Conceptos básicos de los sistemas de Geodesia Espacial en Ingeniería. 1
1 Conceptos de Geodesia Espacial. 1
1.1 Componentes básicos de cualquier sistema GNSS. 1
1.2 Modelización precisa del tiempo. 3
1.3 Modelización del movimiento perturbado de los satélites. 3
1.4 Efectos atmosféricos. 4
1.5 Frecuencias usadas por los diferentes sistemas GNSS. 4
2 Constitución y observables del sistema gps. 5
2.1 Constitución del sistema. 5
2.2 Estructura de la información emitida. 6
2.3 Observables del sistema GPS. 7
2.4 Posicionamiento básico: posición autónoma en tiempo real. 10
2.5 Posicionamiento preciso: métodos diferenciales o relativos. 14
2.6 Sistema de referencia empleado por el sistema GPS. 15
3 Metodologías de posicionamiento. 15
3.1 Estático rápido. 17
3.2 Tiempo real: enlace convencional usando un radio enlace. 19
3.3 Tiempo real: uso de las redes activas GNSS. 20

Autores:
Javier Mª. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1.- Componentes de un sistema GNSS: sectores espaciales, control y usuario..... 2
Ilustración 2.- Capas en las que se divide la atmósfera para su estudio. 4
Ilustración 3.- Frecuencias utilizadas por los distintos sistemas satelitarios. 5
Ilustración 4.- Sector espacial de la constelación gps. (http://www.gps.gov/systems/gps/space/) 6
Ilustración 5.- Estructura de la información emitida por los satélites GPS. 7
Ilustración 6.- Código C/A correspondiente a los cinco primeros satélites GPS. 7
Ilustración 7.- Datos observados por un receptor GPS. 8
Ilustración 8.- Obtención de la seudodistancia. 9
Ilustración 9.- Escalas de tiempo en la obtención de la seudodistancia. 9
Ilustración 10.- Balance de datos e incógnitas en la distancia entre el satélite (sv) y el receptor (rv). 10
Ilustración 11.- Número mínimo de satélites para poder obtener una posición autónoma (SPS). 11
Ilustración 12.- Influencia en la determinación de la posición de la geometría de los satélites. Factores DOP. 11
Ilustración 13.- Influencia de la reducción del cielo visible en el PDOP. Máscara de elevación a 10º, 25º y 35º. (Datos observados por un receptor en Villacarriedo, Cantabria, el día 16-Nov-2013, entre las 10:00 y las 14:00 UTC) 13
Ilustración 14.- Precisión en el posicionamiento absoluto tiempo real (http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/). 14
Ilustración 15.- Parámetros que definen las diferentes metodologías GNSS. 16
Ilustración 16.- Principales metodologías GNSS. 16
Ilustración 17.- Incertidumbre de las metodologías GNSS más utilizadas. 16
Ilustración 18.- Especificaciones receptor GNSS Leica Geosystems, modelo GS25 (http://www.leica-geosystems.com) 17
Ilustración 19.- Ejemplo de cálculo de una línea base en un estático rápido. 19
Ilustración 20.- Esquema conceptual de la red activa GNSS de Cantabria. 21
Ilustración 21.- Catálogo de redes activas GNSS en España. 22
Ilustración 22.- Productos ofrecidos por las redes GNSS. 22
Ilustración 23.- Correcciones ofrecidas por la red activa de Cantabria. 23
Ilustración 24.- Comparación del uso de las soluciones de red y de estación aislada. 24

Conceptos básicos de los sistemas de Geodesia Espacial en Ingeniería.

Las metodologías de obtención de posiciones mediante técnicas de Geodesia espacial han experimentado un nivel de desarrollo tal que posibilitan, con la instrumentación y condiciones de observación adecuadas, la captura de posiciones con precisión y una simplicidad máxima, constituyendo de hecho una de las metodologías preferidas para muchos campos en la ingeniería civil.

1 CONCEPTOS DE GEODESIA ESPACIAL.

La Geodesia Espacial estudia la determinación de posiciones a partir de la observación y tratamiento de señales formadas por radiaciones del espectro electromagnético procedente de objetos no ligados a la superficie terrestre, tanto naturales – estrellas - como artificiales – satélites-.

El desarrollo que han experimentado los sistemas satelitarios destinados a la navegación en la superficie terrestre, genéricamente denominados GNSS – global navigation satellite system -, cuyo ejemplo más conocido es el sistema GPS, han sido posibles gracias a la combinación de varios avances tecnológicos, en concreto: medida absoluta del tiempo con precisión, determinación precisa de las posiciones de satélites orbitando alrededor de la tierra – efemérides – y la determinación de medidas modulando códigos en distintas frecuencias. A continuación se concretan estos avances.

1.1 Componentes básicos de cualquier sistema GNSS.

Un sistema GNSS está compuesto de tres sectores fundamentales:

- Sector espacial. Constituido por un conjunto de satélites que orbitan alrededor de la superficie terrestre y que emiten señales en una o varias frecuencias. Hay distintas constelaciones de satélites que se utilizan para posicionamiento y navegación en el ámbito civil actualmente.
- Sector de control. Es el encargado de mantener operativo el sistema. Lógicamente será el propietario del mismo.

Autores:
Javier Mª. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210

- Sector usuario. Los usuarios de los sistemas GNSS emplean receptores específicos capaces de observar las señales emitidas desde los satélites.

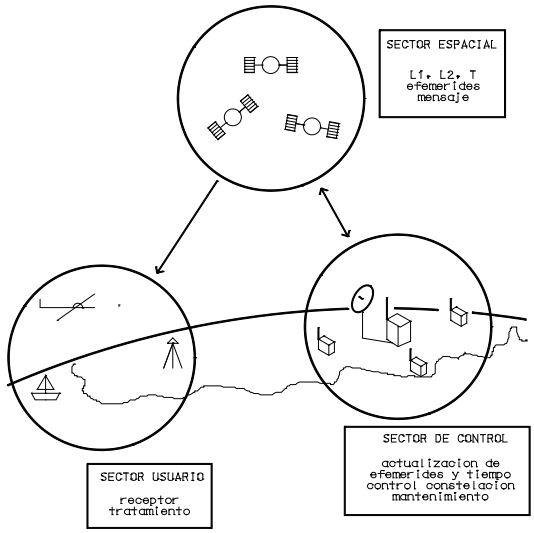


Ilustración 1.- Componentes de un sistema GNSS: sectores espaciales, control y usuario.

En relación al sector espacial, indicar que en la actualidad existen distintas constelaciones de satélites funcionales, resumiéndose en la tabla siguiente las principales operativas en la actualidad.

Sistema posicionamiento	Soportado por	Cobertura	Funcional
GPS	DoD de EEUU, origen militar	Global	Si, 24 de 24(30)
GLONASS	URSS, origen militar	Global	Si, 24 de 24(29)
Galileo	ESA, UE, origen civil.	Global	Parcialmente, 4 de 24(30)
Compas (Beidou)	China	Global, (parcial)	Parcialmente, 15 de 30+5
IRNSS	India, origen civil	Regional	--
QZSS	Japón, origen civil	Regional	---

Tabla 1.- Principales constelaciones existentes actualmente.

1.2 Modelización precisa del tiempo.

Una de las claves de los sistemas GNSS está en el control preciso del tiempo, tanto en el sector espacial como en el sector usuario, confiando el posicionamiento de cualquier receptor GPS en la determinación del tiempo de tránsito de un código emitido desde el satélite y recibido en el receptor. El producto del tiempo de viaje del código por la velocidad de la onda proporciona la distancia existente entre cada satélite y el receptor, constituyendo un observable básico.

El patrón de tiempo que emplea el sistema GPS usa osciladores atómicos, con una estabilidad ultra precisa (escala de tiempo UTC). La variación de frecuencia diaria (df/f) de los osciladores atómicos empleados en los satélites es mejor de 10^{-13} para los osciladores de cesio y de 10^{-15} para los de máser de hidrógeno. Observar que estas incertidumbres suponen que para una honda que viaje a la velocidad de la luz, se puede medir una distancia mejor de $3*10^{-5}$ m y $3*10^{-7}$ m, respectivamente.

Es importante destacar que los osciladores existentes en los receptores de los usuarios no tienen las precisiones anteriores, ya que usan osciladores de cuarzo, con una estabilidad diaria significativamente inferior, del orden de 10^{-9}.

Una observación importante. Para medir el tiempo de tránsito de una señal, los relojes en los dos extremos de la distancia medida tendrán que estar sincronizados, como sucede en la práctica habitual de la determinación de la distancia a la que se encuentra una tormenta, a modo de ejemplo. Esta imposibilidad potencial de sincronización entre los osciladores del sector espacial y del sector usuario constituye un aspecto clave que como se expondrá posteriormente es resuelto metodológicamente por los sistemas GNSS.

1.3 Modelización del movimiento perturbado de los satélites.

Otro aspecto clave es la necesidad de conocer con precisión, en la misma escala de tiempo del sistema, la posición de los satélites. La determinación de la posición espacial de un satélite a lo largo del tiempo se obtiene a partir de un conjunto de parámetros denominados efemérides, que se están recalculando continuamente por parte del sector de control, inyectándose cada 2 horas a los satélites, debido a la existencia de distintos tipos de fuerzas que actúan sobre el satélite alejándole de un movimiento teórico ideal.

