

Sistemas de Navegación Satelital

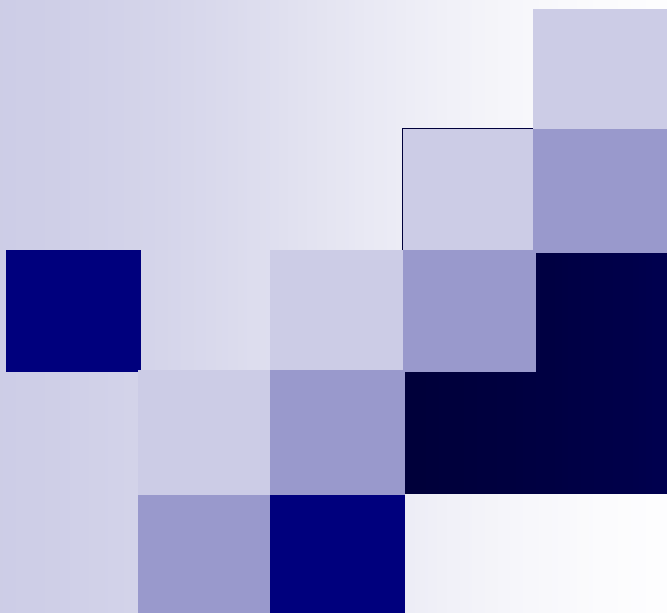
Teoría de la Señal y las Comunicaciones

Contenidos

- Construcción de un sistema de navegación satelital
- Principios de operación de los sistemas de navegación satelital
- Fuentes de error, precisión y sistemas diferenciales
- Sistema NAVSTAR GPS

References

- *Radionavigation Systems*, Börje Forsell. Prentice Hall, 1991.
- *2001 Federal Radionavigation Systems Report*, Department of Defense and Department of Transportation.
- *2005 Federal Radionavigation Systems Plan*, Department of Defense and Department of Transportation
- *Understanding GPS, Principles and Applications* (2nd Edition). Editors: Elliot D. Kaplan, Christopher J. Hegarty
- *ICD-GPS-200 (1991) Interface Control Document*. Arinc Research Corporation, 11 770 Warner Av., Suite 210, Fountain Valley, CA.



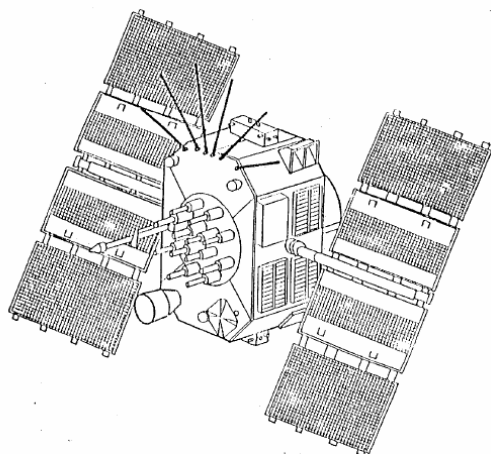
Construcción de un sistema de navegación satelital

1. Perspectiva general de un GNSS
2. Descripción del segmento de espacio
3. Segmento de control
4. Segmento del usuario

Introducción a un Sistema Global de Navegación Satelital (Global Navigation Satellite System, GNSS)

Un GNSS consta de tres segmentos:

1. Una constelación de satélites



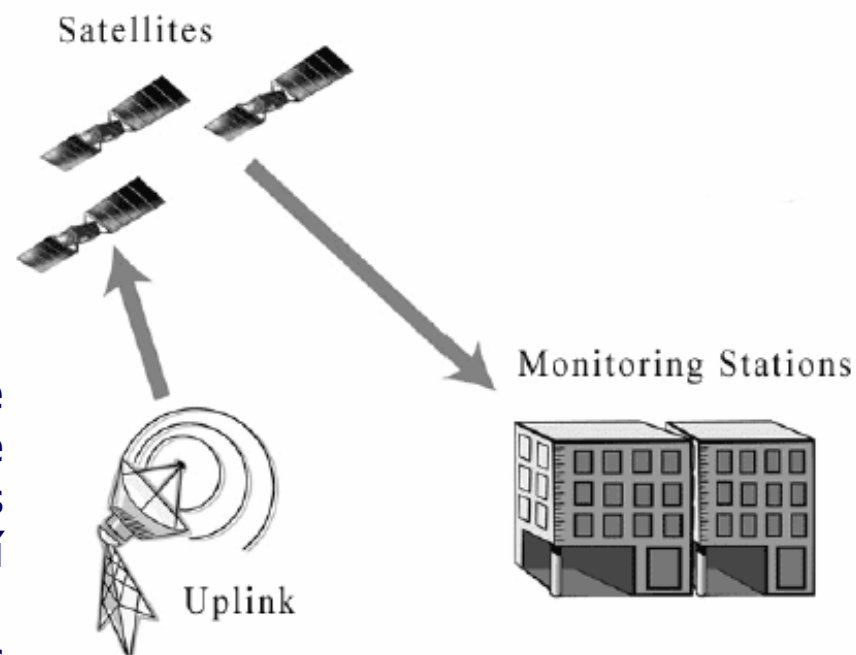
La constelación satelital es el conjunto de satélites en órbita que proporcionan las señales de pseudodistancia y los mensajes de datos al equipo del usuario.

Introducción a un Sistema Global de Navegación Satelital (Global Navigation Satellite System, GNSS)

Un GNSS consta de tres segmentos :

2. Red de tierra de control y monitorización

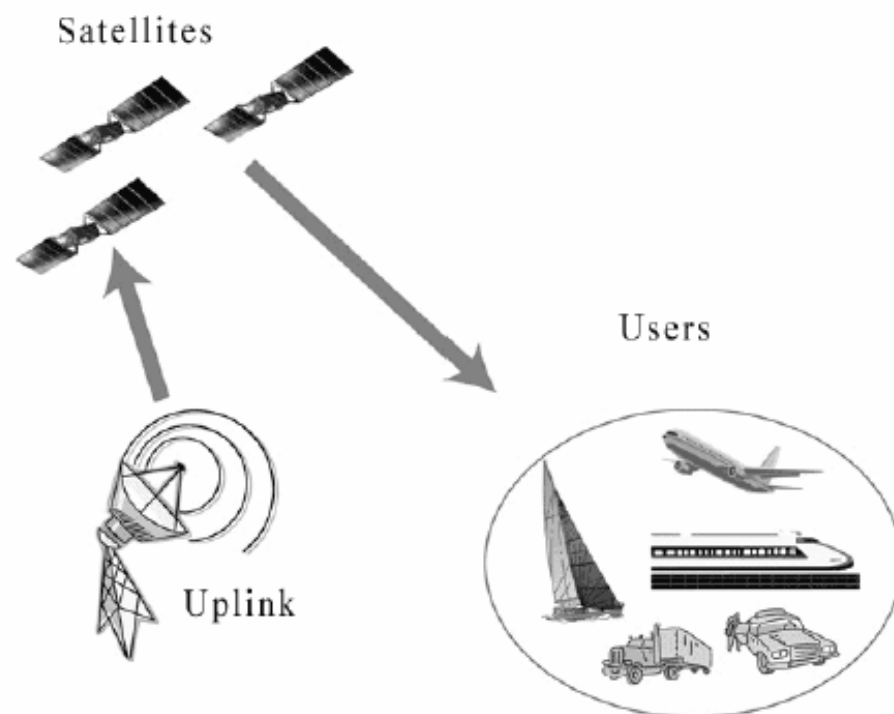
El segmento de control realiza el seguimiento de los satélites que están en órbita y se ocupa de su mantenimiento. Monitoriza la salud de los satélites y mantiene su configuración orbital, así como la integridad de la señal que envían. Además corrige las derivas de los relojes de los satélites y los datos de efemérides, así como otros parámetros necesarios para determinar el PVT (posición, velocidad, tiempo) del usuario.



Introducción a un Sistema Global de Navegación Satelital (Global Navigation Satellite System, GNSS)

Un GNSS consta de tres segmentos :

3. Equipo del usuario



El equipo receptor del usuario lleva a cabo las funciones de navegación y las asociadas a estas

Introducción a un Sistema Global de Navegación Satelital (Global Navigation Satellite System, GNSS)

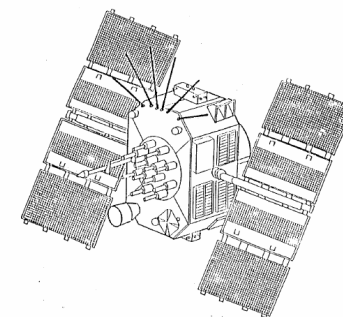
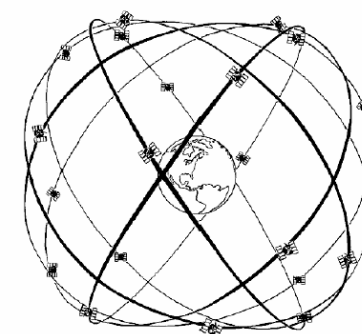
- Un GNSS consta de tres segmentos :

	<i>Términos oficiales del GPS Joint Program</i>
1. Constelación de satélites	<i>Segmento de espacio</i>
2. Red de tierra de monitorización y control	<i>Segmento de control</i>
3. Equipo del usuario	<i>Segmento del equipo de usuario</i>

Introducción a un GNSS: Segmento de Espacio

Hay dos elementos en el segmento de espacio:

