámetros que manda el satélite en su mensaje de navegación son incorrectos y el parámetro de salud indica que está sano. El resultado es una incorrecta pseudodistancia y trae consigo posicionamientos incorrectos. Las anomalías del sistema se determinan por medio de las estaciones de control, que hacen uso del algoritmo RAIM. Esto consiste en receptores autónomos de seguimiento íntegro que detectan anomalías en la transmisión de datos, aún figurando un buen estado de salud en los mensajes de navegación y almanaques. Además, si un receptor dispone de este algoritmo RAIM puede detectar fácilmente estas anomalías.

Un ejemplo de una publicación NAGU es la siguiente :

1.STATUS Information Group

GLONASS Constellation Status
(November 20, 1997)

GLONASS number	Cosmos number	Plane/ slot	Frequ. chann.	Launch date	Intro date	Status	Outage date
758	2275	3/18	10	11.04.94	04.09.94	operating	
760	2276	3/17	24	11.04.94	18.05.94	operating	
761	2277	3/23	3	11.04.94	16.05.94	withdrawn	29.08.97
767	2287	2/12	22	11.08.94	07.09.94	operating	
770	2288	2/14	9	11.08.94	04.09.94	operating	
775	2289	2/16	22	11.08.94	07.09.94	operating	
762	2294	1/4	12	20.11.94	11.12.94	operating	
763	2295	1/3	21	20.11.94	15.12.94	operating	
764	2296	1/6	13	20.11.94	16.12.94	operating	
765	2307	3/20	1	07.03.95	30.03.95	operating	
766	2308	3/22	10	07.03.95	05.04.95	operating	
777	2309	3/19	3	07.03.95	06.04.95	unusable	17.07.97
780	2316	2/15	4	24.07.95	26.08.95	operating	
781	2317	2/10	9	24.07.95	22.08.95	operating	
785	2318	2/11	4	24.07.95	22.08.95	operating	
776	2323	2/9	6	14.12.95	07.01.96	operating	
778	2324	2/9	11	14.12.95		spare	
782	2325	2/13	6	14.12.95	18.01.96	operating	

Note: All the dates (DD.MM.YY) are given at Moscow Time (UTC+0300)

2.SUMMARY Information Group

SUBJ:GLONASS STATUS 20 NOVEMBER 97

1.SATELLITES, PLANES, SLOTS AND CHANNELS

Plane 1/ slot:	01	02	03	04	05	06	07	08
Channel:	--	--	21	12	--	13	--	--
Plane 2/ slot:	09	10	11	12	13	14	15	16
Channel:	06	09	04	22	06	09	04	22
Plane 3/ slot:	17	18	19	20	21	22	23	24
Channel:	24	10	--	01	--	10	--	--

2.CURRENT ADVISORIES (ADV) AND FORECASTS (FCST)

INFORMATION IS REPEATED FOR ONE MONTH AFTER EVENT CONCLUDES.
ALL THE DATES (DD.MM.YY) ARE GIVEN AT MOSCOW TIME (UTC+0300)

A. FORECASTS

NAGU-MSG.DATE-TIME-SL/CH-TYPE-SUMMARY
101-971028-28.10.97-1100-10/09- FCST-OUTAGE 31.10/12.54-31.10/13.58

B. ADVISORIES

NAGU-MSG.DATE-TIME-SL/CH-TYPE-SUMMARY
067-970717-17.07.97-1100-19/03-ADVS-UNUSABLE 17.07/0350-UNFINISHED
099-971017-17.10.97-1100-20/01-ADVS-UNUSABLE 16.10/1550-16.10/1622
100-971027-27.10.97-1100-12/22-ADVS-UNUSABLE 26.10/0006-UNFINISHED
102-971029-29.10.97-1100-04/12-ADVS-UNUSABLE 28.10/1239-28.10/2054
103-971029-29.10.97-1100-15/04-ADVS-UNUSABLE 28.10/1349-29.10/0121
104-971105-05.11.97-1100-12/22-ADVS-PUT INTO OPERATION 04.11/1900

C. GENERAL: NO IMPACT, INFORMATIONAL PURPOSE ONLY

NAGU-MSG.DATE-TIME-SL/CH-TYPE-SUMMARY

3.NAGU Information Group

067-970717
NOTICE ADVISORY TO GLONASS USERS (NAGU) 067-970717
SUBJ:19/03 (777) UNUSABLE SINCE 17.07/0350 MT
1.CONDITION: 19/03 (777) UNUSABLE SINCE 17.07/0350 MT
(UTC+0300) UNTIL FURTHER NOTICE DUE TO MAINTENANCE
2.USERS ARE REMINDED TO UPDATE ALMANACS IF NECESSARY
3.POC:CSIC RSF AT +7-095-333-81-33

099-971017
NOTICE ADVISORY TO GLONASS USERS (NAGU) 099-971017
SUBJ: 20/01 (765) UNUSABLE 16.10/1550-16.10/1622 MT
1.CONDITION: 20/01 (765) WAS UNUSABLE SINCE 16.10/1550
UNTIL 16.10/1622 MT (UTC+0300) DUE TO MAINTENANCE
2.POC:CSIC RSF AT +7-095-333-81-33

100-971027
NOTICE ADVISORY TO GLONASS USERS (NAGU) 100-971027
SUBJ:12/22 (767) UNUSABLE SINCE 26.10/0006 MT
1.CONDITION: 12/22 (767) UNUSABLE SINCE 26.10/0006 MT
(UTC+0300) UNTIL FURTHER NOTICE DUE TO MAINTENANCE
2.USERS ARE REMINDED TO UPDATE ALMANACS IF NECESSARY
3.POC:CSIC RSF AT +7-095-333-81-33

2.2. SECTOR ESPACIAL.

El Sector Espacial está formado por la constelación de satélites. La constelación completa se compone 24 satélites en tres planos orbitales, cuyo nodo ascendente es de 120° y argumento de latitud de 15°. Cada plano contiene 8 satélites espaciados regularmente, con argumento de latitud de 45°. Los planos están inclinados 64,8° respecto al Ecuador. Los satélites GLONASS se encuentran a una distancia de aproximadamente 19100 Km y se sitúan en órbitas casi circulares con semieje mayor de aproximadamente 25510 Km, siendo el periodo orbital de 675,8 minutos, es decir , 11horas y 15 minutos. Esto garantiza, con la constelación completa, la visibilidad de un mínimo de 5 satélites en todo el mundo con adecuada geometría, es decir, la constelación GLONASS proporciona una cobertura de navegación continua y global para la ejecución satisfactoria de observaciones de navegación. Cada satélite transmite una señal de navegación de radiofrecuencia, conteniendo un mensaje de navegación para los usuarios.