Esta información se envía formando parte de un mensaje a los usuarios del sistema, pudiendo en consecuencia los receptores GNSS conocer la posición precisa de los satélites en la constelación.

Autores:
Javier Mª. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210

1.4 Efectos atmosféricos.

La onda portadora emitida por los satélites se ve influenciada al atravesar la atmósfera modificándose su velocidad de propagación, teniendo en consecuencia repercusión directa en la medida del tiempo de tránsito, y por tanto en el observable distancia.

El estudio de la influencia de la atmósfera se divide en las dos capas que la constituyen: la ionosfera (de 100 a 1000 kilómetros de altitud sobre la superficie terrestre) y la troposfera (la capa de 100 kilómetros de altitud más próxima a la tierra).

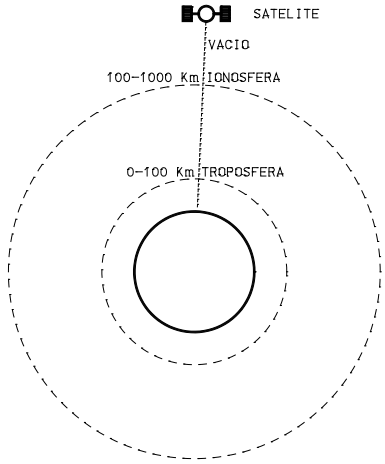


Ilustración 2.- Capas en las que se divide la atmósfera para su estudio.

El retraso causado por la ionosfera se puede parcialmente modelizar, enviándose los parámetros del modelo empleado a través de un mensaje a los usuarios. Sin embargo, las características de la ionosfera provocan retardos distintos según la frecuencia que atraviesa la misma, pudiéndose estimar el retardo causado sí se envían señales usando más de una frecuencia. Esta es una de las justificaciones por las cuales los sistemas GNSS envían información a los usuarios empleando dos o más frecuencias: posibilitar un posicionamiento preciso corregiendo uno de los errores de mayor magnitud.

El retraso causado por la troposfera se confía íntegramente al uso de modelos matemáticos que la modelizan.

1.5 Frecuencias usadas por los diferentes sistemas GNSS.

Además de la causa expuesta anteriormente, el envío de información empleando más de una frecuencia permite el posicionamiento preciso en periodos de observación más cortos que si solamente se utiliza una única frecuencia. A continuación se muestran las distintas frecuencias usadas por los distintos sistemas GNSS.

- Constelación GPS. L1(1575.42), L2(1227.6), L2C, L5(1176.45).
- Constelación Galileo. L1(1575.42), E5a(1176.14), E5b(1207.14), E6 (encriptada).
- Constelación GLONASS. L1 (1602.56-1615.5), L2(1246.43-1256.5).

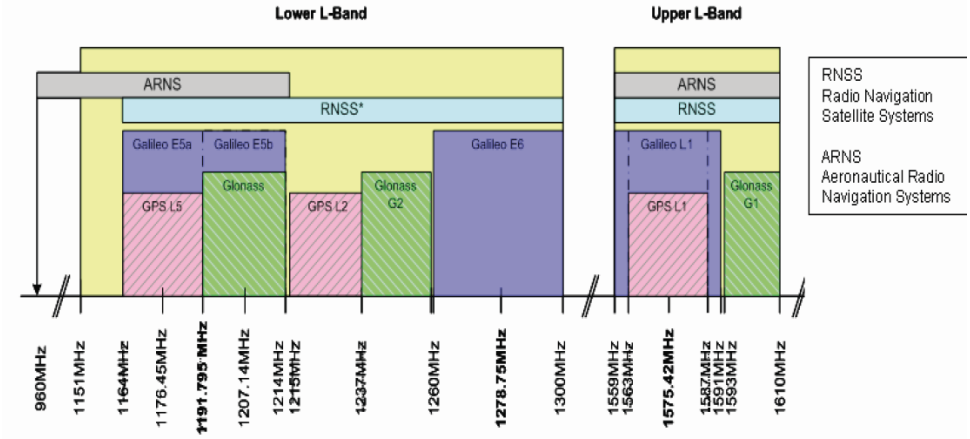


Ilustración 3.- Frecuencias utilizadas por los distintos sistemas satelitarios.

2 CONSTITUCIÓN Y OBSERVABLES DEL SISTEMA GPS.

2.1 Constitución del sistema.

El sistema GPS se diseña por el Departamento de Defensa Norteamericano con una finalidad básicamente militar, como un sistema de navegación capaz de proporcionar información tridimensional y tiempo de forma continua, 24 horas al día, para un móvil situado en cualquier posición de la superficie terrestre, en cualquier condición meteorológica. Navegación significa que el móvil para el que se calcula la posición puede estar en movimiento.

Desde el punto de vista del usuario, es un sistema pasivo: el sistema calcula automáticamente su posición sin necesidad de intervención alguna del mismo.

Desde su inicio, se ha permitido su empleo a usuarios civiles, restringiéndose actualmente la precisión que pueden obtener de forma absoluta en tiempo real a valores en torno a 5-10 m., en planimetría (95% confianza). Respecto al uso civil de una tecnología soportada por el control militar americano, se recomienda leer http://www.gps.gov/support/faq/#controlled.

La constelación utilizada por el sistema GPS consta de 24 satélites, distribuidos en 6 planos con una inclinación de 55º grados sobre el Ecuador. La altura de la órbita es aproximadamente de 20180 km, y tienen un periodo aproximado de doce horas sidéreas, es decir, cada satélite efectúa dos vueltas alrededor de la tierra cada día. Esta configuración asegura que cualquier usuario en la superficie de la tierra tiene garantizado al menos la recepción de señales desde 4 satélites, hasta un máximo de 11. Indicar que en la actualidad se está procediendo a la

modernización de los satélites de la constelación GPS, incorporándose en todos la tercera frecuencia L5, que por tanto no está totalmente funcional.

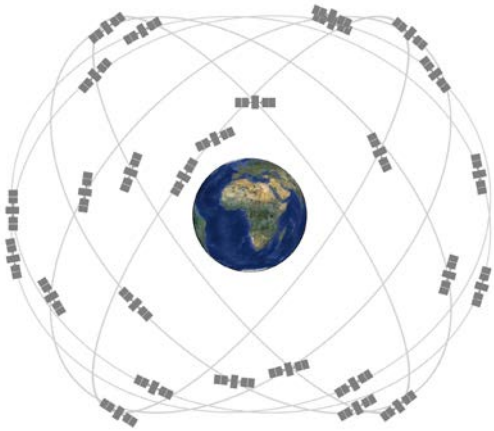


Ilustración 4.- Sector espacial de la constelación gps. (http://www.gps.gov/systems/gps/space/)

2.2 Estructura de la información emitida.

Cada satélite GPS, en base a la frecuencia fundamental de los osciladores atómicos embarcados en el mismo, procede a generar dos frecuencias en la banda L, denominadas L1 y L2 respectivamente, que constituyen la onda portadora de la información que se envía los usuarios.

En ambas frecuencias se procede a modular el envío del mensaje de navegación, que contiene datos precisos para el usuario, siendo los básicos los siguientes: efemérides precisas del satélite, datos para obtener posiciones aproximadas para el resto de los satélites, datos de los modelos ionosférico y troposférico para corrección de errores causados por la atmósfera y ofset de sincronización del reloj del satélite respecto a la escala de tiempo GPS.

Se modulan además también dos códigos:

- Código C/A, de estructura conocida y acceso libre, que permite el posicionamiento absoluto de cualquier receptor GPS.
- Código P, o preciso, de estructura encriptada, que posibilita al propietario del sistema conseguir la máxima precisión en tiempo real, por debajo de 1 metro.

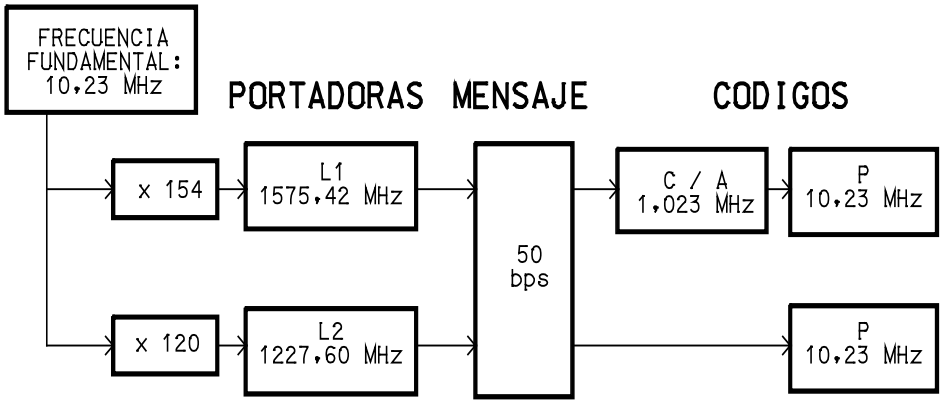


Ilustración 5.- Estructura de la información emitida por los satélites GPS.

El código C/A, constituido por una secuencia binaria única, permite al receptor del usuario identificar a cada satélite. Su carácter aparentemente aleatorio, justifica la denominación de este código como un ruido seudo-aleatorio (pseudo random noise, PRN), constituyendo el identificador de cada satélite. Tiene un periodo muy corto, un milisegundo, al que le corresponde una longitud de onda de unos 300 metros.