- *Órbitas y posicionamiento de los satélites en las órbitas*
- *Características de los satélites que ocupan las órbitas*



Introducción a un GNSS: Segmento de Espacio

Descripción de una constelación GNSS

1. Número de satélites que garantizan una cobertura completa de la Tierra (*GPS: 24 satélites*)
2. Número de planos orbitales (*GPS: 6 planos*)
3. Períodos orbitales (*GPS: 11 horas, 58 minutos*)
4. Aspectos geométricos de las órbitas (*GPS: casi circulares, espaciadas regularmente -60°-, inclinación nominal con respecto al plano ecuatorial de 55°, radio orbital de 26,600 km*)
5. Nomenclatura (GPS: i. una letra para cada plano orbital y un número para cada satélite sobre cada órbita: A1,A2,A3,A4,B1,...,F4; ii. un número para el vehículo espacial (space vehicle number, SVN); iii. nombre según el código que genera)

Introducción a un GNSS: Segmento de Espacio

Líneas maestras en el diseño de una constelación

Existen varios factores contrapuestos en el diseño de una constelación GNSS:

1. Influencia de la geometría en la exactitud de la navegación: la visibilidad de los satélites ha de ser buena para todos los usuarios en cualquier punto del mundo (En GPS la idoneidad de la geometría se mide a través de la llamada dilution of precision (DOP))
2. La visibilidad de los satélites ha de ser buena también desde las estaciones de tierra que tienen que suministrarles datos

Introducción a un GNSS: Segmento de Espacio

Desarrollo e implementación del programa GPS

El desarrollo del sistema GPS en sus segmentos de espacio y control se ha realizado a lo largo de diferentes fases. En lo que respecta a

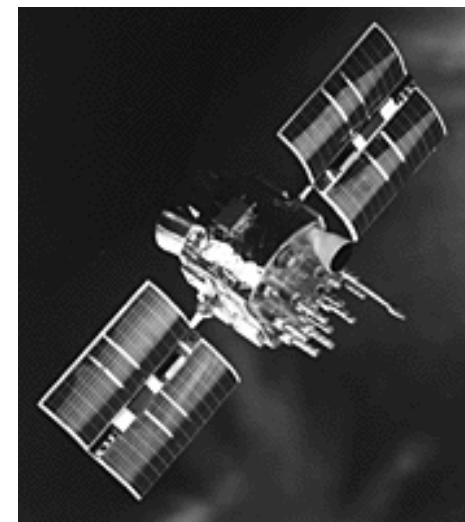
1. las plataformas, los satélites de cada fase se llaman *bloques*
2. la carga útil del satélite o *payload* (=equipo responsable de la generación y transmisión de los códigos de pseudodistancia –ranging codes- y los datos de navegación), los instrumentos de control de actitud y los motores que orientan los paneles solares.

Introducción a un GNSS: Segmento de Espacio

Desarrollo e implementación del programa GPS

Bloque I- Validación del concepto inicial

Los satélites del bloque I fueron prototipos que permitieron validar el concepto del GPS. Un total de 11 satélites fueron construidos por Rockwell International y fueron lanzados desde California entre 1978 y 1995 (un lanzamiento falló). Aunque se diseñaron originalmente para tener una vida de 4 años y medio, muchos de ellos operaron durante más tiempo, uno de ellos 13 años. Su peso era de 845 kg y estaban alimentados por paneles solares de 400 W. Todos ellos estuvieron abiertos para uso civil.

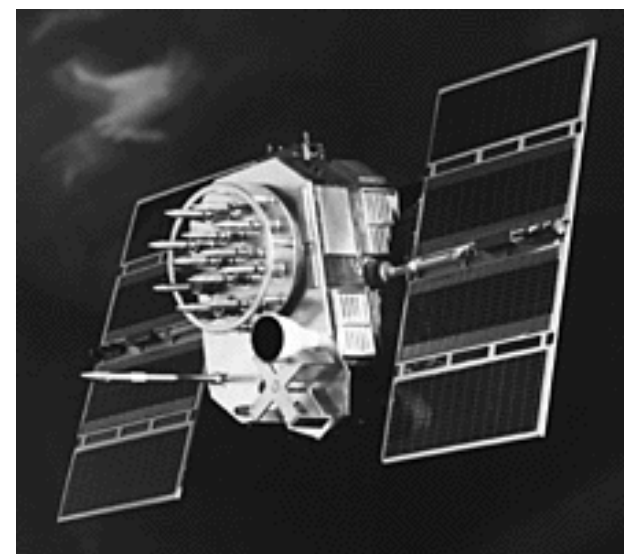


Introducción a un GNSS: Segmento de Espacio

Desarrollo e implementación del programa GPS

Bloque II- Satélites de Producción Inicial

Los satélites del bloque II se beneficiaron de la experiencia acumulada con el bloque I (por ejemplo, se lanzaron con una protección más segura de los equipos de memoria RAM contra los rayos cósmicos). El bloque II constó de 9 satélites, el primero de los cuales se lanzó desde Cabo Cañaveral en 1989. Su peso era de 1500 kg y la potencia suministrada por los paneles solares era de 750 W. Su diseño preveía una vida media de 6 años, pero uno de ellos llegó a ser funcional durante 16 años (Octubre 90-Marzo 07).

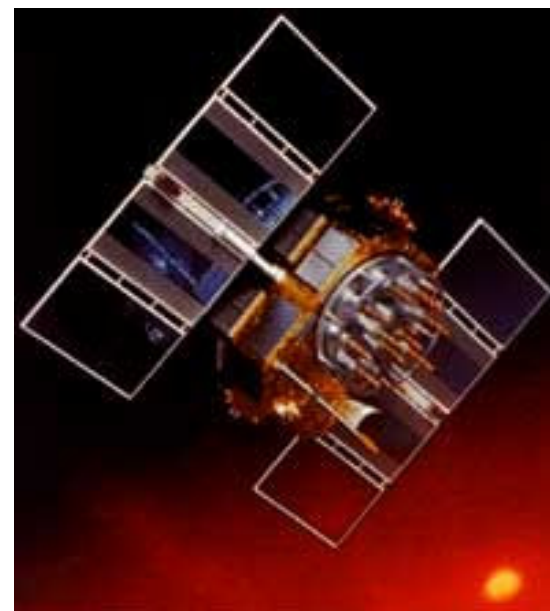


Introducción a un GNSS: Segmento de Espacio

Desarrollo e implementación del programa GPS

Bloque IIA- Satélites de producción actualizados

Los satélites del bloque IIA contaban con una número de mejoras que los permitía funcionar hasta 6 meses de manera autónoma sin intercambio de datos con las estaciones de tierra. Se construyeron 19 satélites de los cuales 15 todavía están operativos. Al igual que el bloque II, fue construido por Rockwell International. La duración esperada de la misión es de 10 años.



Introducción a un GNSS: Segmento de Espacio

Desarrollo e implementación del programa GPS

Bloque IIR- Satélites de reemplazo

Los satélites del bloque IIR han sido construidos por Lockheed Martin y su carga útil de navegación bajo una subcontrata con ITT Aerospace/Communications. Hay dos versiones de los satélites del bloque IIR: los IIR clásicos y los IIR modernizados (IIR-M). De los satélites en órbita de este bloque, 12 son del tipo clásico. El primer satélite de este bloque falló en su lanzamiento y el primero que llegó a su órbita lo hizo en 1997. Los del tipo modernizado incluyen un hardware más avanzado y un modo de transmisión de la señal más complejo que anticipa la tecnología de la siguiente generación. Hay 3 IIR-Ms en órbita desde el lanzamiento del primero en 2005. La duración esperada de la misión es de 6 años

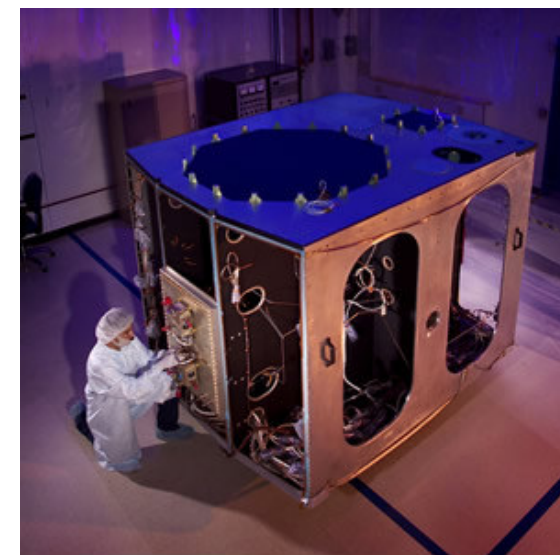


Introducción a un GNSS: Segmento de Espacio

Desarrollo e implementación del programa GPS

Bloque IIF- Satélites de sostenimiento y continuación

El bloque IIF incluirá una nueva frecuencia. Esta fase tenía que haber comenzado en 2001 pero la longevidad de los otros bloques la retrasó. Los planes incluyen el lanzamiento de 16 satélites dentro de este bloque y su objetivo es continuar la misión GPS hasta la consolidación de GPS III. El lanzamiento del primero está previsto en 2009.