Los planos se numeran del 1 al 3. Cada satélite, según el plano en el que esté, 1 ,2 ó 3, se numera del 1 al 8, del 9 al 16 y del 17 al 24 respectivamente.

El primer satélite se lanzó el 12 de Octubre de 1982, y el último el 14 de Diciembre de 1995. En este periodo de tiempo se han realizado un total de 27 lanzamientos (dos de ellos fallidos con fecha 24-4-1987 y 17-2-1988), poniendo en órbita un total de 73 satélites, de los cuales a fecha de Enero de 1998, sólo 13 están actualmente operativos, más uno de repuesto. La distribución de los satélites en sus planos viene dada por la siguiente tabla:

TABLA 1. Planos, satélites y canales.

Plano 1								
Satélite	01	02	03	04	05	06	07	08
Canal	-	-	21	12	-	13	-	-
Plano 2								
Satélite	09	10	11	12	13	14	15	16
Canal	06	09	04	22	06	-	04	22
Plano 3								
Satélite	17	18	19	20	21	22	23	24
Canal	24	-	-	01	-	10	-	-

Cada satélite GLONASS dispone de un pequeño reflector, que es usado para el seguimiento de los satélites por láser desde las estaciones de control. Existen 4 prototipos o modelos de satélite. El primer prototipo lo componen un total de 10 satélites que forman el Bloque I, lanzados entre Octubre-82 y May-85. Otros 6 satélites del segundo prototipo forman el Bloque IIa, lanzados entre Mayo-85 y Septiembre-86. Un total de 12 satélites forman el Bloque IIb del tercer prototipo, lanzados entre Abril-87 y Mayo-88, de los cuales seis se perdieron en los dos fallos anteriormente reseñados por fallo del vehículo de lanzamiento. El cuarto prototipo forma el Bloque IIv, constituido por 43 satélites, de los cuales se han lanzado la totalidad de ellos hasta la fecha de 14 de Diciembre de 1995.

Cada subsiguiente generación de satélites contienen equipamientos más modernos y tienen un mayor periodo de vida. El Gobierno Ruso desarrolla un nuevo prototipo de satélites que irán sustituyendo a los antiguos para formar la nueva Constelación GLONASS-M. Los test con los satélites GLONASS-M comenzaron en 1996. Las principales características de la Constelación GLONASS-M son:

- la esperanza de vida de los satélites será de 5 años, frente a los 3 años de los satélites actuales.
- transmisión del código C/A en L2 para uso civil.
- estabilidad en los relojes de $1 \cdot 10^{-13}$ s frente a la actual de $5 \cdot 10^{-13}$ s.
- mejora de las precisiones de las efemérides.
- capacidad del Sector de Control para establecer la mala salud de los satélites a los 10s de producirse el fallo.
- transmisión instantánea del desfase entre las escalas de tiempo GPS y GLONASS.
- reducción del rms (URE) a 5 m frente al valor actual de 10 m.

2.2.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS SEÑALES GLONASS.

Las descripciones de las señales GLONASS se refleja en los documentos ICD. Los satélites GLONASS transmiten dos señales de ruido pseudoaleatorio. Los satélites GLONASS llevan a bordo relojes de atómicos de Cesio con un oscilador de frecuencia fundamental de 5 MHz. A partir de esta frecuencia fundamental se pueden obtener o modular los códigos C/A y P, de frecuencias 0.511 MHz y 5.11 MHz respectivamente. En la señal también se introduce un mensaje de 50 bits por segundo. La **banda L1** funciona en la frecuencia $1602 + 0.5625 \cdot k$ MHz, donde k es el canal (0-24), lo genera un rango de frecuencias que van desde 1602 - 1615.5 MHz. La **banda L2** funciona en la frecuencia $1246 + 0.4375 \cdot k$ MHz, lo que genera un rango de frecuencias que van desde 1246 - 1256.5 MHz.

Algunas transmisiones GLONASS crean interferencias con las señales astronómicas de radio, que usan las bandas de frecuencia de 1610.6 - 1613.8 y 1660 - 1670 MHz, que corresponden a los canales GLONASS del 15 al 20. Además, las transmisiones GLONASS de frecuencias superiores 1610 MHz tienen interferencias con las señales del servicio de satélites para comunicaciones móviles en las frecuencias que van desde 1610 - 1626.5 MHz. Para solucionar esto, y por la necesidad de minimizar las interferencias, las autoridades encargadas del Sistema GLONASS decidieron reducir el número de frecuencias usadas (y por lo tanto el número de canales), y bajar el intervalo de frecuencias utilizadas. Así, el sistema constará de 12 canales de frecuencia, mas dos adicionales para los test de control. De esta forma la **banda L1** se encontrará entre 1598.0625 - 1604.25 MHz y la **banda L2** se encontrará entre 1242.9375 - 1247.75 MHz. Los actuales y futuros canales de frecuencias GLONASS se pueden resumir de la forma siguiente:

* **Frecuencias iniciales:** $f_{L1} = 1602 + 0.5625 \cdot k$ MHz ($k = 0, \dots, 24$)
 $f_{L2} = 1246 + 0.4375 \cdot k$ MHz ($k = 0, \dots, 24$)

* **Hoy y hasta 1998:** 1602 - 1608.8 MHz (canales 1 - 12)
 1614.4 - 1615.5MHz (canales 22 - 24)

1246 - 1251.25 MHz (canales 1 - 12)
 1255.625 - 1256.5 MHz (canales 22 - 24)

Los canales 15-20 no están en uso y el ICD estipula el uso de los canales de frecuencia 13, 14, y 21 en circunstancias excepcionales.