GPS C/A Code Assignments

SV PRN ID	G2 Phase Taps	First 10 Chips
1	2 & 6	1100100000
2	3 & 7	1110010000
3	4 & 8	1111001000
4	5 & 9	1111100100
5	1 & 9	1001011011

Ilustración 6.- Código C/A correspondiente a los cinco primeros satélites GPS.

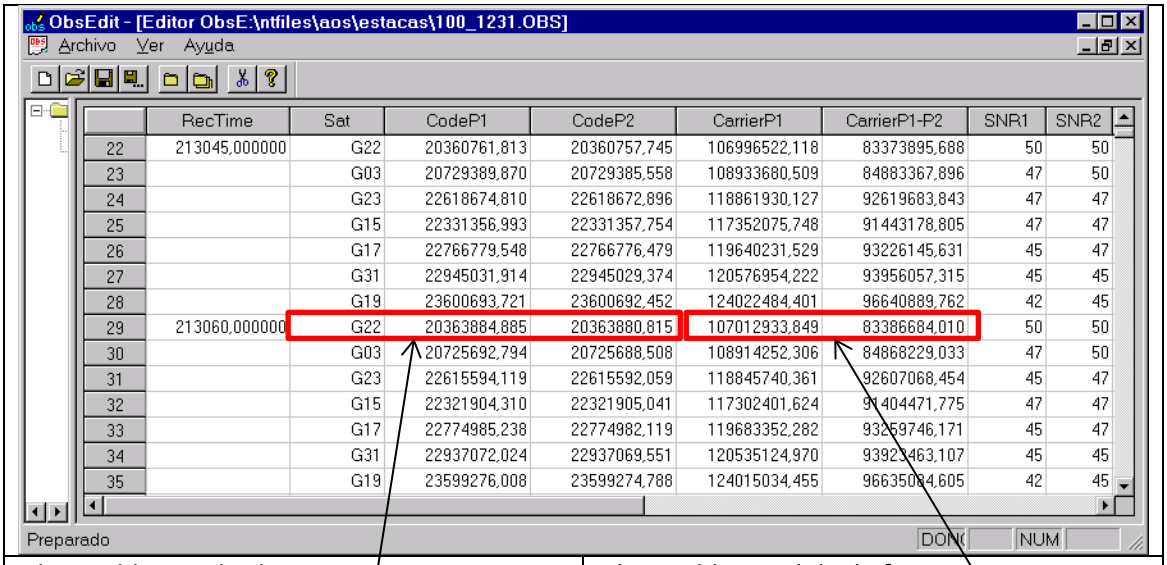
2.3 Observables del sistema GPS.

Al encender un usuario su receptor GPS, en función de sus prestaciones – receptor de una o dos frecuencias, y preparado para rastrear el código o código y fase-, procede a demodular la información emitida y recibida para todos los satélites visibles:

- Mensaje de navegación, obteniendo los datos indicados anteriormente. Los datos mínimos para obtener posición tardan 30 segundos en ser adquiridos.
- Determinación de la distancia, realmente denominada seudo-distancia, en base al código C/A, entre cada satélite visible y el receptor, con una frecuencia elevada, una vez por segundo o mejor.

- Los receptores más precisos además proceden a eliminar la información de las ondas portadoras y a efectuar el conteo continuo del número de ciclos desde el satélite y recibidos, también de forma continua, en el receptor. A este observable se le denomina medida de fase

A continuación se muestra un ejemplo de la información observada para un cierto receptor de prestaciones geodésicas que observa datos en las portadoras L1 y L2, tanto en código como en fase.



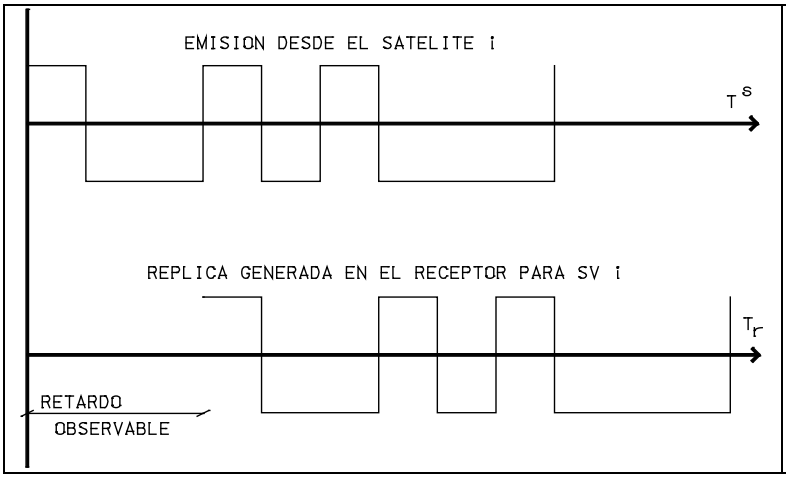
	RecTime	Sat	CodeP1	CodeP2	CarrierP1	CarrierP1-P2	SNR1	SNR2
22	213045,000000	G22	20360761,813	20360757,745	106996522,118	83373895,688	50	50
23		G03	20729389,870	20729385,558	108933680,509	84883367,896	47	50
24		G23	22618674,810	22618672,896	118861930,127	92619683,843	47	47
25		G15	22331356,993	22331357,754	117352075,748	91443178,805	47	47
26		G17	22766779,548	22766776,479	119640231,529	93226145,631	45	47
27		G31	22945031,914	22945029,374	120576954,222	93956057,315	45	45
28		G19	23600693,721	23600692,452	124022484,401	96640889,762	42	45
29	213060,000000	G22	20363884,885	20363880,815	107012933,849	83386684,010	50	50
30		G03	20725692,794	20725688,508	108914252,306	84868229,033	47	50
31		G23	22615594,119	22615592,059	118845740,361	92607068,454	45	47
32		G15	22321904,310	22321905,041	117302401,624	91404471,775	47	47
33		G17	22774985,238	22774982,119	119683352,282	93259746,171	45	47
34		G31	22937072,024	22937069,551	120535124,970	93923463,107	45	45
35		G19	23599276,008	23599274,788	124015034,455	96635084,605	42	45

Observable: seudo-distancia. Significado: «distancia» sv22 al rv, , metros. Obtenida: correlación código C/A en L1, código P en L1,L2 Permite: solución autónoma posición. Precisión: métrica.	Observable: Medida de fase. Significado: variación desde inicio observación sv22 al rv, ciclos. Obtenida: desde portadora Permite: solución diferencial precisa Precisión: hasta mm

Ilustración 7.- Datos observados por un receptor GPS.

Todo receptor GPS debe ser capaz de obtener el observable seudo distancia, pues es el utilizado para la obtención de la posición autónoma o aislada (posicionamiento SPS). La determinación de esta distancia se efectúa como se indica a continuación: el receptor, en base a su propio reloj – que no está sincronizado con el sistema de tiempo GPS debido a que no tiene la precisión suficiente-, identifica al satélite del que está recibiendo el código por la estructura del mismo, extrae el tiempo en el cuál ha sido emitido en el satélite – etiquetado con el reloj del satélite – y determina el tiempo de tránsito de la señal como la diferencia entre

el instante en el cual el receptor lo ha recibido y el instante en el cuál ha sido emitido. Multiplicando este tiempo por la velocidad de la luz se obtiene la pseudo distancia.



Determinación de la seudodistancia:

$$pd_{re}^{SV} = c * (t_{re} - t^{SV})$$

Ilustración 8.- Obtención de la seudodistancia.

Es fundamental destacar que existen tres escalas de tiempo que se están empleando en la expresión de la seudodistancia:

- El patrón del sistema, definido por la escala de tiempo GPS.
- El tiempo atómico de cada satélite GPS, que estará desfasado respecto a la escala del sistema por una cantidad conocida, que se envía en el mensaje de navegación.
- La escala de tiempo del oscilador del receptor de cada usuario, que debido a su falta de precisión, es imposible de sincronizar con la escala de tiempo del sistema.

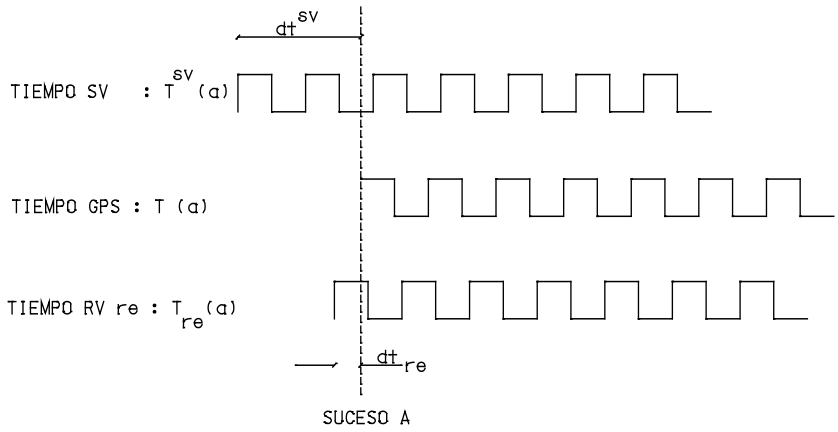


Ilustración 9.- Escalas de tiempo en la obtención de la seudodistancia.