GPS IIF SV-1 in assembly, integration and test at the Boeing Satellite Development Center in El Segundo
Dana Reimer photo

Introducción a un GNSS: Segmento de Espacio

Desarrollo e implementación del programa GPS

Bloque III- Nueva generación

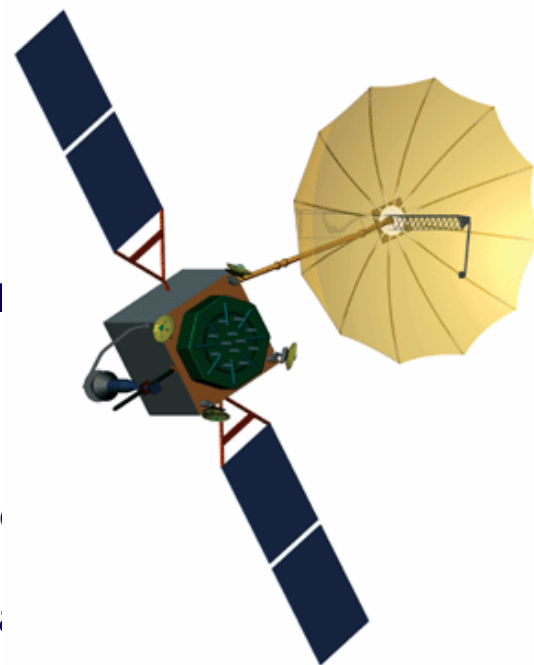
El programa Block III tiene dos objetivos principales:

1. Reducir los costes del gobierno de EEUU a través de privatización de tareas
2. Proporcionar suficiente flexibilidad en la arquitectura para satisfacer los requisitos en evolución hasta el año 2030.

Desde el punto de vista técnico, se espera que GPS III proporcione:

1. exactitud por debajo del metro
2. mayor exactitud temporal
3. una alta capacidad de intercambio de datos entre satélites (intersatellite crosslink capability)
4. una potencia de señal alta que evite las contramedidas electrónicas

Se preve el lanzamiento del primer satélite GPS III en 2013.



Introducción a un GNSS: Segmento de Control

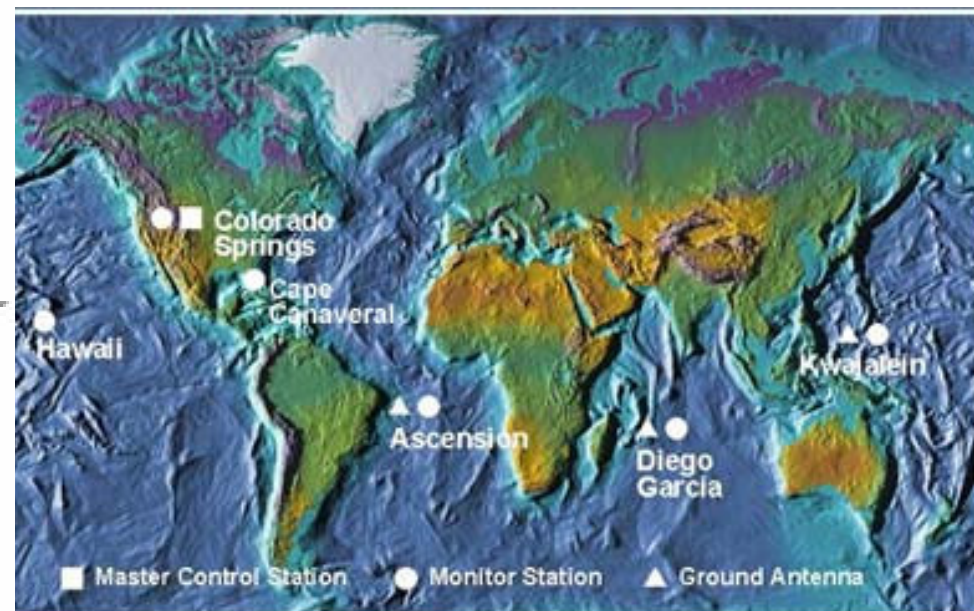
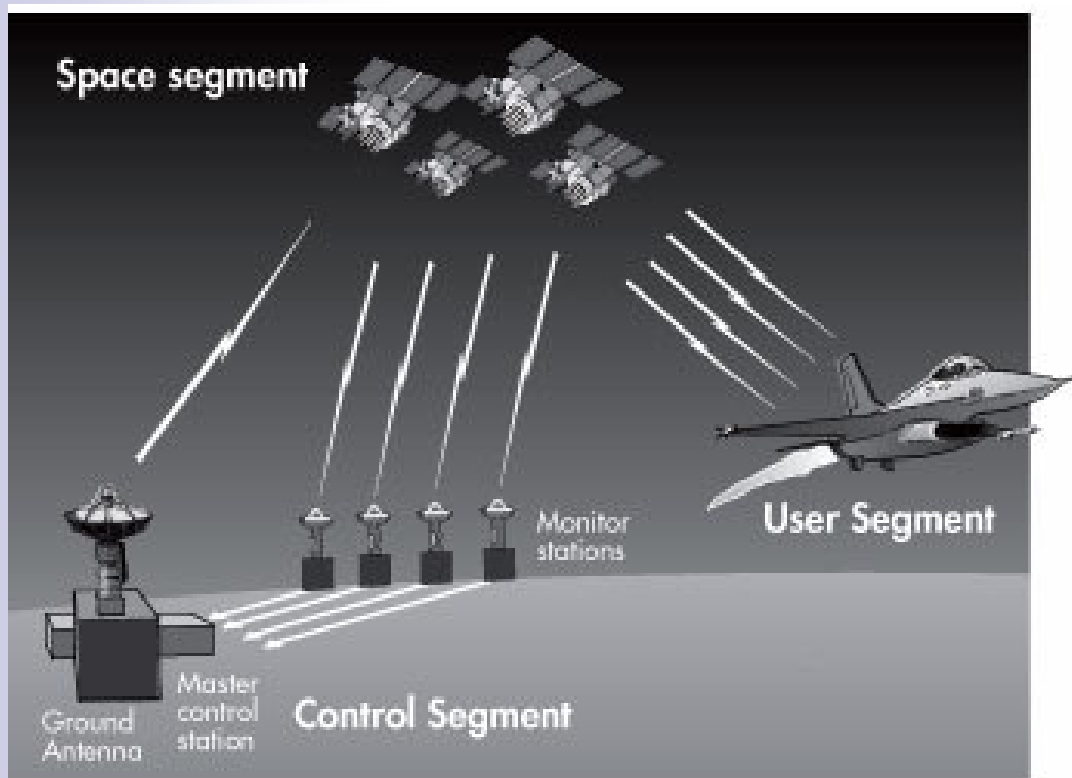
Funciones del segmento de control

Es el responsable de la monitorización, el envío de órdenes y el control de la constelación de satélites.

- *Monitorización*: downlink de las señales de navegación en banda L, salud de los satélites
- *Envío de órdenes*: maniobras satelitales, recarga de baterías, carga útil de los satélites
- *Control*: actualización de los mensajes de navegación

Introducción a un GNSS: Segmento de Control

Elementos del segmento de control



Introducción a un GNSS: Segmento de Control

Sistema de Control Operacional

Estación de Control Master

- Monitorización y mantenimiento del estado de salud de los satélites
- Monitorización de las órbitas de los satélites
- Estimación de los parámetros de las efemérides y de los relojes de los satélites
- Generación de los mensajes de navegación
- Mantenimiento del servicio de tiempos y su sincronización con el UTC
- Envío de órdenes de maniobras para mantener las órbitas o para el reposicionamiento de las plataformas

Estaciones Monitoras

- Seguimiento de la señal de navegación
- Medida de la portadora y la distancia
- Recolección de datos atmosféricos
- Comprobación de los datos de navegación entregados al usuario

Antenas de Tierra

- Transmisiones del vehículo espacial (SV)
- Transmisiones del procesador del SV
- Transmisiones de navegación del SV
- Recoger la telemetría del SV

Introducción a un GNSS: Segmento de Control

Software del Segmento de Control

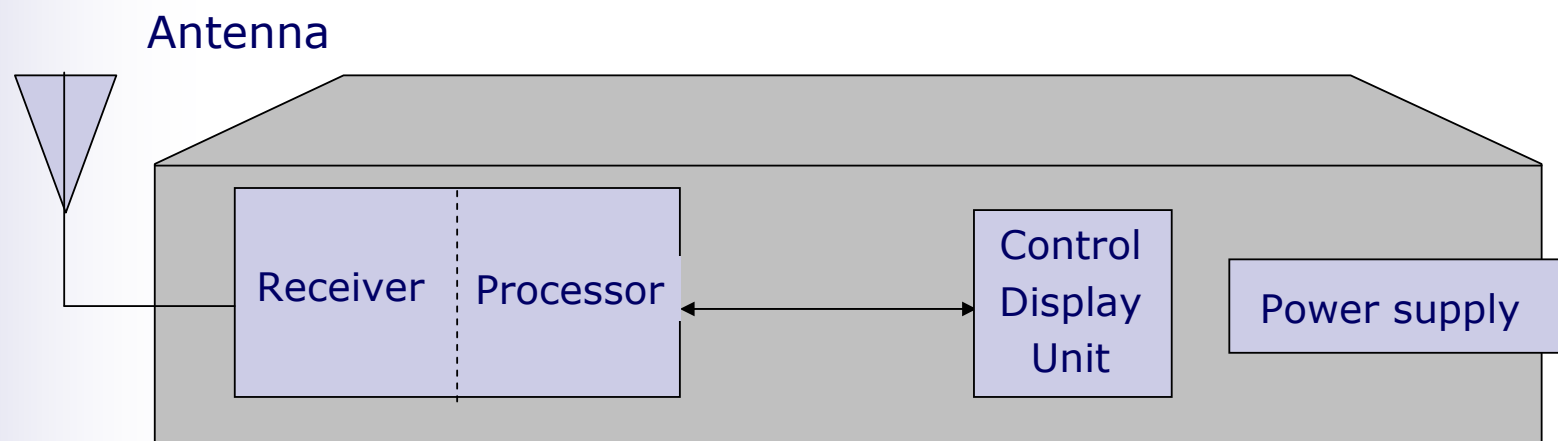
El *MCS data processing software* está instalado en un ordenador central IBM bajo el sistema operativo Multiple Virtual Storage (MVS).