* **1998-2005:** 1602 - 1608.8 MHz (canales 0 - 12)

1246 - 1251.25 MHz (canales 0 - 12)

* **A partir de 2005:** 1598.1 - 1604.25 MHz (canales -7 - 4)

1242.9375 - 1247.75 MHz (canales -7 - 4)

Los canales 5 y 6 serán utilizados para test de control.

Pero la cuestión que se plantea es cómo introducir los 24 satélites de la constelación completa en sólo 12 canales. Lo que se plantea es introducir dos satélites antipodales de un mismo plano en el mismo canal, esto es, satélites separados 180° de argumento de latitud, de forma que un usuario colocado en cualquier punto de la Tierra nunca recibirá señales simultáneas de los dos satélites sitiados en el mismo canal.

GLONASS transmite el código P en ambas bandas L1 y L2 y el código C/A, de momento sólo en la banda L1, pero está programado que la Constelación GLONASS-M lo transmita también en la banda L2 para uso civil.

El código C/A tiene una longitud de 511 chips y se propaga con una velocidad de 511 Kchips/s y por lo tanto con una repetibilidad de 1 milisegundo. El código P tiene una longitud de $5.11 \cdot 10^6$ chips y se propaga con una velocidad de 5.11 Mchips/s, cuya repetibilidad es de 1 segundo. A diferencia de los satélites GPS, **todos los satélites GLONASS transmiten los mismos códigos**. Esto es así porque en GLONASS la identificación de los satélites se hace por la frecuencia de las portadoras y no por el PRN de los códigos como se hace en GPS.

Los errores que se pueden cometer en el posicionamiento absoluto de un punto con el código C/A utilizando el Sistema GLONASS son de unos 60 m (99.7%) en horizontal y de unos 75 m (99.7%) en vertical. Esta precisión es comparable a la que ofrece el Sistema GPS sin la Disponibilidad Selectiva.

2.2.2. MENSAJE DE NAVEGACIÓN.

El mensaje de navegación se transmite con una velocidad de 50 bit/s y se modula junto con los códigos C/A y P. El mensaje de navegación GLONASS del código C/A divide los datos en datos operacionales o inmediatos y datos no operacionales o no inmediatos. Los **datos operacionales** son las efemérides, los parámetros de reloj y época del reloj del satélite. Las efemérides de los satélites se dan en términos de posición, velocidad, y vector de aceleración de la época de referencia. Los **datos no operacionales** comprenden el almanaque (o efemérides aproximadas) de la constelación, junto con los estados de salud de todos los satélites GLONASS. Los datos de salud de los satélites no tienen tiempo de actualización. Además, en los datos no operacionales hay un parámetro que indica la diferencia entre el sistema de tiempo GLONASS y el UTC, parámetro llamado τ_c . Estos datos se determinan para el comienzo de cada día.

Los parámetros de efemérides son generalmente cargados en cada satélite una vez al día, junto con el parámetro τ_c . El tiempo desde la última grabación o actualización de los datos del mensaje se determina por un parámetro E_n , que determina la edad de las efemérides en días. Los parámetros de reloj son grabados dos veces al día. El mensaje completo tiene una duración de 2 min. y 30 seg., pero las efemérides y la información de reloj se repite cada 30 seg.

Las autoridades GLONASS no han publicado hasta ahora los contenidos del mensaje de navegación del código P. Sin embargo, se sabe que el mensaje completo dura 12 min. y que las efemérides y la información de reloj se repite cada 10 seg.

El Sistema GLONASS dispone de un sistema de tiempos y de un sistema de referencia propio y distinto al de GPS. El tiempo GLONASS está referido al UTC(SU). El UTC(SU) se diferencia en unos microsegundos al UTC(BIPM). El NTFSS (National Time and Frequency Service) se encarga de que el desfase sea de un microsegundo o menos. Para ello, en determinadas ocasiones se introduce un salto de unos segundos, a diferencia del tiempo GPS que no requiere de estos saltos.

2.2.3. SISTEMA REFERENCIA. DATUM PZ-90.

Las efemérides GLONASS están referidas al Datum Geodésico Parametry Zemli 1990 o PZ-90, o en su traducción Parámetros de la Tierra 1990 o PE-90. Este sistema reemplazó al SGS-85, usado por GLONASS hasta 1993.

El sistema PZ-90 es un sistema de referencia terrestre con coordenadas definidas de la misma forma que el Sistema de Referencia Internacional Terrestre (ITRF). Las constantes y parámetros del PZ-90 se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 2. Parámetros del Datum PZ-90.

Parámetro	Valor
Rotación de la Tierra	$72.92115 \cdot 10^{-6}$ rad/s
Constante Gravitacional	$398600.44 \cdot 10^9$ m ³ /s ²
Constante Gravitacional de la atmósfera	$0.35 \cdot 10^9$ m ³ /s ²
Velocidad de la luz	299792458 m/s
Semieje mayor del elipsoide	6378136 m
Aplanamiento del elipsoide	1 / 298.257839303
Aceleración de la gravedad en el Ecuador	978032.8 mgal

La realización del Sistema PZ-90 por medio de la adopción de coordenadas de estaciones de referencia ha dado como resultado el desfase en el origen y orientación de los ejes, así como la diferencia en escala con respecto al ITRF y al Sistema WGS-84 también.