Autores:
Javier Mª. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210

2.4 Posicionamiento básico: posición autónoma en tiempo real.

Como se ha indicado, todo receptor GPS es capaz de obtener automáticamente su posición en base a la observación de la seudodistancia a varios satélites de forma simultánea, si además se cumplen ciertas condiciones de observación que se detallarán con posterioridad.

Para cada época de observación, el receptor ha registrado la seudodistancia a cada satélite. La ecuación anterior se puede expresar como se indica a continuación, en la que se ha procedido a normalizar el tiempo medido en el satélite y en el receptor a la escala de tiempo GPS, y a incorporar además los principales errores en la determinación de la distancia.

$$[(t^{sv} + dt^{sv}) - (t_{rv} + dt_{rv})] . c = d_{rv}{}^{sv} + I + T + Rel + e$$

Variables conocidas:	Variables incógnitas:
• Conocido: t^{sv}, dt^{sv}, $(X,Y,Z)^{sv}$ - en la $d_{rv}{}^{sv}$ – • Medido: t_{rv} • Estimado o medido: error ionosférico (I), error troposférico (T), Relatividad (Rel). • Otros errores: e (multipath, otros)	• dt_{rv}, $(X,Y,Z)_{rv}$ - en la $d_{rv}{}^{sv}$ -

Ilustración 10.- Balance de datos e incógnitas en la distancia entre el satélite (sv) y el receptor (rv).

Despejando en la ecuación anterior la seudodistancia, y moviendo a la izquierda de la misma los términos conocidos, se tiene la siguiente expresión.

$$\text{Si } pd_{re}{}^{sv} = c * (t_{re} - t^{sv}) \Rightarrow pd_{re}{}^{sv} - c.dt^{sv} - I - T - e = d_{rv}{}^{sv} - dt_{rv}.c$$

Por tanto, en la observación por parte del receptor de los datos recibidos para 1 satélite, en cada época de observación existen 4 incógnitas: (X_{rv},Y_{rv},Z_{rv}), dt_{rv}. Recordar que se permite el movimiento del receptor. En consecuencia, para poder obtener posición en una época, el receptor debe observar un mínimo de señales de 4 satélites. En principio, si se observan datos de más satélites visibles, se tiene una solución redundante que puede mejorar la misma.

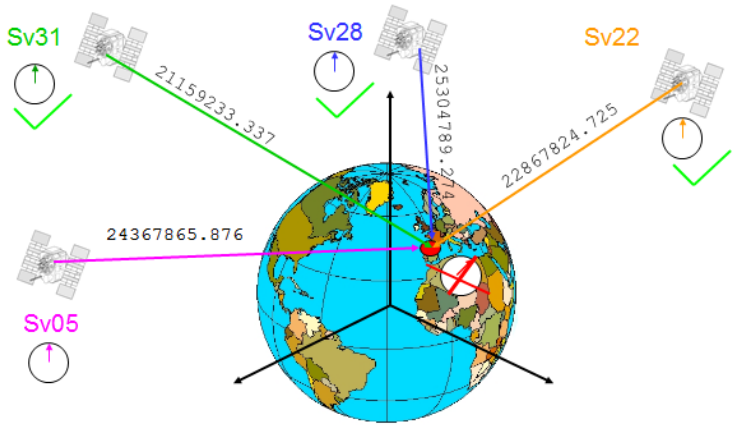


Ilustración 11.- Número mínimo de satélites para poder obtener una posición autónoma (SPS).

Un mínimo de satélites es una condición necesaria para la obtención de posición pero no suficiente. Pero además su distribución espacial en el horizonte del receptor del usuario debe ser lo más amplia posible, de manera que la geometría de las posiciones de los satélites sea tan fuerte que la repercusión de los errores en la medida del observable distancia en la determinación de la posición sea mínima. El sistema proporciona parámetros que cuantifican la fortaleza de la geometría de la constelación visible de los satélites para la determinación de los distintos observables del sistema, denominados de forma genérica factores DOP (Dilution Of precisión): GDOP (geometría), PDOP (posición 3D), HDOP (posición planimetría), VDOP (posición en altimetría) y TDOP (obtención del tiempo). Se considera que la influencia de la geometría es aceptable si el valor del GDOP-PDOD es inferior a 8.

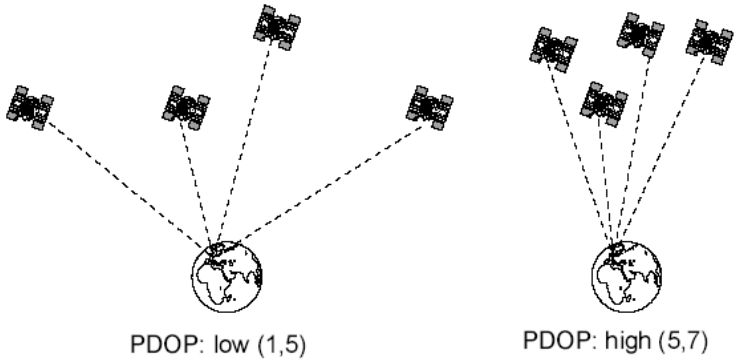


Ilustración 12.- Influencia en la determinación de la posición de la geometría de los satélites. Factores DOP.

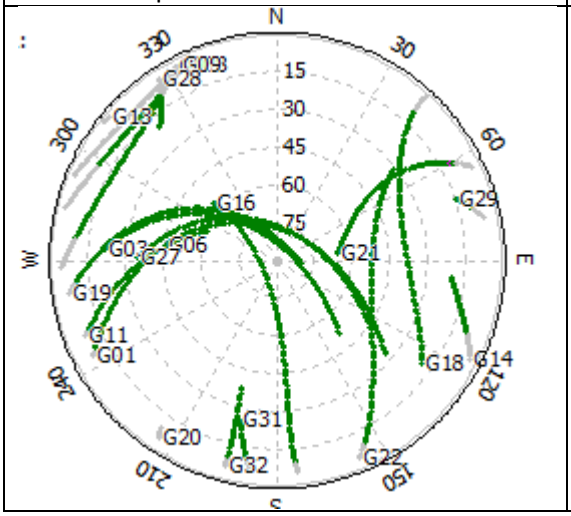
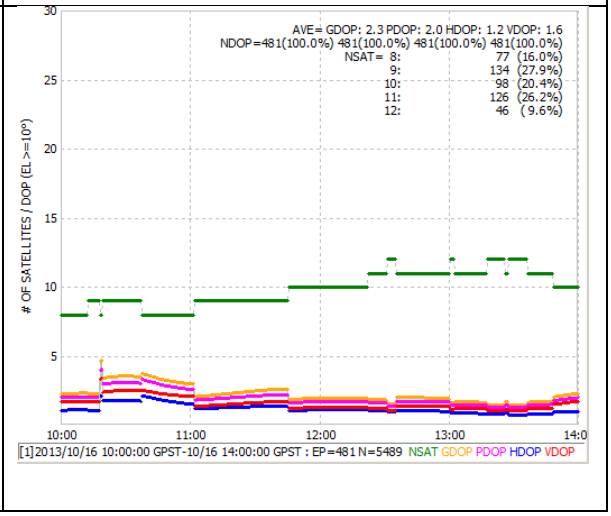
Finalmente indicar que al precisarse decodificar una señal digital, la calidad de esta deberá ser suficientemente buena. Esta última circunstancia se cuantifica en la relación señal / ruido de la información recibida en el receptor.

Autores:
Javier Mª. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210

Por tanto, para que cualquier receptor GPS sea capaz de obtener su posición deberán verificarse simultáneamente las tres condiciones enumeradas: número suficiente de satélites, geometría adecuada en la posición de los mismos y una relación señal-ruido suficiente. Si se cumplen simultáneamente las tres condiciones anteriores, el receptor es capaz de determinar la posición del usuario.

Si no se cumple alguna de las condiciones anteriores, la determinación de la posición es imposible o proporciona una posición errónea. Habitualmente, el número de satélites en el horizonte local de un usuario en la franja de cobertura típica de la constelación es siempre superior a 6, de manera que el incumplimiento de alguna de las condiciones anteriores es debido a la ubicación del usuario en una posición que o bien no tiene una visibilidad del cielo suficientemente amplia, o a la coincidencia de observar en un periodo en el que la constelación visible tiene una geometría débil, o a que la recepción de las señales es de baja calidad; o bien alguna combinación de las causas anteriores.

La única solución que tiene el usuario consiste en cambiar la posición que desea determinar por otra con condiciones de observación favorables. Si precisase observar una posición en un entorno muy desfavorable, deberá planificar en que intervalo temporal se dispone de suficientes satélites con geometría adecuada.