Las estaciones monitoras y las antenas de tierra son de funcionamiento automático y se operan de manera remota desde el MCS via TCP/IP. Funcionan sobre software basado en UNIX en estaciones de trabajo Sun.

Introducción a un GNSS: Segmento de Usuario

Características del aparato receptor GPS

Los GPS están incluidos en muchos instrumentos de la vida diaria: teléfonos móviles, PDAs, neveras.



Introducción a un GNSS: Segmento de Usuario

Oferta de receptores GPS

Hay más de 100 fabricantes de equipos para receptores GPS, desde compañías que se dedican a la fabricación de los chipsets como SiRF a compañías que principalmente integran el producto final como GARMIN o Trimble Navigation.

Una serie de características importantes que varían de un receptor a otro son:

- Resistencia a los golpes y las viraciones, extremos de temperatura y humedad, contenido de sal en el aire
- Receptores militares vs civiles
- Velocidad de actualización de PVT
- Resistencia al multicamino
- Condiciones dinámicas (aceleración y velocidad)
- Amplificación de la señal, número de canales, etc.



Principios de operación de los sistemas de navegación satelital

1. Determinación de la distancia usando el tiempo de llegada o *time of arrival* (TOA)
2. Sistemas de referencia
3. Fundamentos de órbitas
4. Determinación de la posición con códigos de pseudo-ruido o *pseudo-random noise* (PRN)
5. Obtención de la velocidad del usuario
6. Tiempo y GPS

Determinación de la distancia usando el tiempo de llegada o *time of arrival* (TOA)

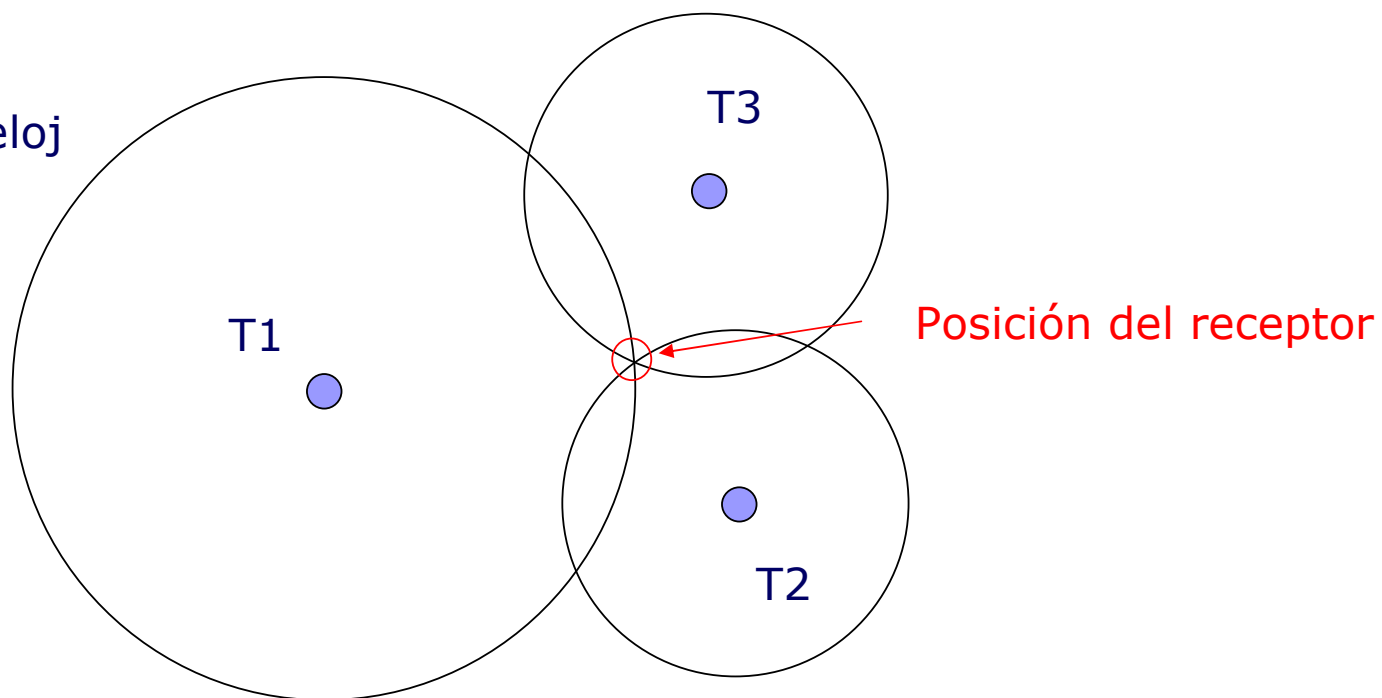
Pasos para la determinación de la posición de un receptor:

1. Medir el tiempo de propagación de la señal
(=intervalo de tiempo que necesita la señal transmitida por un transmisor para alcanzar el receptor)
2. Multiplicar este valor de tiempo por la velocidad de la luz
3. Repetir el proceso para tantos transmisores como estén en el campo de visión

Determinación de la distancia usando el tiempo de llegada o *time of arrival* (TOA)

Caso bidimensional

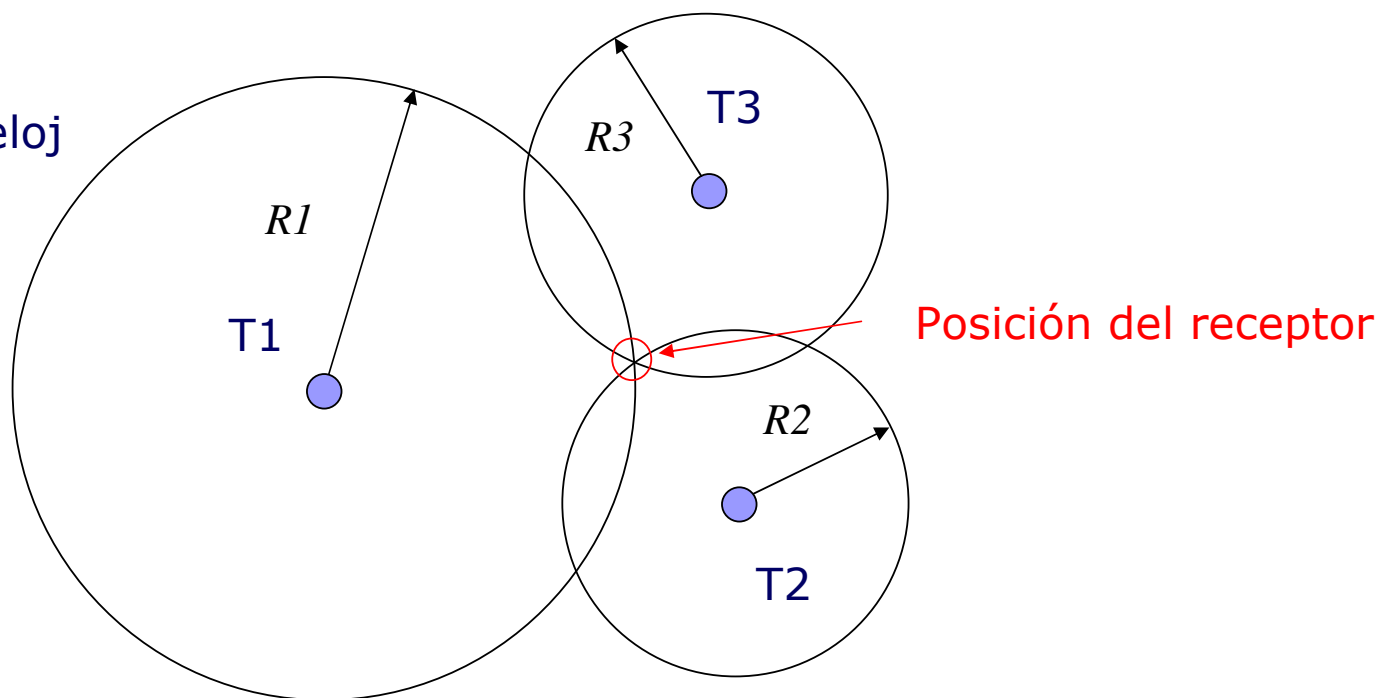
Sin errores de reloj



Determinación de la distancia usando el tiempo de llegada o *time of arrival* (TOA)