2.3. SECTOR USUARIO.

El Sistema GLONASS es un sistema militar y civil. Todos los usuarios militares y civiles constituyen el Sector Usuario. El desarrollo y diseño de nuevos receptores por parte de los fabricantes está en continua evolución.

Un equipo de recepción de señales GLONASS, al igual que uno de GPS, está formado por una antena y un receptor. La antena suele llevar un plano de tierra para evitar el efecto multipath, es decir, la recepción de señales reflejadas en el suelo u otros objetos, que empeoran la precisión. Los receptores disponen de un reloj para sincronizar las señales recibidas.

Existen dos generaciones de receptores GLONASS. La primera generación contenían 1, 2 y 4 canales. La segunda generación son ya mucho más compactos y ligeros, incluyendo 5, 6 y 12 canales, usados para aplicaciones civiles y capaces de operar con las dos constelaciones GPS/GLONASS.

Fuera de Rusia, hay un número considerable de fabricantes e investigadores que han diseñado y construido receptores GLONASS o GPS/GLONASS incluyendo doble frecuencia y códigos C/A y P. Algunos de ellos eran prototipos desarrollados para ganar experiencia con GLONASS, y otros para aplicaciones específicas.

Entre las principales marcas de los receptores GLONASS o GPS/GLONASS se encuentran:

- GEOTRACER 2404: 12 canales GPS y 12 canales GLONASS.
- Magnavox: 8 canales GLONASS.
- 3S Navigation: 12 canales GNSS para navegación.
- GG-24 Astech: 12 canales GPS y 12 canales GLONASS.
- Sercel Scorpio 6001: 16 canales GPS/GLONASS.

CAPÍTULO III. USO COMBINADO DE LOS SISTEMAS GPS Y GLONASS.

1. INTRODUCCIÓN.

Los Sistemas GPS y GLONASS son sistemas autónomos, es decir, cada uno tiene su propio sistema de referencia y su propio sistema o escala de tiempo. Usan diferentes sistemas de referencia para expresar las posiciones de sus satélites, y por lo tanto, para determinar las posiciones de los usuarios.

Para poder utilizar los dos Sistemas de Posicionamiento por Satélite, GPS y GLONASS, es decir, recibir señales de los satélites de la constelación GPS y de la constelación GLONASS, es necesario establecer la relación entre los sistemas de tiempo y sistemas de referencia utilizados en los dos sistemas. El Sistema GPS utiliza el sistema de referencia WGS-84, mientras que el Sistema GLONASS utiliza el PZ-90. Los parámetros que definen los dos sistemas de referencia son significativamente diferentes.

Analizando las pseudodistancias medidas a los satélites GLONASS y GPS los errores cometidos vienen expresados por el valor error URE o σ_{URE} (User Range Error). 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 σ_{URE} . El URE se define como la diferencia entre la pseudodistancia y la distancia calculada a partir de las posiciones dadas de los satélites, teniendo en cuenta sólo los errores de reloj y de deriva. Para GLONASS, el valor del URE es de $\sigma_{URE} \cong 10$ m, mientras que para GPS sin SA es de $\sigma_{URE} \cong 7$ m, y con SA es de $\sigma_{URE} \cong 25$ m. La diferencia en los valores de URE de 7 a 10 m entre los Sistemas GPS y GLONASS, es atribuida principalmente a la falta de corrección del efecto ionosférico en GLONASS.

2. ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE LA UTILIZACIÓN DE AMBOS SISTEMAS Y SU USO COMBINADO.

El Laboratorio Lincoln de Massachusetts hizo un estudio de las precisiones que ofrecen ambos sistemas de posicionamiento y las precisiones de su uso combinado, analizando las precisiones obtenidas en posicionamiento absoluto usando en código C/A durante periodos de 24 h. La precisión con GLONASS, obtenida en estas pruebas es mejor que los niveles garantizados por el Gobierno Ruso. Además, la precisión con GLONASS es mejor que la obtenida con GPS debido a que la Disponibilidad Selectiva está activada. Sin embargo, si la SA estuviera desactivada, la precisión con GPS sería mejor que con GLONASS. Los siguientes valores muestran los resultados obtenidos por el Laboratorio Lincoln en una de las pruebas

realizadas para la obtención de posiciones absolutas utilizando la constelación GLONASS, la constelación GPS y su uso combinado GPS/GLONASS:

*** Posiciones estimadas con GLONASS:**

- Error horizontal (m):	10 (50%) 21.2 (95%) 26.8 (99%)
- Error vertical (m) :	14.6 (50%) 39.1 (95%) 46.3 (99%)

*** Posiciones estimadas con GPS:**

- Error horizontal (m):	20.6 (50%) 48.4 (95%) 62.9 (99%)
- Error vertical (m) :	26.7 (50%) 81.7 (95%) 105.1 (99%)

*** Posiciones estimadas con la combinación GPS/GLONASS:**

- Error horizontal (m):	6.5 (50%) 14.9 (95%) 25.8 (99%)
- Error vertical (m) :	16.7 (50%) 41.8 (95%) 49.5 (99%)

Con la disponibilidad de receptores GPS/GLONASS, el usuario puede tener acceso a un sistema combinado de hasta 48 satélites (con la dos constelaciones completas). Con todos estos satélites, los trabajos en desfiladeros y otras localizaciones de visibilidad restringida, tales como áreas boscosas, etc., es mejorada debido a la posibilidad de mayor información de más satélites. Además, una mayor constelación de satélites también mejora la ejecución del posicionamiento diferencial en tiempo real, ya que, el tiempo menor de toma de datos, con respecto a un posicionamiento diferencial calculado en post-proceso, se ve compensado por la obtención de una mayor información de más satélites. Pero eso no es todo, además el tiempo de inicialización para alcanzar precisiones de nivel centimétrico mejora en un factor de 3 a 6 con una constelación de 48 satélites.