Mapa de visibilidad de los sv	Planificación del DOP
	

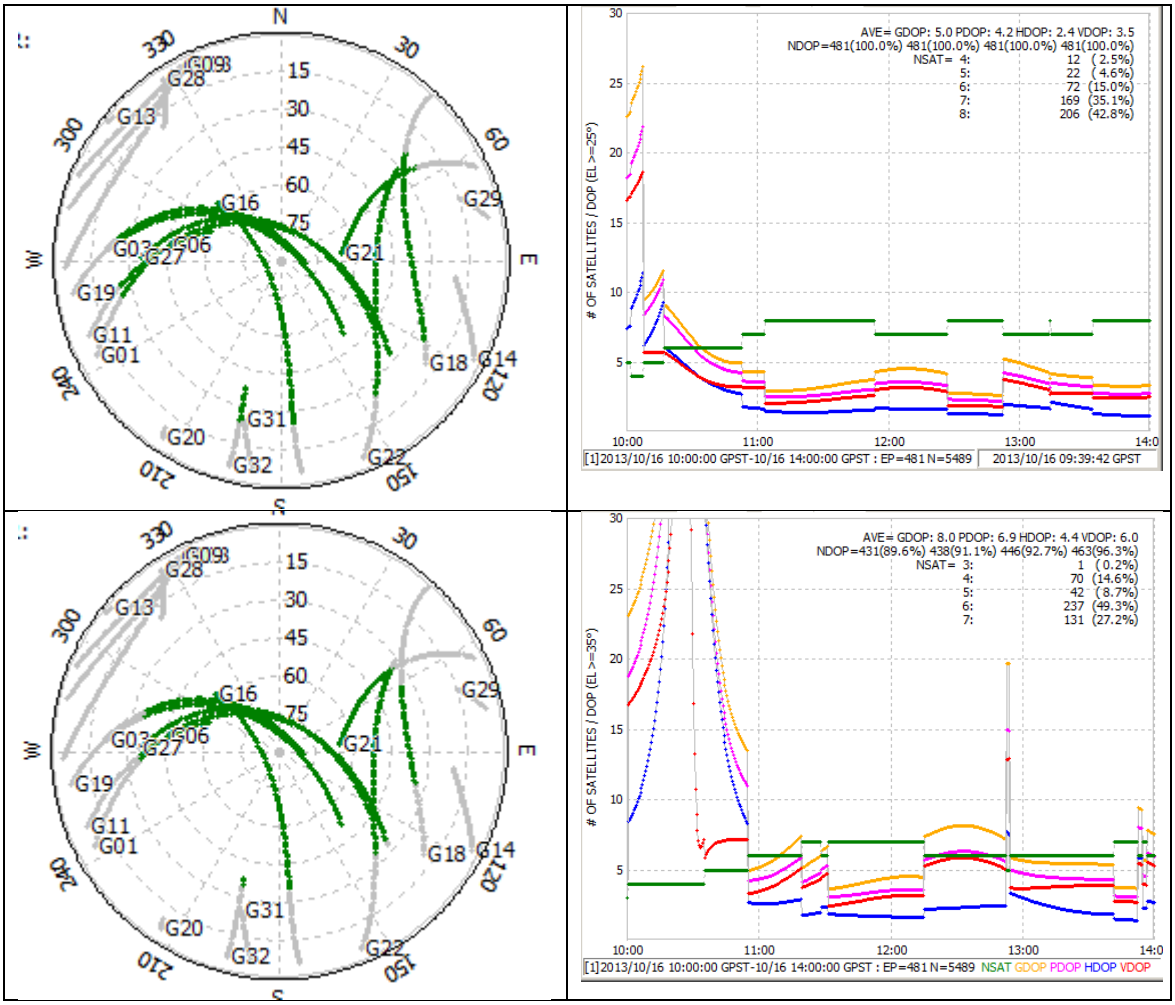


Ilustración 13.- Influencia de la reducción del cielo visible en el PDOP. Máscara de elevación a 10º, 25º y 35º.
(Datos observados por un receptor en Villacarriedo, Cantabria, el día 16-Nov-2013, entre las 10:00 y las 14:00 UTC)

Otro error característico en la determinación de la posición asociado al entorno de observación está causado por la recepción en el equipo de señales rebotadas en objetos próximos a la antena GPS, obteniéndose en consecuencia observaciones erróneas. Este efecto se denomina multipath o multicamino.

En un entorno adecuado, con un receptor de tipo geodésico, la precisión que se puede alcanzar está en torno a 2 metros en planimetría, si bien en condiciones reales fácilmente esta precisión puede elevarse hasta valores torno a 5-10 m. e incluso mayores.

Autores:
Javier Mª. Sánchez Espeso, Raúl Pereda García. v20130210

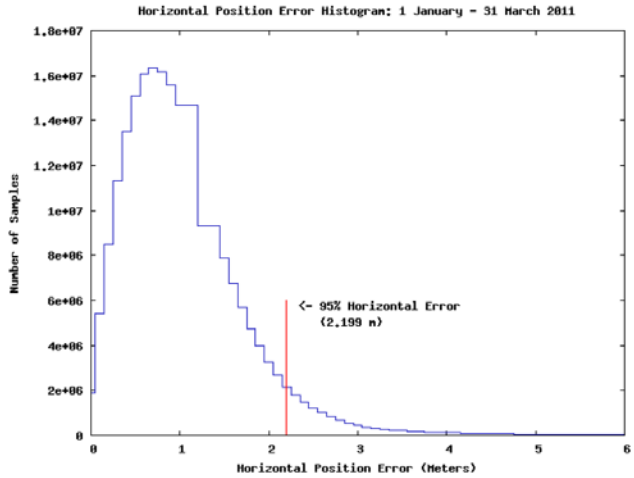


Ilustración 14.- Precisión en el posicionamiento absoluto tiempo real (http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/).

2.5 Posicionamiento preciso: métodos diferenciales o relativos.

Si un usuario requiere mayor precisión de la que proporciona el sistema de forma estándar (SPS) necesita obligatoriamente proceder a utilizar algún método diferencial, que involucra la observación simultánea empleando dos receptores GPS. Un receptor, habitualmente denominado fijo o referencia, se ubicará durante el periodo de observación en una posición de coordenadas conocidas en el sistema GPS. El segundo receptor, habitualmente denominado móvil, se ubicará en aquellas posiciones para las que queremos determinar sus coordenadas de forma precisa.

Los métodos diferenciales calculan el incremento de coordenadas relativo entre el móvil y el fijo, habitualmente denominada línea base o baseline, aprovechando que al estar situados los receptores muy próximos en relación a la distancia la que están los satélites, los errores del sistema en ambos equipos serán muy parecidos, cancelándose o reduciéndose significativamente al determinar la posición relativa entre los mismos. Típicamente, los métodos diferenciales pueden llegar a precisiones submétricas cuando se emplean observaciones de código, y centimétricas al utilizar las observaciones de fase de la portadora, en función de la metodología empleada.

Con el fín de disponer de observaciones redundantes que permitan la resolución de las incógnitas los métodos diferenciales exigen períodos de observación tanto mayores cuanto mayor sea la distancia entre el receptor fijo y el receptor móvil. Determinaciones precisas para

líneas base de centenares de kilómetros suelen exigir observaciones continuas de hasta una semana de datos.

2.6 Sistema de referencia empleado por el sistema GPS.

El sistema de referencia en el que se determina la posición y tiempo para los receptores de los usuarios es lógicamente el mismo en el que están definidas las posiciones de los satélites GPS.

Las efemérides de los satélites determinan su posición tridimensional referida a un elipsoide, denominado World Geodetic System 1984, abreviadamente WGS84. En consecuencia la posición calculada por cualquier receptor GPS se concreta en una posición sobre el elipsoide (latitud, longitud), altura elipsoidal (h) y tiempo en el sistema GPS (UTC).

¿Qué conversión precisa hacer un usuario actualmente? Planimétricamente, la definición del sistema ETRS89 es coincidente con WGS84, a efectos prácticos, por lo que no será necesaria transformación alguna. Tan sólo cada usuario necesitará fijar la proyección oficial que corresponda a su ámbito de trabajo, que viene fijada en la proyección UTM por el huso y hemisferio concreto en el que se encuentre.

Altimétrica mente, necesitará utilizar un modelo de Geoide que le proporcione el desnivel existente la superficie de referencia altimétrica utilizada – NMMA, en España – y el elipsoide WGS84, transformando en consecuencia la altura elipsoidal en WGS84 a altitud referida al NMMA.

3 METODOLOGÍAS DE POSICIONAMIENTO.

Existen diferentes metodologías de posicionamiento empleando técnicas GPS, en función de diferentes aspectos que se concretan a continuación.

Necesidad o posibilidad de observación	Posibilidades	Técnicas a emplear
Número de rv usados	a) Un rv. b) Dos o más rv.	a) Posicionamiento absoluto b) Posicionamiento relativo.
Capacidad tecnológica de los rv usados	a) Código, o código y fase de la portadora. b) En equipos con fase: L1 o L1-L2. c) Observaciones de las constelaciones GPS o GPS-GLONASS.	a) Posicionamiento con código, o con fase. b) Equipos monofrecuencia, o bifrecuencia. c) Equipos GPS, o GPS-GLONASS.
Tiempo en el que se desea obtener la posición del móvil	a) Posteriormente al momento de la	a) Metodologías en postproceso, o gabinete.

	observación b) En el mismo instante de la observación	b) Metodologías en tiempo real.
Situación del móvil durante la observación	a) Quieto. b) En movimiento.	a) Métodos estáticos. b) Métodos cinemáticos

Ilustración 15.- Parámetros que definen las diferentes metodologías GNSS.