Caso bidimensional

Sin errores de reloj

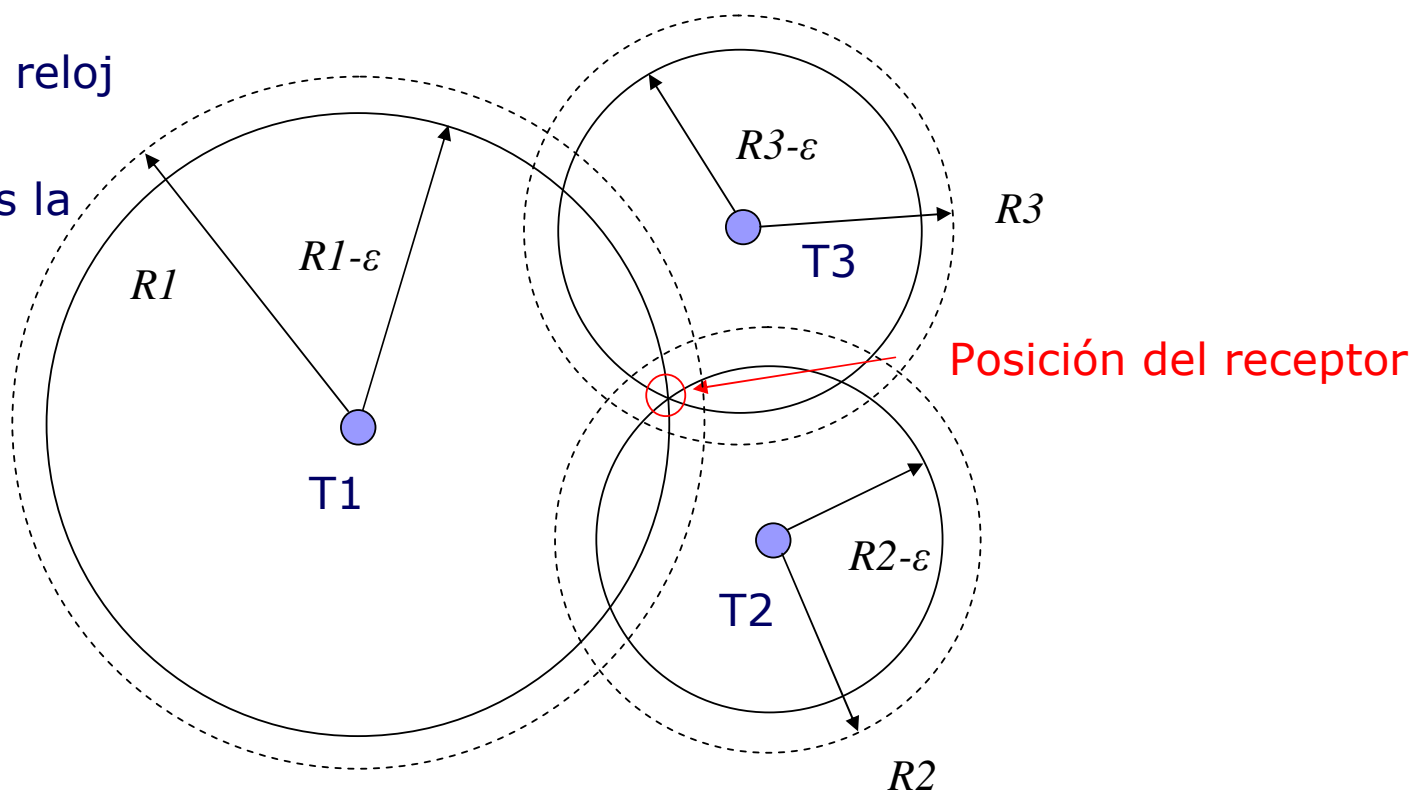


Determinación de la distancia usando el tiempo de llegada o *time of arrival* (TOA)

Caso bidimensional

Con un error constante de reloj

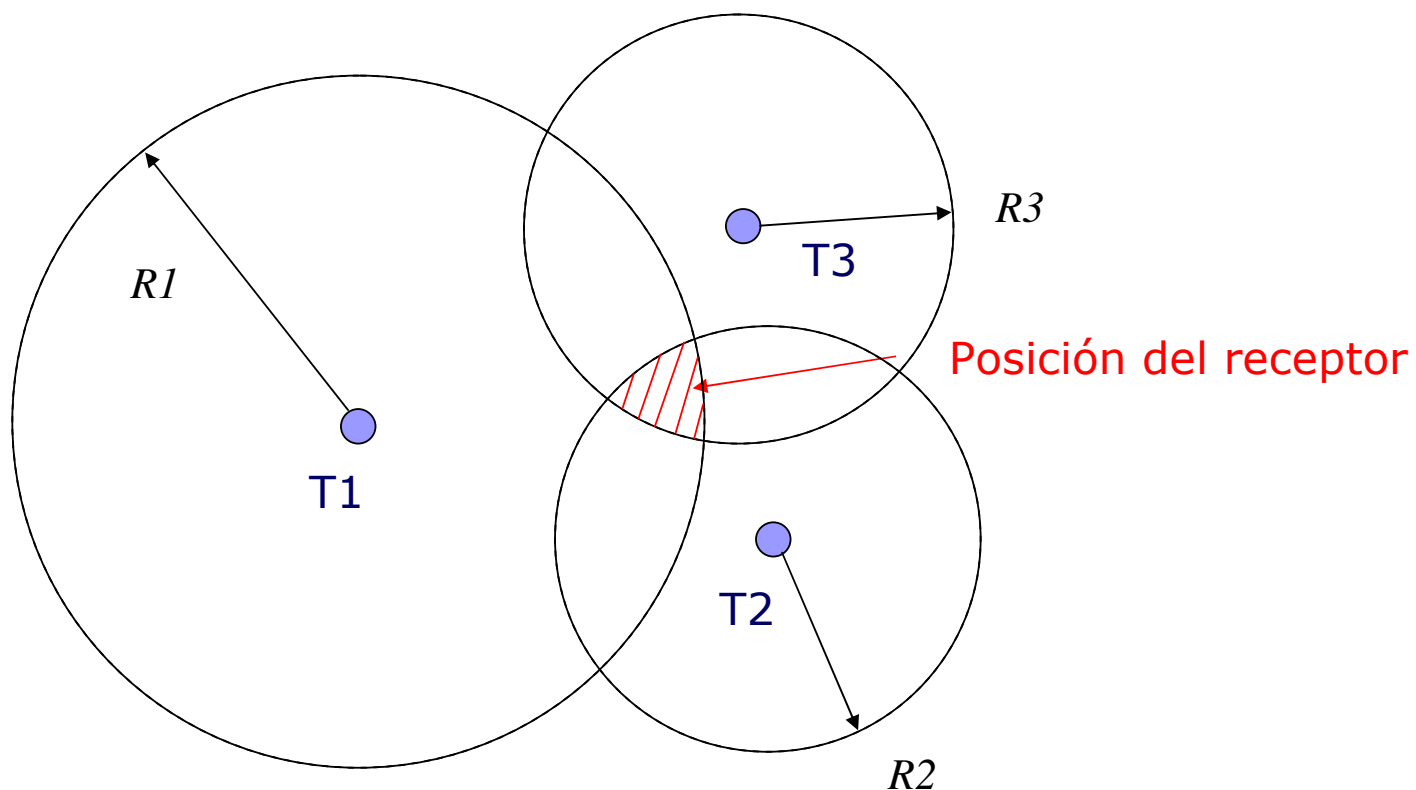
⇒ Con un cuarto satélite resolvemos (x,y,z) más la ambigüedad $\Delta t = \epsilon/c$



Determinación de la distancia usando el tiempo de llegada o *time of arrival* (TOA)

Caso bidimensional

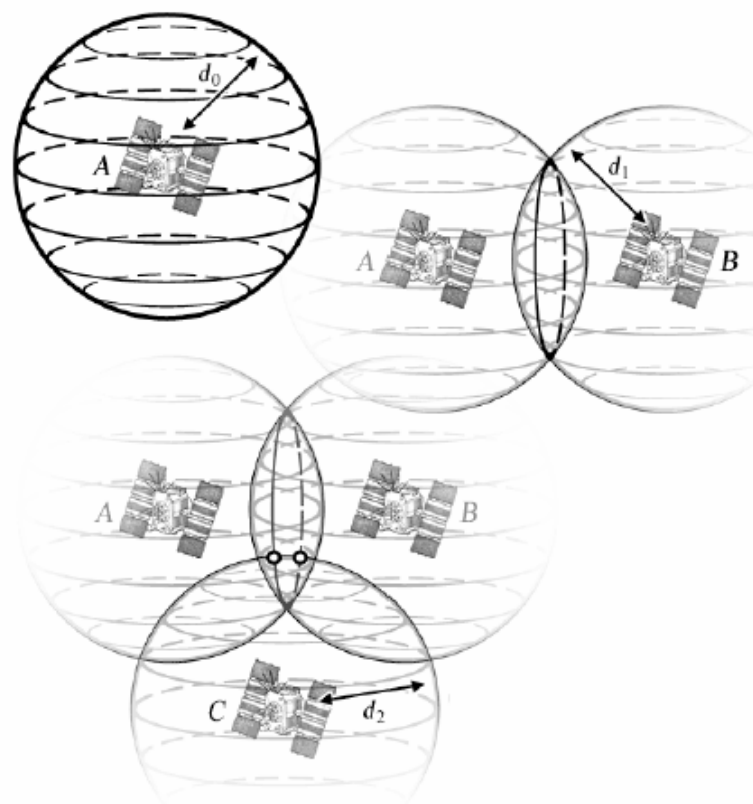
Con un error
no constante
de reloj



Determinación de la distancia usando el tiempo de llegada o *time of arrival* (TOA)