El posicionamiento posee una integridad mayor. Para un nivel de confianza de 99.9% el posicionamiento con GPS requiere una recepción continua de 6 o mas satélites en sus constelación de 24 satélites. Para el mismo nivel de confianza, usando GPS/GLONASS se requiere una recepción continua de 7 satélites de los 48 de la combinación. Las operaciones de código diferencial vienen a ser más simples. Debido a que no existe una degradación deliberada de la precisión, el trabajo con GLONASS diferencial requiere mucha menor cantidad de

correcciones. Es posible la detección del 100% de los fallos, tanto en disponibilidad de los satélites, como en la calidad de la información que transmiten, gracias a la existencia de los RAIM (Receiver Autonomous Integrity Monitoring), que son receptores autónomos de seguimiento íntegro que utilizan unos algoritmos que detectan anomalías en la transmisión de datos, aún figurando un buen estado de salud en los mensajes de navegación y almanaques.

Las principales ventajas del uso combinado GPS/GLONASS son la mejora en la geometría de los satélites y la mitigación de la Disponibilidad Selectiva. Las posiciones se estiman usando los parámetros de transformación entre el sistema PZ-90 y el WGS-84.

3. OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE TRANSFORMACIÓN ENTRE PZ-90 Y WGS-84.

Los parámetros que definen los dos sistemas de referencia PZ-90 y WGS-84 son significativamente diferentes. Para poder utilizar el sistema combinado GPS/GLONASS es necesario el conocimiento de las posiciones de todos los satélites utilizados, satélites GPS y GLONASS, en el mismo sistema de referencia. Para ello, lo que se realiza es el paso de las posiciones de todos los satélites GLONASS al sistema de referencia WGS-84, y así trabajar con la constelación de los 48 satélites en un mismo sistema de referencia. Además de la unificación del sistema de referencia, es necesario establecer también la relación entre los dos sistemas o escalas de tiempo utilizados. Esto se resuelve por medio de la información contenida en los mensajes de navegación de cada uno de los sistemas, donde aparecen las diferencias entre los tiempos GPS o tiempos GLONASS con respecto al Tiempo Universal Coordinado.

Para obtener las efemérides de los satélites GLONASS en el sistema WGS-84 es necesario conocer los parámetros de transformación de PZ-90 a WGS-84, para lo cual se necesita un cierto número de satélites GLONASS con coordenadas en ambos sistemas. Con estos satélites se calculan los parámetros de transformación utilizando la técnica de mínimos cuadrados, y se aplican al resto de satélites.

Las coordenadas de los satélites GLONASS en PZ-90 aparecen en el mensaje de navegación que mandan los satélites. La estimación de las posiciones de los satélites GLONASS en WGS-84 es realizada por una serie de estaciones de seguimiento que utilizan técnicas de medición láser, radar y ópticas para la determinación de las órbitas. Estas estaciones están localizadas por todo el mundo:

- * **Técnicas láser:** Estados Unidos, Alemania, Austria, Finlandia, Latvia, Rusia, Ucrania, Uzbekistan, Japón y Australia.
- * **Técnicas radar:** Westford y Kwajalein.
- * **Técnicas ópticas:** Estaciones MOTIFF en Hawaii y Estaciones GEODSS

La determinación de las órbitas se realiza utilizando un software de alta precisión que usa la técnica de mínimos cuadrados. Las órbitas son calculadas usando nueve días de datos de seguimiento. Una vez que los parámetros orbitales son estimados, el programa genera vectores de estado en intervalos de 30 minutos, correspondientes a las épocas de las efemérides GLONASS transmitidas. La calidad de la determinación de las órbitas tras el cálculo se estima por un error rms de la posición de los satélites del orden de 11 m.

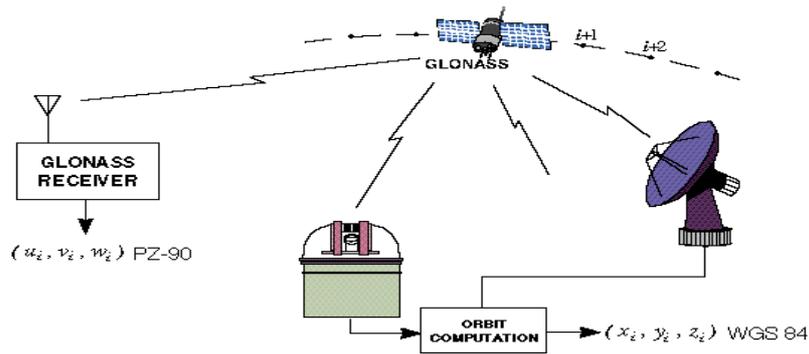


Figura 1. Estaciones de seguimiento para el cálculo de las órbitas de los satélites GLONASS en WGS-84.

En el Laboratorio Lincoln de Massachusetts se calculan los parámetros de transformación entre ambos sistemas. Se utiliza una red de receptores de referencia distribuidos por toda la superficie de la Tierra que obtienen las coordenadas de los satélites GLONASS en ambos sistemas. Obtienen las posiciones de los satélites GLONASS en el sistema PZ-90 a partir de las efemérides transmitidas, y las coordenadas de los satélites GLONASS en WGS-84 a partir de la red de estaciones de seguimiento láser y sistemas radar. Se estiman los parámetros de la transformación por MMCC, obteniendo como resultado de la transformación una rotación alrededor del eje Z y una traslación a lo largo del eje Y. Los parámetros de la transformación resultantes se muestran en la siguiente figura :