Las principales metodologías en la actualidad son las que se presentan en la figura siguiente. Se ha destacado las que se considera tienen una aplicación cotidiana en el ámbito de la ingeniería civil.

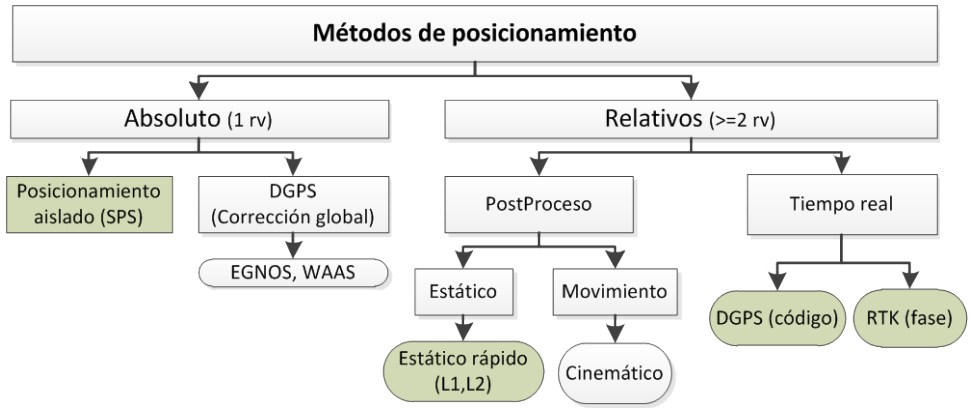


Ilustración 16.- Principales metodologías GNSS.

Con receptores de tipo GIS o topográfico – geodésicos, las precisiones esperadas para las distintas metodologías se presentan en la tabla siguiente. Se proporciona un valor típico en la determinación de la posición planimétrica, en altimetría se deberá estimar una incertidumbre aproximadamente el doble.

	Medida Fase						Medida de código				
Absoluto									Posicionamiento aislado (SPS)		
Relativo o diferencial							Diferencial código				
		Cinemático RTK (*)									
		Estático rápido (*)									
	1mm	5mm	1cm	5cm	10cm	20cm	50cm	1m	2m	5m	10m
	incertidumbre horizontal										

Ilustración 17.- Incertidumbre de las metodologías GNSS más utilizadas.

Las metodologías relativas incluyen un término de error proporcional a la distancia medida. A continuación se presentan las especificaciones para un equipo de gama alta, de tipo topográfico – geodésico.

Constelaciones	• GPS: L1, L2, L2C, L5 • GLONASS: L1, L2 • BeiDou: B1, B2 • Galileo: E1, E5a, E5b, Alt-BOC • SBAS: WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS, QZSS
Precisión	

Accuracy (rms) Code differential with DGPS / RTCM[1]	
DGPS / RTCM	Typically 25 cm (rms)
Accuracy (rms) with Real-Time-Kinematic (RTK)[1]	
Standard of compliance	Compliance with ISO17123-8
Single Baseline (<30 km)	Horizontal: 8 mm + 1 ppm (rms) Vertical: 15 mm + 1 ppm (rms)
Network RTK	Horizontal: 8 mm + 0.5 ppm (rms) Vertical: 15 mm + 0.5 ppm (rms)
Accuracy (rms) with Post Processing[1]	
Static (phase) with long observations	Horizontal: 3 mm + 0.1 ppm (rms) Vertical: 3.5 mm + 0.4 ppm (rms)
Static and rapid static (phase)	Horizontal: 3 mm + 0.5 ppm (rms) / Vertical: 5 mm + 0.5 ppm (rms)
Kinematic (phase)	Horizontal: 8 mm + 1 ppm (rms) / Vertical: 15 mm + 1 ppm (rms)
On the Fly (OTF) Initialization	
RTK technology	Leica SmartCheck technology
Reliability of OTF initialization	Better than 99,99%[1]
Time for initalization	Typically 4 sec[2]
OTF range	up to 70 km[2]
Network RTK	
NetWork technology	Leica SmartRTK technology
Supported RTK network solutions	VRS, FKP, iMAX
Supported RTK network standards	MAC (Master Auxiliary Concept) approved by RTCM SC 104

Ilustración 18.- Especificaciones receptor GNSS Leica Geosystems, modelo GS25 (http://www.leica-geosystems.com)

En los siguientes apartados se procede a describir las metodologías presentadas.

3.1 Estático rápido.

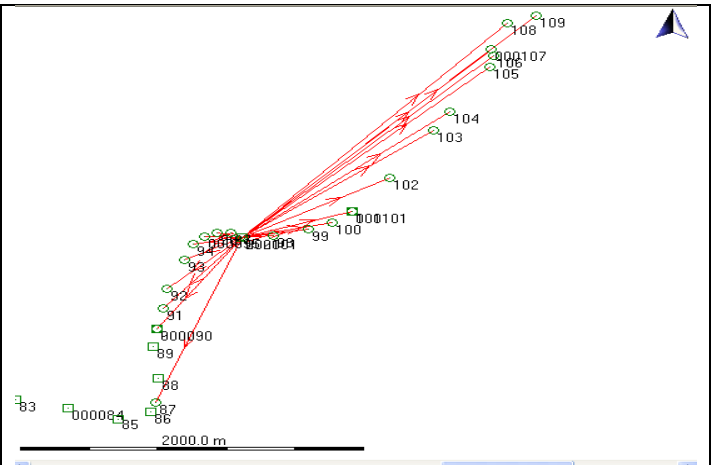
Esta metodología supone el uso de 2 o más receptores que no varían su posición durante el intervalo de observación, procediéndose al cálculo de las líneas base entre los distintos equipos en postproceso.

Es la metodología más precisa, habitualmente utilizada para la observación de líneas base muy largas o cuando se necesite la máxima precisión. Para el rango de distancias habituales en ingeniería, inferiores a cinco kilómetros, es habitual observar períodos de quince minutos registrando observaciones cada quince segundos. Para líneas base de varias decenas de kilómetros, se suelen emplear intervalos de observación de varias horas. La precisión que se puede obtener en planimetría suele ser, con receptores adecuados, de 5 mm + 1ppm.

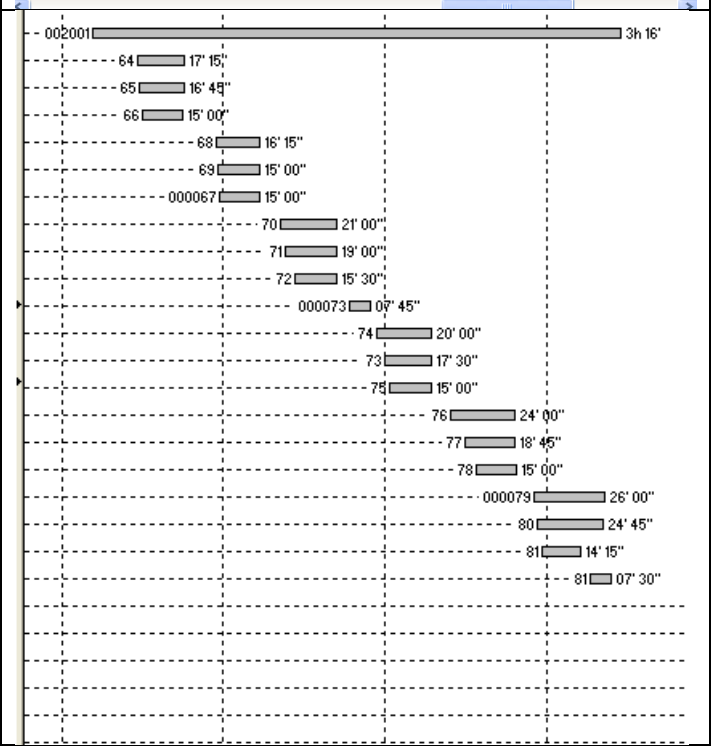
Como usos característicos se deben considerar: control geodésico de redes, observación de redes a nivel nacional continental, o control de deformación en estructuras.

A continuación se describe un ejemplo del uso de esta metodología para la observación de una red topográfica para el control de la mejora del trazado de una carretera en el municipio de Valderredible, Cantabria. En concreto los trabajos efectuados en media jornada de trabajo.

Se está trabajando con 4 equipos, tres móviles que se mueven de forma coordinada y un receptor fijo.
En el gráfico se observan las líneas base calculadas en postproceso entre el fijo y cada una de las posiciones de los móviles.



En esta figura se muestra el periodo común de observaciones en cada línea observada. El receptor fijo, se ha ubicado en una posición denominada 2001, y ha estado observando permanentemente 3h16'.
En la primera sesión de observación se han observado tres posiciones con tres equipos móviles, denominadas respectivamente 64, 65 y 66, durante más de 15'.
Se han observado 5 sesiones más de observación, en la jornada de trabajo que se muestra.



El resultado del cálculo para una cierta línea base, en la figura se muestra la 2001->64, es el incremento de coordenadas geocéntricas cartesianas en el sistema de referencia GPS, en concreto los valores proporcionados para los campos dx,dy,dz.
Como se observa, la precisión estimada para dicha línea base es de orden milimétrico (campos Q posic. para la planimetría y Q Alt para la altitud).