Caso tridimensional

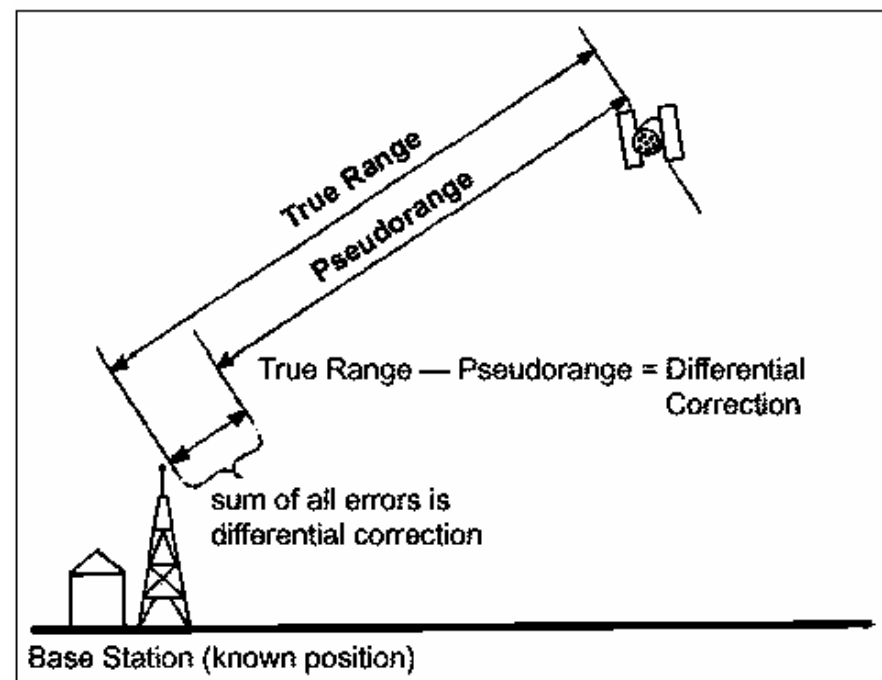
Tres satélites (*trilateración* o *pseudotrilateración*) producen dos puntos de intersección \Rightarrow Esta ambigüedad se resuelve descartando el punto que aparece debajo de la superficie de la Tierra o usando datos auxiliares provenientes de otra fuente (*ancillary data*)



Determinación de la distancia usando el tiempo de llegada o *time of arrival* (TOA)

La pseudodistancia

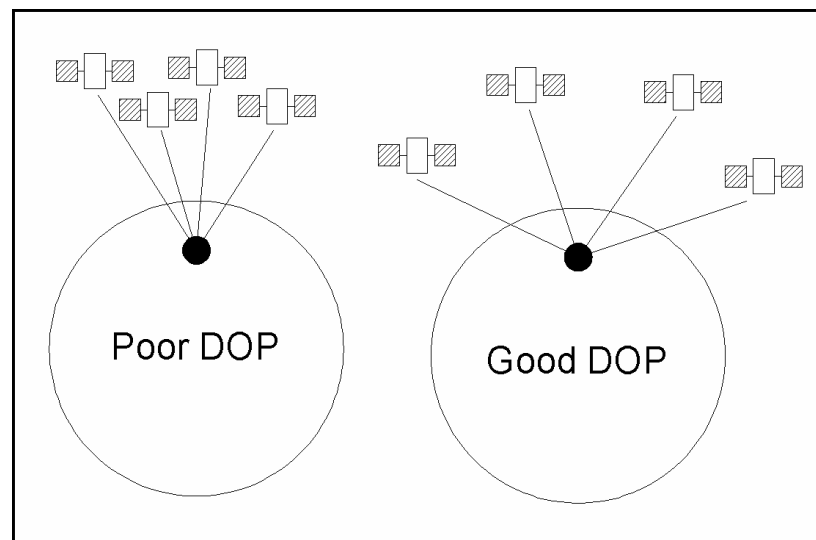
La pseudodistancia es una primera aproximación al valor de la distancia entre el satélite y el receptor, que confía en la medida temporal realizada por el reloj de cuarzo del receptor. Este reloj tiene una desviación de 1 μ s (300 m) cada segundo. Estamos ante el caso de un error constante para todas las medidas realizadas simultáneamente y se puede resolver con un cuarto satélite.



Determinación de la distancia usando el tiempo de llegada o *time of arrival* (TOA)

La dilución de precisión (DOP)

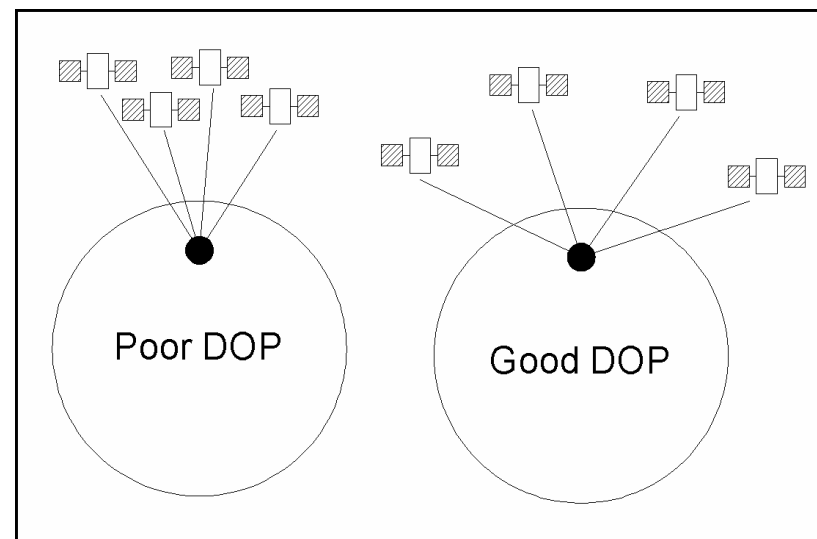
Es la consistencia geométrica del conjunto de satélites que se encuentran dentro del campo de observación del receptor. Cuando los satélites se encuentran muy cerca unos de otros se dice que la geometría es débil y la DOP alta y si se encuentran muy distantes angularmente la geometría es fuerte y la DOP baja.



Determinación de la distancia usando el tiempo de llegada o *time of arrival* (TOA)

La dilución de precisión (DOP)

DOP	Valor
1	Ideal
2-3	Excelente
4-6	Buena
7-8	Moderada
9-20	Regular
21-50	Mala



Se habla de HDOP, VDOP, PDOP, TDOP según hablemos de DOP horizontal, vertical, de posición (3D) o de tiempo.

Sistema NAVSTAR GPS

1. Señal GPS
2. Antenas y front ends GPS
3. Sumario de la operación de un receptor GPS
4. Adquisición
5. Seguimiento de la portadora y el código
6. Procesado para el posicionamiento
7. Integración del GPS con otros sensores
8. GPS diferencial

Señal GPS

- Las señales tradicionales de GPS se transmiten en dos frecuencias de radio en la banda UHF: L1 y L2 y se derivan de una frecuencia común

$$f_{L1} = 154 f_0 = 1575.42 \text{ MHz}$$

$$f_{L2} = 120 f_0 = 1227.60 \text{ MHz}$$

Señal GPS

La señal se compone de tres partes:

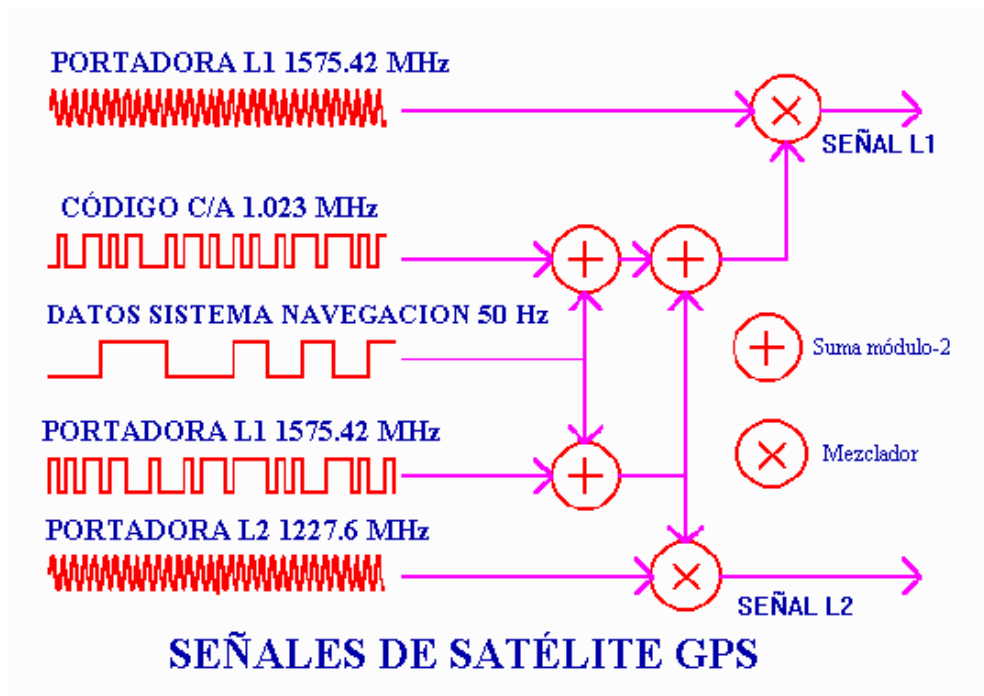
1. *Portadora*: L1 or L2.
2. *Datos de navegación*: Contienen información sobre los datos de efemérides (posición de la órbita) del satélite que la envía, el reloj del satélite y los datos de salud de dicho satélite. Esta información se sube desde las estaciones del segmento de control. Los datos de navegación tienen un bit rate de 50bps, se transmiten en la portadora L1 y duran 12.5 minutos.
3. *Secuencia o código ensanchado (spreading sequence or code)*: cada satélite tiene dos secuencias¹ o códigos ensanchados: el código de adquisición común u ordinario (*coarse acquisition code*, C/A) destinado a uso civil y modulado en L1 y el código de precisión encriptado (*encrypted precision code*, P(Y)) modulado tanto en L1 como en L2

¹El nombre de espectro extendido se debe a que el espectro de la señal se extiende fuera de la anchura dada por la componente de información bandwidth.