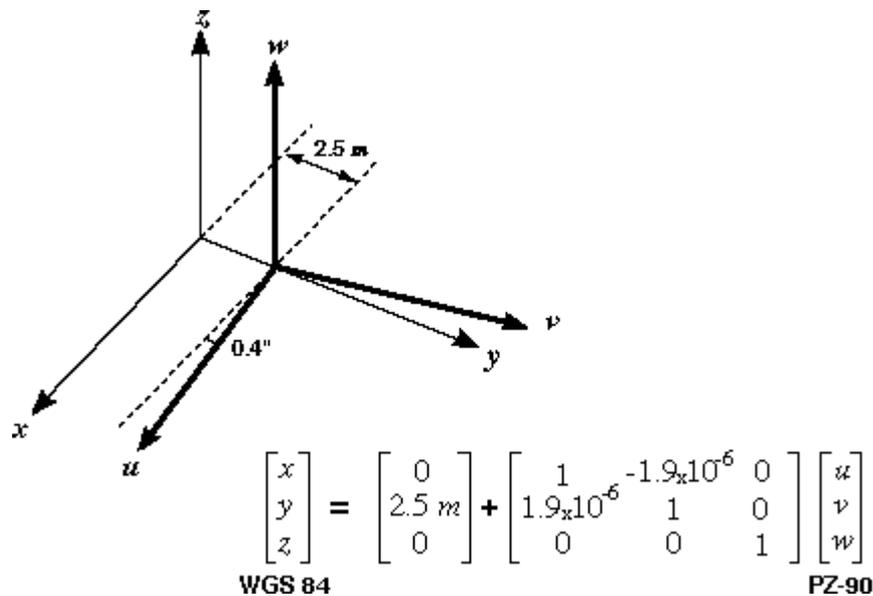


Figura 2. Transformación de coordenadas de PZ-90 a WGS-84.

Una vez que tenemos los parámetros de la transformación del sistema PZ-90 al sistema WGS-84 ya podemos tener las efemérides de todos los satélites GLONASS en el sistema WGS-84, y por lo tanto podremos utilizar el sistema combinado GPS/GLONASS.

La mayor causa de error en la determinación de los parámetros de transformación se encuentra en las efemérides transmitidas. Para facilitar el uso combinado GPS/GLONASS, las autoridades Rusas pretenden incluir en los nuevos mensajes de navegación de los satélites de la

constelación GLONASS-M, las diferencias entre los dos sistemas de tiempos y posiciones de referencia.

CAPÍTULO IV. LAS OBSERVABLES.

1. 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.

2. 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.

3. 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:

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

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:

$$\varphi^S(t) = f^S t - f^S \frac{\rho}{c} - \varphi_0^S$$

$$\varphi_R(t) = f_R t - \varphi_{R0}$$

Las fases iniciales φ_0^S y φ_{R0} son causadas por los errores de los relojes del satélite y receptor:

$$\varphi_0^S = f^S \cdot \delta^S$$

$$\varphi_{R0} = f_R \cdot \delta_R$$

La diferencia de fase entre ambas será:

$$\varphi_R^S(t) = \varphi^S(t) - \varphi_R(t) = -f^S \frac{\rho}{c} - f^S \cdot \delta^S + f_R \cdot \delta_R + (f^S - f_R) \cdot t$$

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:

$$f^S = f_R = f$$

$$\varphi_R^S(t) = -f^S \frac{\rho}{c} - f \Delta\delta$$

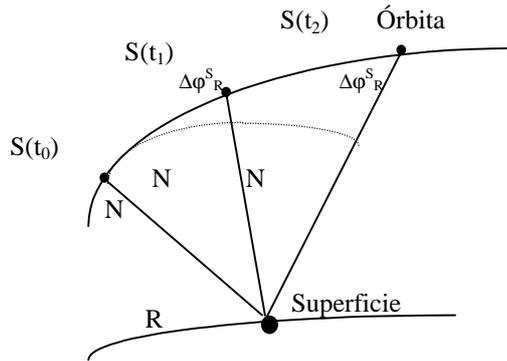
$$\text{donde } \Delta\delta = \delta^S - \delta_R$$

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:

$$\varphi_{R}^{S}(t) = \Delta\varphi_{R}^{S} \Big|_{t_0}^t + N$$

donde $\Delta\varphi_{R}^{S}$ (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 $\Delta\varphi_{R}^{S}$ 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.

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

4. 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:

$$\varphi = n_1 \varphi_1 + n_2 \varphi_2$$

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

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

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 $\lambda_{L1+L2} = 10,7$ 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 $\lambda_{L1-L2} = 86,2$ 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 :

$n_1 = 1$ 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.

CAPÍTULO V. CALIDAD Y BONDAD DE LAS OBSERVACIONES.

1. 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

Figura 1. Fuentes de error.

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 seudodistancia 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 σ_{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 :

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

2. ERRORES RELATIVOS AL SATÉLITE.

2.1. 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.

2.2. 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.

3. 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.

3.1. 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 m^3 . (Valores observados de 10^{16} a 10^{19}).

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 n_1 y n_2 para que los valores del efecto ionosférico que sufren ambas portadoras sea eliminado. Desarrollando esta expresión, se obtienen los valores de n_1 y n_2 para la *combinación libre de efecto ionosférico*, que quedaría de la forma:

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

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.

3.2. 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:

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

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:

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

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

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*:

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

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.

3.3. 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.

3.4. 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.

3.5. EFECTO 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.

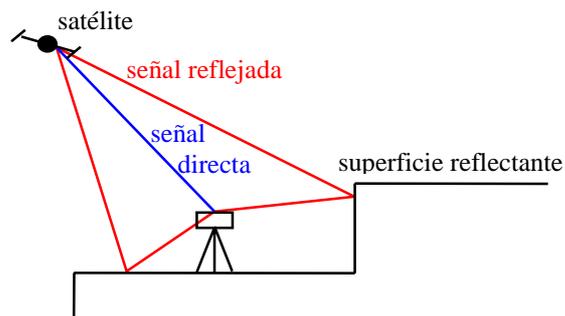


Figura 2. Efecto Multipath.

4. ERRORES RELATIVOS AL RECEPTOR.

4.1. 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.

4.2. 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.

4.3. 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.