Propiedad	Valor
Id Referencia	002001
Id Móvil	64
Guardado	No
Estado ambigüedades	sí
Tipo GNSS	GPS
Inicio	06/29/2001 14:28:17
Fin	06/29/2001 14:45:17
Duración	17' 00"
Tipo	Estático
Tipo de solución	Fase: todo fijo
Frecuencia	L1 + L2
dX	1347.8413
dY	-3714.5573
dZ	-1708.0468
Q Posic.	0.0010
Q Alt.	0.0020
Pos. + Q Alt.	0.0023
Distancia geométrica	4304.8851
Desv. Est. dist. geométrica	0.0006
Alt. Ant. Ref.	1.5280
Alt. Ant. Móvil	1.2800
Desv. Est. X	0.0015
Desv. Est. Y	0.0006
Desv. Est. Z	0.0015

Ilustración 19.- Ejemplo de cálculo de una línea base en un estático rápido.

3.2 Tiempo real: enlace convencional usando un radio enlace.

En las metodologías relativas en tiempo real, el usuario quiere obtener la posición del receptor móvil en el mismo instante en el que se efectúa la observación. El receptor móvil a su vez puede estar estático o en movimiento. Para poder calcular la línea base, el receptor del usuario debe recibir en tiempo real los datos observados en la referencia. Clásicamente el envío de información desde el fijo al móvil se ha realizado utilizando un radio enlace.

Si el observable utilizado es el código, la metodología se denomina diferencial (DGPS), y típicamente obtiene precisiones submétricas, en torno a 50 cm.

Si los receptores utilizados para observar la línea base siguen tanto el código como la fase de la portadora, la metodología de cálculo se denomina cinemático en tiempo real, o como habitualmente se denomina, RTK (Real Time Kinematic). Las precisiones típicas que se pueden llegar a tener son de orden centimétrico. Estas metodologías utilizan algoritmos muy especiales que permiten resolver la línea base con muy pocas observaciones, de hecho con frecuencias de 1 Hz – una posición por segundo-.

Aplicaciones características de esta metodología: toma de perfiles transversales, levantamientos de franjas de carreteras para formar modelos digitales de terreno o ejecución de replanteos, entre otros. Sin lugar a dudas, en Ingeniería Civil esta metodología es la más utilizada, ya que proporciona precisiones suficientes para muchas de las fases de los trabajos habituales, obteniendo además las posiciones en tiempo real y siendo razonablemente cómoda

de ejecutar. Requiere, eso sí, que un usuario para obtener posiciones con 1 equipo móvil debe poseer otro equipo de referencia, que además debe configurar adecuadamente en cada sesión de observación. Además, el ámbito de actuación queda restringido al alcance del radio enlace entre la referencia y el móvil.

3.3 Tiempo real: uso de las redes activas GNSS.

El gran interés generado por el uso de las metodologías relativas en tiempo real, unido al hito tecnológico de poder utilizar internet como medio de transporte de las correcciones diferenciales, justifica el interés de organismos públicos y empresas en ofrecer servicios de correcciones GNSS, materializando la instalación de redes de receptores de referencia fijos que ofrezcan sus datos a múltiples usuarios móviles que lo requieran, constituyendo de hecho auténticas infraestructuras topográfico geodésicas:

- Las Administraciones públicas, con motivo del cambio del sistema de referencia oficial desde ED50 hasta ETRS89, ofrecen con estas redes activas de referencia el acceso al nuevo sistema de referencia, garantizando su uso correcto, e incorporando este servicio como un producto más en sus infraestructuras de datos espaciales.
- Empresas privadas de ámbito geoespacial lo desarrollan como una oportunidad de negocio.

Esencialmente, una red activa de estaciones de referencia GNSS está constituida por dos componentes fundamentales:

- Sector de control. Recibe, en tiempo real, las observaciones GPS y GLONASS de equipos distribuidos en un ámbito geográfico determinado. Estas observaciones se procesan, y se emplean para generar datos que se ofrecen en tiempo real a través de internet, generalmente sin coste en la actualidad.
- Sector usuario. Los usuarios, que utilizan 1 único receptor, acceden a través de internet a las correcciones que precisan para efectuar metodologías bien en tiempo real (DGPS, RTK), bien en postproceso (estático).

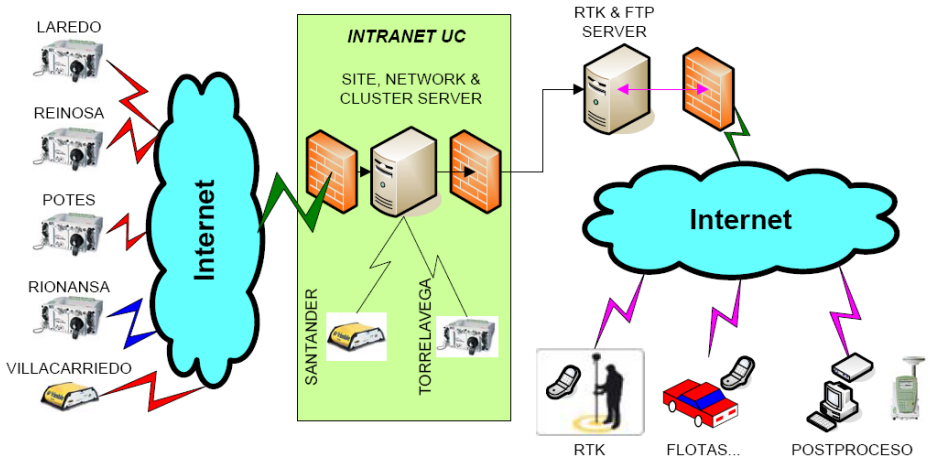


Ilustración 20.- Esquema conceptual de la red activa GNSS de Cantabria.

Existe un amplio desarrollo de este tipo de infraestructuras como se puede observar en la tabla adjunta, en la que se presenta un listado de las redes de referencia activas actualmente existentes en España.

Denominación de la red	Ámbito, propiedad	URL (Accedida 1-05-2014)
Red GNSS Cantabria	Autonómico, CCAA	http://www.gnss.unican.es/
Red GNSS Castilla y León	Autonómico, CCAA	http://gnss.itacyl.es/
Red de Estaciones de Referencia GNSS de Euskadi	Autonómico, CCAA	http://www.gps2.euskadi.net/
Red de Guipúzcoa	Autonómico, CCAA	http://b5m.gipuzkoa.net/web5000/es/geodesia/red-gnss/
Red GNSS Activa del Principado de Asturias	Autonómico, CCAA	http://rgapa.cartografia.asturias.es/
Red de Geodesia Activa de Navarra	Autonómico, CCAA	http://www.navarra.es/appsext/rgan/default.aspx
Red GNSS Valencia	Autonómico, CCAA	http://icverva.icv.gva.es:8080/
Red de estaciones permanentes GNSS - La Rioja	Autonómico, CCAA	http://www.iderioja.larioja.org/index.php?id=20&lang=es
Red GNSS Murcia	Autonómico, CCAA	http://cartomur.imida.es/regam/index.htm
Red de Cataluña	Autonómico, CCAA	http://catnet-ip.icc.cat/
Red de Geodésia Activa de Aragón	Autonómico, CCAA	http://gnss.aragon.es/
Red Andaluza de Posicionamiento	Autonómico, CCAA	http://www.ideandalucia.es/portal/web/portal-posicionamiento

SmartNet Spain	Estatal Comercial, Leica GeoSystems	http://es.smartnet-eu.com/
GalNet	Autonomía, Comercial (Topcon)	http://www.topcadingenieria.com/index.php/investigacion-desarrollo-uav/red-gnss-galnet

Ilustración 21.- Catálogo de redes activas GNSS en España.

Los productos que ofrecen estas redes se resumen en la figura siguiente.