Esquema de la señal GPS

La señal transmitida por el satélite k -ésimo se describe por la siguiente ecuación

$$s^k(t) = A_{C/A,L1} (C^k(t) \oplus D^k(t)) \cos(2\pi f_{L1} t) \\ + A_{P(Y),L1} (P^k(t) \oplus D^k(t)) \sin(2\pi f_{L1} t) \\ + A_{P(Y),L2} (P^k(t) \oplus D^k(t)) \cos(2\pi f_{L2} t)$$



Esquema de la señal GPS

Aspectos principales:

1. Los datos de los datos de navegación y el código se combinan usando un sumador de módulo 2 u operador XOR

Input	Input	Output
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Modulo-2 addition

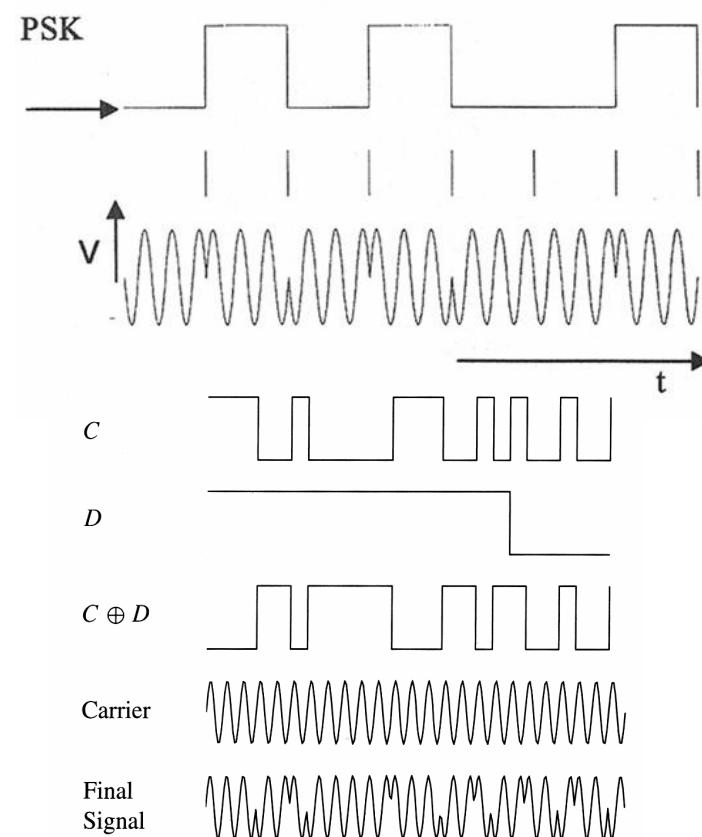
Input	Input	Output
1	1	1
1	-1	-1
-1	1	-1
-1	-1	1

Ordinary multiplication

Esquema de la señal GPS

Aspectos principales :

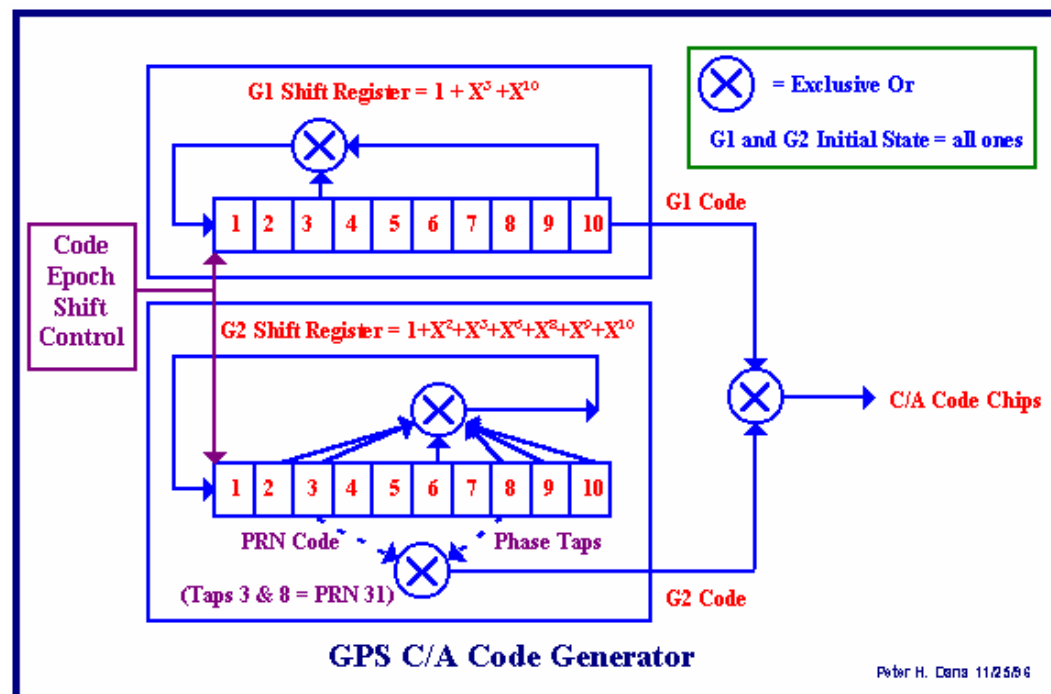
2. Los bits del código se denominan chips
3. Cada secuencia completa de código C/A dura 1ms y cada bit de navegación dura 20ms.
4. La portadora se modula a través de la suma en módulo 2 de los datos de navegación y el código de acuerdo al esquema llamado *binary phase shift keying* (BPSK): la fase de la portadora cambia en 180° cada vez que el resultado de la suma en módulo 2 cambia de 1 a -1 o viceversa.



Esquema de la señal GPS : los códigos PRN

Los códigos GPS son códigos de pseudoruido (*pseudo-random noise*, PRN), es decir, códigos con propiedades parecidas a las del ruido. Se llaman también códigos de Gold, ya que Robert Gold los describió en 1967.

Cada código se genera con un registro LFSR (*tapped linear feedback shift register*) de n elementos. El código generado se repite a sí mismo cada $N=2^n-1$ bits.



10111100011001101001110001110001011110001100110100111000111000



A Short Repeating PRN Code Sample

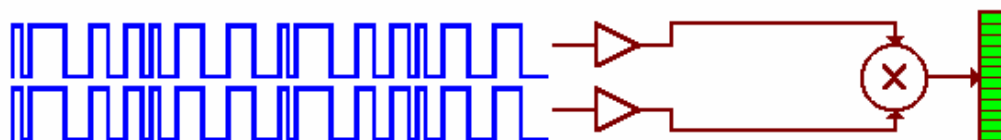
Esquema de la señal GPS : los códigos PRN

- Hay 36 códigos C/A diferentes, que se generan a través de dos registros electrónicos de diez llaves cada uno como se ve en la figura. De ellos 32 se usan para identificar los satélites, dejando los otros para otros propósitos, como la transmisión de señales desde las estaciones de tierra.
- El código P(Y) obedece los mismos principios de generación, excepto que se basa en cuatro registros con 12 celdas cada uno
- La longitud del código C/A es de 1023 chips, a una velocidad (*chipping rate*) de 1.023 MHz.
- La longitud del código P(Y) es de 2.35×10^4 chips, a un *chipping rate* de 10.23 MHz.