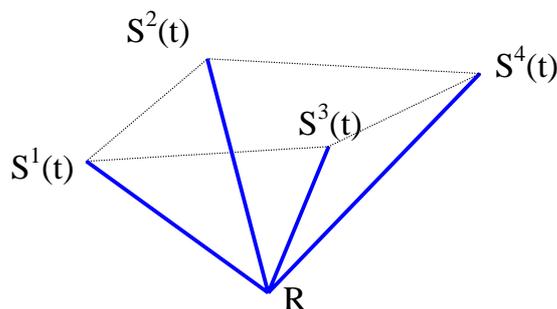
Por ejemplo, es importante no comenzar una observación hasta que no se hayan sincronizado perfectamente todos los satélites, ya que lo único que estaremos haciendo es introducir ruido a la observación.

4. 4. 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.

5. 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:** Dilucion de precisión relativa entre dos puntos.

CAPÍTULO VI. PROCESAMIENTO DE DATOS.

1. 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 (singles 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:

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

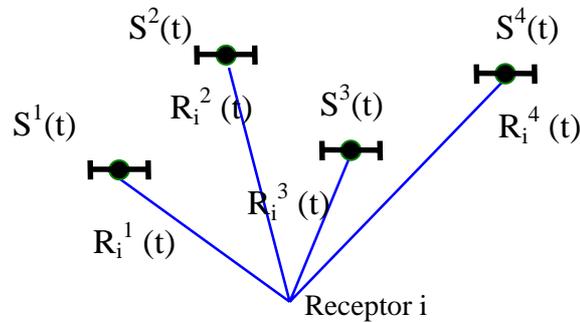
que puede ser simplificada por:

$$x = N_A^{-1} \cdot t \quad \text{donde } N_A = (A^T \cdot P \cdot A) \text{ y } t = A^T \cdot P \cdot L.$$

2. 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:

$R_i^j(t)$: La pseudodistancia entre el satélite y el receptor.

$\rho_i^j(t)$: La distancia geométrica real entre el satélite y el receptor.

c : Velocidad de la luz en el vacío.

$\Delta\delta_i^j(t)$: 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:

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

el término $\delta_i^j(t)$ 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 ($\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i, \delta_i(t)$), 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 nº 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 nº 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.

3. 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 \mathbf{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:

$$\mathbf{X}_B = \mathbf{X}_A + \mathbf{v}_{AB}$$

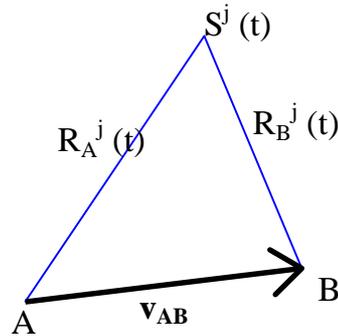
Las componentes del vector son:

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

3.1. 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:

$$\begin{aligned} R_A^j(t) &= \rho_A^j(t) + c \cdot \delta^j(t) - c \cdot \delta_A(t) \\ R_B^j(t) &= \rho_B^j(t) + c \cdot \delta^j(t) - c \cdot \delta_B(t) \end{aligned}$$



El vector \mathbf{v}_{AB} puede ser expresado como diferencia de ambas pseudodistancias:

$$\mathbf{v}_{AB} = R_B^j(t) - R_A^j(t) = R_{AB}^j(t)$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{AB} &= \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) - c \cdot \delta_B(t) + c \cdot \delta_A(t) = \\ &= \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) + c (\delta_A(t) - \delta_B(t)) = R_{AB}^j(t) \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} R_{AB}^j(t) - \rho_{B_0}^j(t) + \rho_{A_0}^j(t) &= - \frac{X^j(t) - X_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta X_B - \frac{Y^j(t) - Y_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Y_B - \frac{Z^j(t) - Z_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Z_B \\ &+ \frac{X^j(t) - X_{A_0}}{\rho_{A_0}^j(t)} \Delta X_A + \frac{Y^j(t) - Y_{A_0}}{\rho_{A_0}^j(t)} \Delta Y_A + \frac{Z^j(t) - Z_{A_0}}{\rho_{A_0}^j(t)} \Delta Z_A \\ &+ c \cdot (\delta_A(t) - \delta_B(t)) \end{aligned}$$

donde inicialmente el nº de incógnitas es 8. Sin embargo, para posicionamiento relativo o diferencial se supone un punto conocido, sea A, y por lo tanto $\Delta X_A = \Delta Y_A = \Delta Z_A = 0$, y la expresión queda:

$$\begin{aligned} R_{AB}^j(t) - \rho_{B_0}^j(t) + \rho_{A_0}^j(t) &= - \frac{X^j(t) - X_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta X_B - \frac{Y^j(t) - Y_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Y_B - \frac{Z^j(t) - Z_{B_0}}{\rho_{B_0}^j(t)} \Delta Z_B \\ &+ c \cdot (\delta_B(t) - \delta_A(t)) \end{aligned}$$

donde 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 nº 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 nº de épocas, podemos resolver el sistema para cada época, calculando un valor de $R_{AB}(t_i)$, 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 $R_{AB}^{jL1}(t_i)$ y $R_{AB}^{jL2}(t_i)$, para cada satélite j y cada época t_i .

3.2. CÁLCULO DEL POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL POR FASE.

Simple diferencias.

Partiendo de la ecuación de pseudodistancias para medidas de fase :

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

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

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

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

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:

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

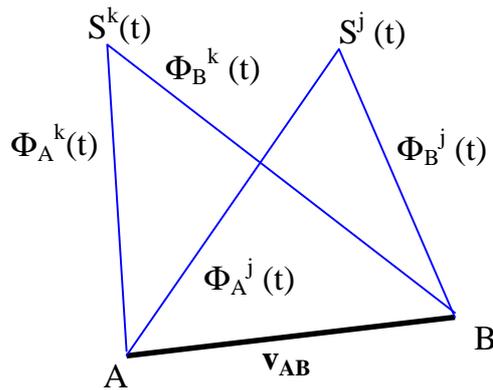
Obteniendo la forma final de la *ecuación de simples diferencias*, donde podemos comprobar que se ha eliminado el error del estado del reloj del satélite ($\delta^j(t)$).