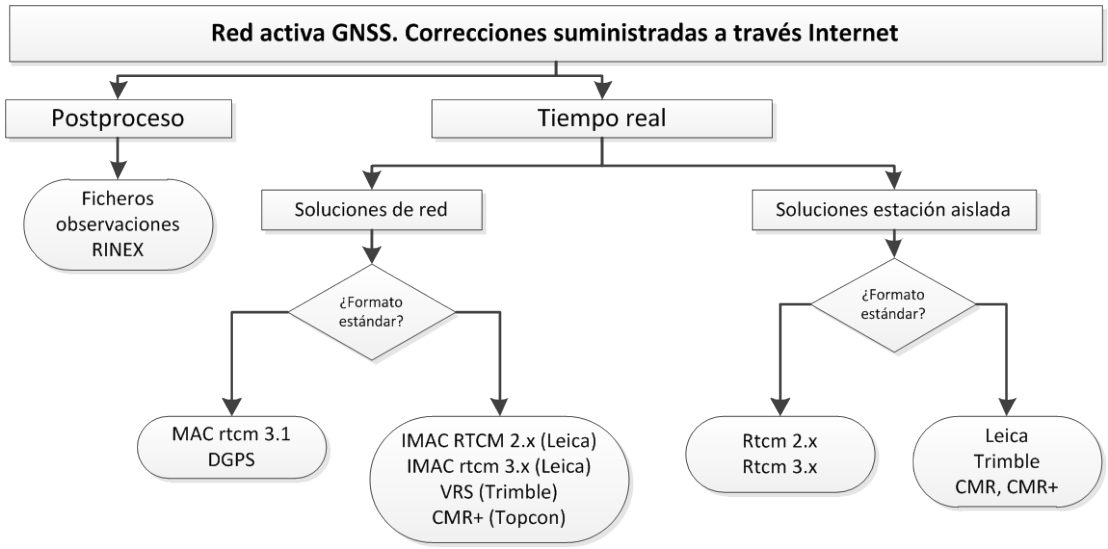
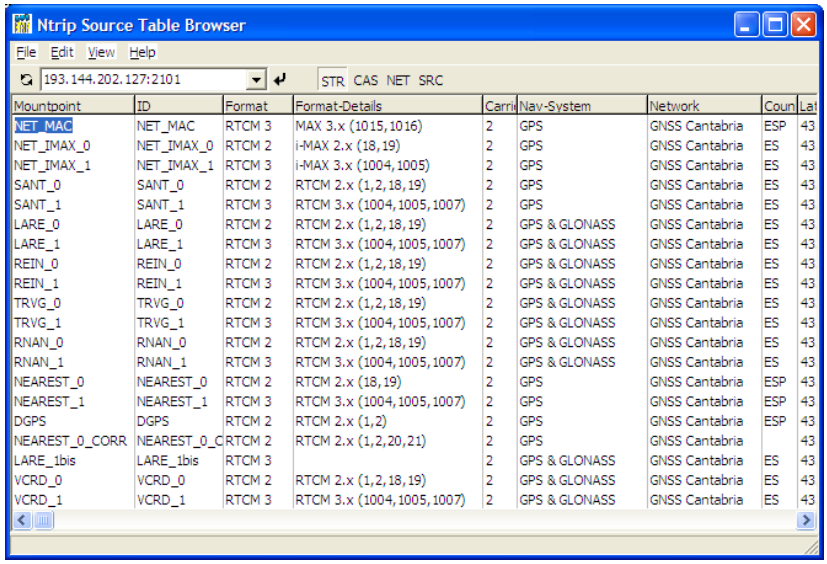


Ilustración 22.- Productos ofrecidos por las redes GNSS.

Como se puede observar, se ofrecen dos grandes categorías de productos: productos para postproceso, que consisten en ficheros en formato standard de observaciones registrados en alguna estación de referencia de la red, o correcciones para alguna metodología relativa en tiempo real.

A su vez, las correcciones en tiempo real se dividen en dos grandes categorías: correcciones que tienen en cuenta la totalidad de los receptores fijos que se están observando, modelándose los errores ionosféricos en la zona de trabajo y permitiéndose la resolución de la posición para un receptor móvil más alejado de una estación de referencia de la que permite la metodología RTK, denominadas soluciones de red; o correcciones procedentes de observaciones directamente registradas por alguna estación de referencia en particular, denominadas soluciones de estación aislada.



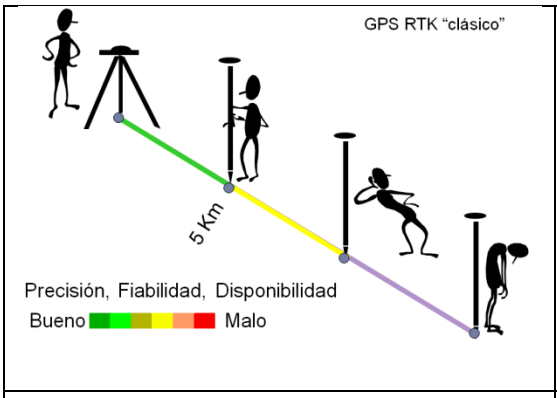
Mountpoint	ID	Format	Format-Details	Carri	Nav-System	Network	Coun	Lat
NET_MAC	NET_MAC	RTCM 3	MAX 3.x (1015,1016)	2	GPS	GNSS Cantabria	ESP	43
NET_IMAX_0	NET_IMAX_0	RTCM 2	i-MAX 2.x (18,19)	2	GPS	GNSS Cantabria	ES	43
NET_IMAX_1	NET_IMAX_1	RTCM 3	i-MAX 3.x (1004,1005)	2	GPS	GNSS Cantabria	ES	43
SANT_0	SANT_0	RTCM 2	RTCM 2.x (1,2,18,19)	2	GPS	GNSS Cantabria	ES	43
SANT_1	SANT_1	RTCM 3	RTCM 3.x (1004,1005,1007)	2	GPS	GNSS Cantabria	ES	43
LARE_0	LARE_0	RTCM 2	RTCM 2.x (1,2,18,19)	2	GPS & GLONASS	GNSS Cantabria	ES	43
LARE_1	LARE_1	RTCM 3	RTCM 3.x (1004,1005,1007)	2	GPS & GLONASS	GNSS Cantabria	ES	43
REIN_0	REIN_0	RTCM 2	RTCM 2.x (1,2,18,19)	2	GPS & GLONASS	GNSS Cantabria	ES	43
REIN_1	REIN_1	RTCM 3	RTCM 3.x (1004,1005,1007)	2	GPS & GLONASS	GNSS Cantabria	ES	43
TRVG_0	TRVG_0	RTCM 2	RTCM 2.x (1,2,18,19)	2	GPS & GLONASS	GNSS Cantabria	ES	43
TRVG_1	TRVG_1	RTCM 3	RTCM 3.x (1004,1005,1007)	2	GPS & GLONASS	GNSS Cantabria	ES	43
RNAN_0	RNAN_0	RTCM 2	RTCM 2.x (1,2,18,19)	2	GPS & GLONASS	GNSS Cantabria	ES	43
RNAN_1	RNAN_1	RTCM 3	RTCM 3.x (1004,1005,1007)	2	GPS & GLONASS	GNSS Cantabria	ES	43
NEAREST_0	NEAREST_0	RTCM 2	RTCM 2.x (18,19)	2	GPS	GNSS Cantabria	ESP	43
NEAREST_1	NEAREST_1	RTCM 3	RTCM 3.x (1004,1005,1007)	2	GPS	GNSS Cantabria	ESP	43
DGPS	DGPS	RTCM 2	RTCM 2.x (1,2)	2	GPS	GNSS Cantabria	ESP	43
NEAREST_0_CORR	NEAREST_0_C	RTCM 2	RTCM 2.x (1,2,20,21)	2	GPS	GNSS Cantabria		43
LARE_1bis	LARE_1bis	RTCM 3		2	GPS & GLONASS	GNSS Cantabria	ES	43
VCRD_0	VCRD_0	RTCM 2	RTCM 2.x (1,2,18,19)	2	GPS & GLONASS	GNSS Cantabria	ES	43
VCRD_1	VCRD_1	RTCM 3	RTCM 3.x (1004,1005,1007)	2	GPS & GLONASS	GNSS Cantabria	ES	43

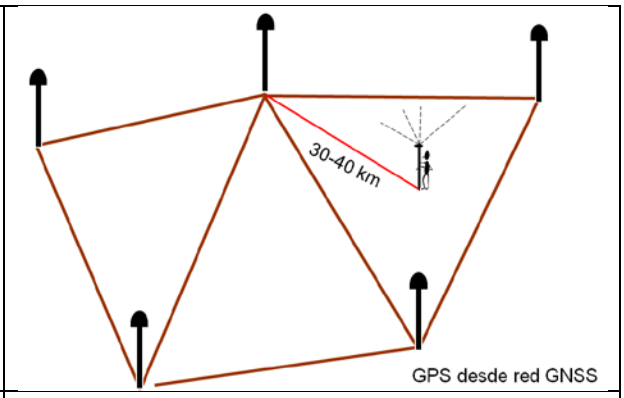
Ilustración 23.- Correcciones ofrecidas por la red activa de Cantabria.

Una de las diferencias prácticas entre los estándares Rtcm 2.x, más antiguo, y Rtcm 3.x está en que el formato más antiguo únicamente permite el empleo de satélites de la constelación GPS, mientras que el formato más moderno permite datos de las constelaciones GPS y GLONASS, además de estar más optimizado.

Desde el punto de vista del usuario, para poder acceder a datos en tiempo real generados por una red activa GNSS se deberá disponer de un receptor con capacidades adicionales de recibir datos a través de internet – modem de datos GPRS, 3G o mejor –, así como de recibir correcciones empleando un protocolo de internet específico - NTRIP -. La elección entre los formatos de correcciones Rtcm 2.x y Rtcm 3.x dependerá de las características del receptor del usuario, empleándose siempre que sea posible el más moderno.

La elección entre solución de red y solución de estación aislada, cuando ambas estén disponibles en la red activa, no produce diferencias significativas en el posicionamiento que se obtiene, pudiéndose utilizar cualquiera de las dos. Si es importante destacar que dependiendo de la configuración de la red activa, a veces es obligado el uso de la solución de red cuando la separación entre las estaciones de referencia es superior al límite adecuado para la resolución de una línea base desde una estación aislada, que típicamente está sobre los quince kilómetros. A modo de ejemplo, en Castilla y León, con estaciones de referencia separadas sobre 50 ó 60 km, el uso de la solución de red es obligado, ya que intentar la resolución de líneas base desde estaciones individuales que pueden estar a distancias de hasta 25 kilómetros puede producir resultados erróneos.





Solución de estación aislada	Solución de red

Ilustración 24.- Comparación del uso de las soluciones de red y de estación aislada.