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:

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

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



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:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_{12})$$

Donde:

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \Phi_B^k(t_2) - \Phi_B^j(t_2) - \Phi_A^k(t_2) + \Phi_A^j(t_2) - \Phi_B^k(t_1) + \Phi_B^j(t_1) + \Phi_A^k(t_1) - \Phi_A^j(t_1)$$

$$\rho_{AB}^{jk}(t_{12}) = \rho_B^k(t_2) - \rho_B^j(t_2) - \rho_A^k(t_2) + \rho_A^j(t_2) - \rho_B^k(t_1) + \rho_B^j(t_1) + \rho_A^k(t_1) - \rho_A^j(t_1)$$

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 ρ_{AB}^{jk} , 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 $I_{AB}^{jk}(t)$ de valores conocidos será:

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

el cual comprende el valor medido $\lambda \Phi_{AB}^{jk}(t)$ 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:

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

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:

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

$$I_{AB}^{jk}(t) = a_{XB}^{jk}(t) \cdot \Delta X_B + a_{YB}^{jk}(t) \cdot \Delta Y_B + a_{ZB}^{jk}(t) \cdot \Delta Z_B + \lambda N_{AB}^{jk}$$

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 $\rho_{B_0}(t)$ 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 (L_1) y 24,4 cm (L_2). 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 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.

CAPÍTULO VII. 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.

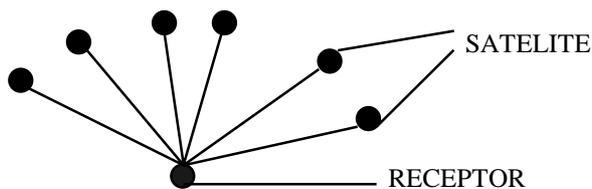
Para llevar a cabo el posicionamiento, el receptor recibe las señales de los satélites y determina su posición en coordenadas absolutas y en el sistema de referencia al que están referidos los satélites. Las observables utilizadas para el posicionamiento absoluto suelen ser los códigos, pero también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

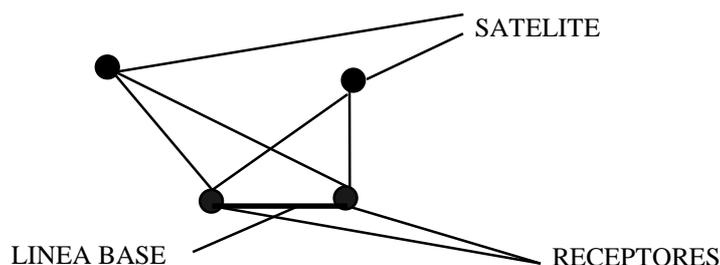
2. POSICIONAMIENTO DIFERENCIAL.

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 de 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 almanques 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 la 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 es, 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.

CAPÍTULO VIII. 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 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.

CAPÍTULO IX. 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 la 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.

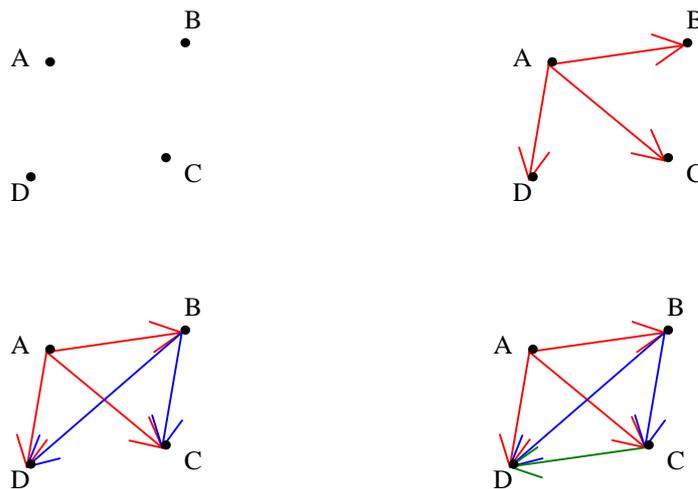
El siguiente paso es determinar los parámetros correctos y apropiados para el cálculo de las líneas base, es decir :

- 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 la 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.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Gibbons, G., Punting on L5, in GPS World of April 1997.
- 2.- Hofmann-Wenllenhof, B., 1994, GPS Theory and Practice, Springer-Verlag, New York.
- 3.- Holanda Blas, M.P., Bermejo Ortega, J.C., Hernanz Villalba, P., Gómez Sánchez, F., Madrid 1997, Estudio de la precisión que el sistema GPS proporciona en cada una de sus cinco observables y comportamiento de las mismas en función de diversos condicionantes para la medida de líneas base en un amplio rango de distancias.
- 4.- Langley, R., The GPS Error Budget, in GPS World of March 1997.
- 5.- Langley, R., GPS Receiver System Noise, in GPS World of June 1997.
- 6.- Langley, R., Review and Update of GPS and GLONASS, in GPS World of July 1997.
- 7.- Leick, A., 1996, GPS Satellite Surveying, Wiley-Interscience, New York.
- 8.- Mikhail, E. M., 1981, Analysis and Adjustment of Survey Measurement, Van Nostrand Reinhold, New York.
- 9.- Núñez-García, A.,Valbuena Durán, J.L., Velasco Gómez, J., 1992, GPS La Nueva Era de la Topografía, Ediciones de las Ciencias Sociales, Madrid.
- 10.- Documentos de Internet publicados por el Laboratorio Lincoln de Massachusetts, el Coordinational Scientific Information Center ruso y por el DLR-DFD Neustrelitz Remote Sensing Ground Station en Alemania, Noviembre 1997.