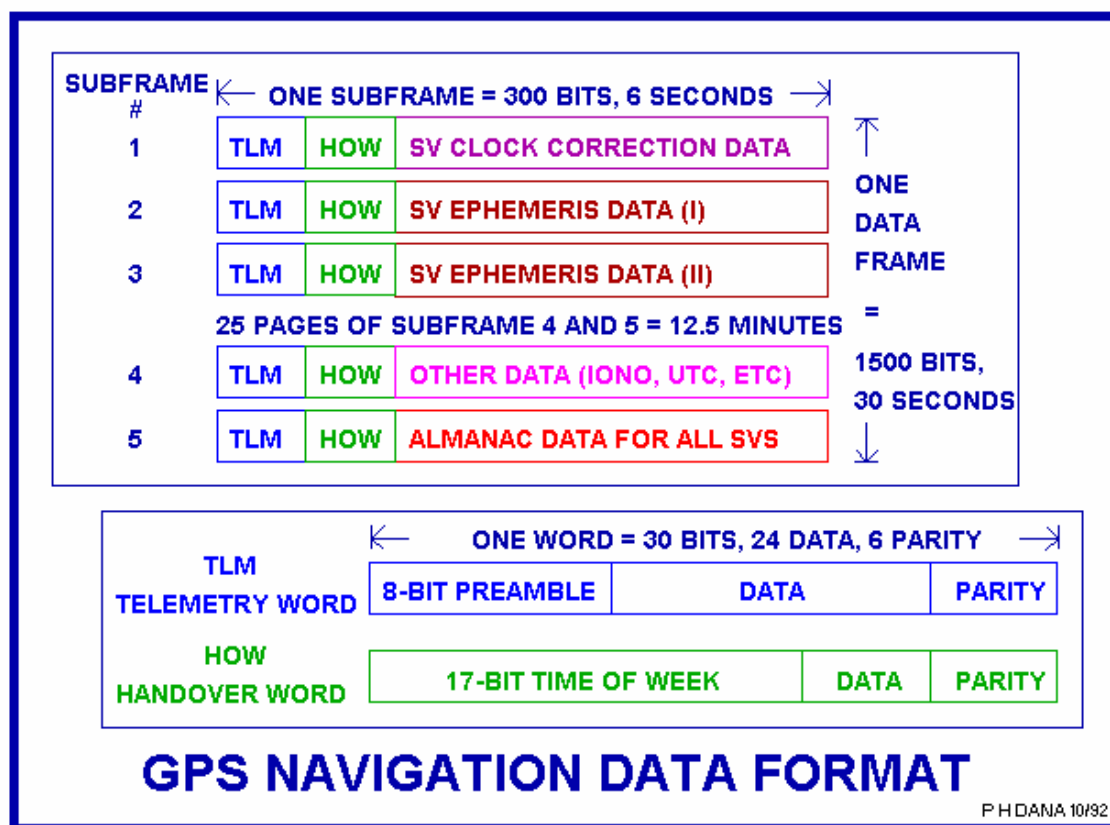
Esquema de la señal GPS : los códigos PRN

■ Propiedades de correlación

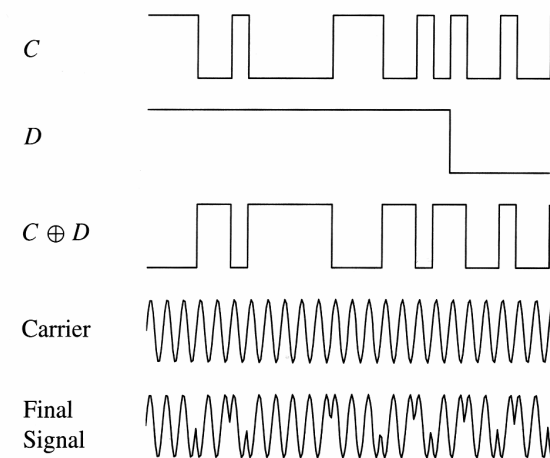
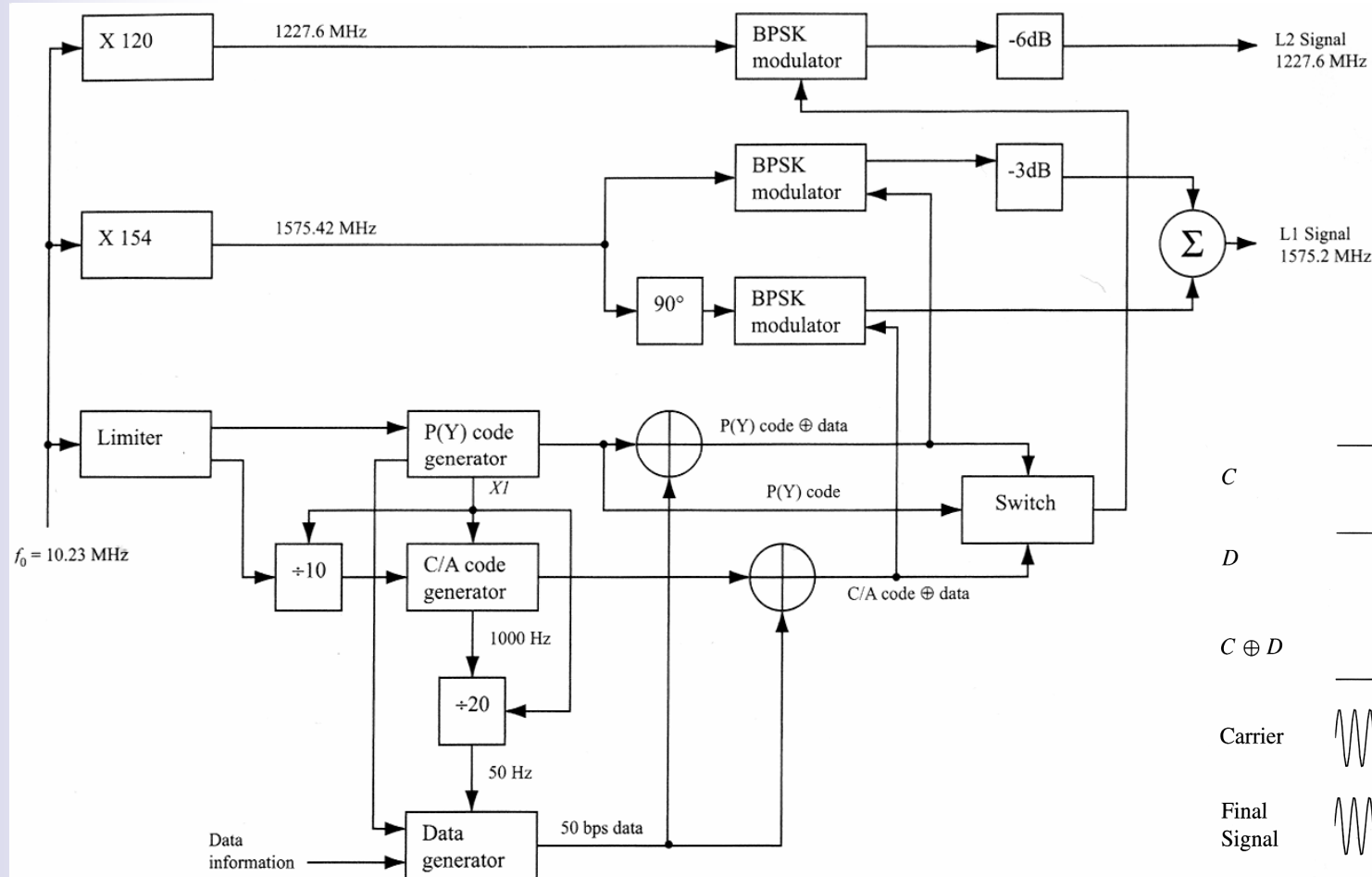
1. *Prácticamente no hay correlación cruzada:* Todos los códigos C/A están prácticamente decorrelados los unos de los otros. Esta propiedad hace posible que podamos distinguir las diferentes señales que vienen de los diferentes satélites.
2. *Prácticamente no hay correlación entre dos copias desplazadas del mismo código:* Todos los códigos C/A están prácticamente decorrelados consigo mismos, excepto para un desplazamiento nulo entre copias. Esta propiedad permite hallar el momento en que dos códigos idénticos están perfectamente alineados.



Esquema de la señal GPS : datos de navegación

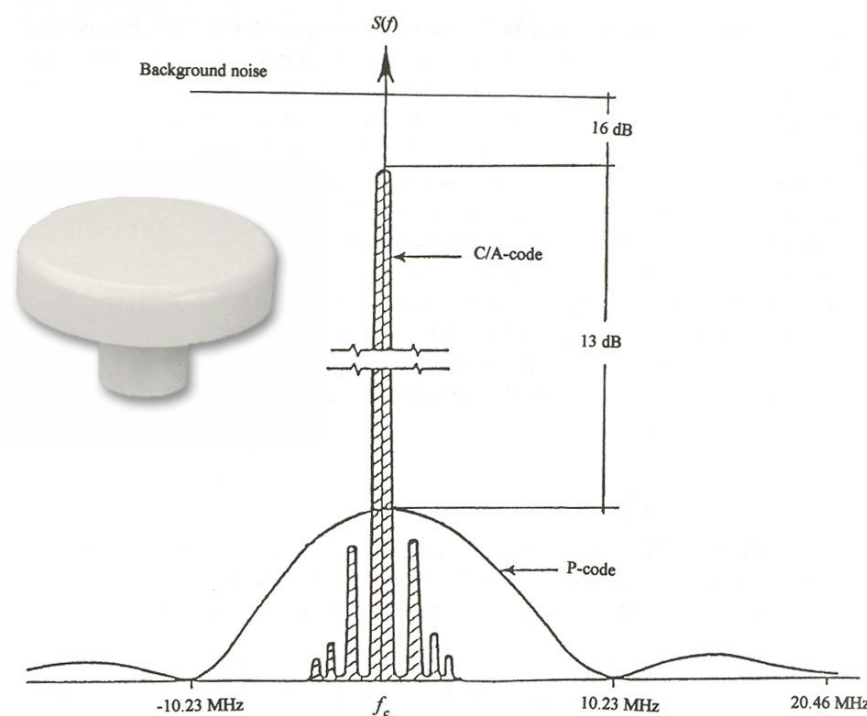


Esquema de la señal GPS : Sumario



Antenas y front ends GPS : Señal vs. Ruido

El proceso de recepción comienza con una señal GPS propagándose en el espacio libre e incidiendo en la antena del receptor. Esto induce un voltaje en los puertos de la antena extremadamente débil, del orden de -160dBW , es decir, por debajo del nivel de ruido térmico.



Antenas y front ends GPS : Señal vs. Ruido

El ruido térmico viene dado por

$$P_{\text{thermal noise}} = k_B T B$$

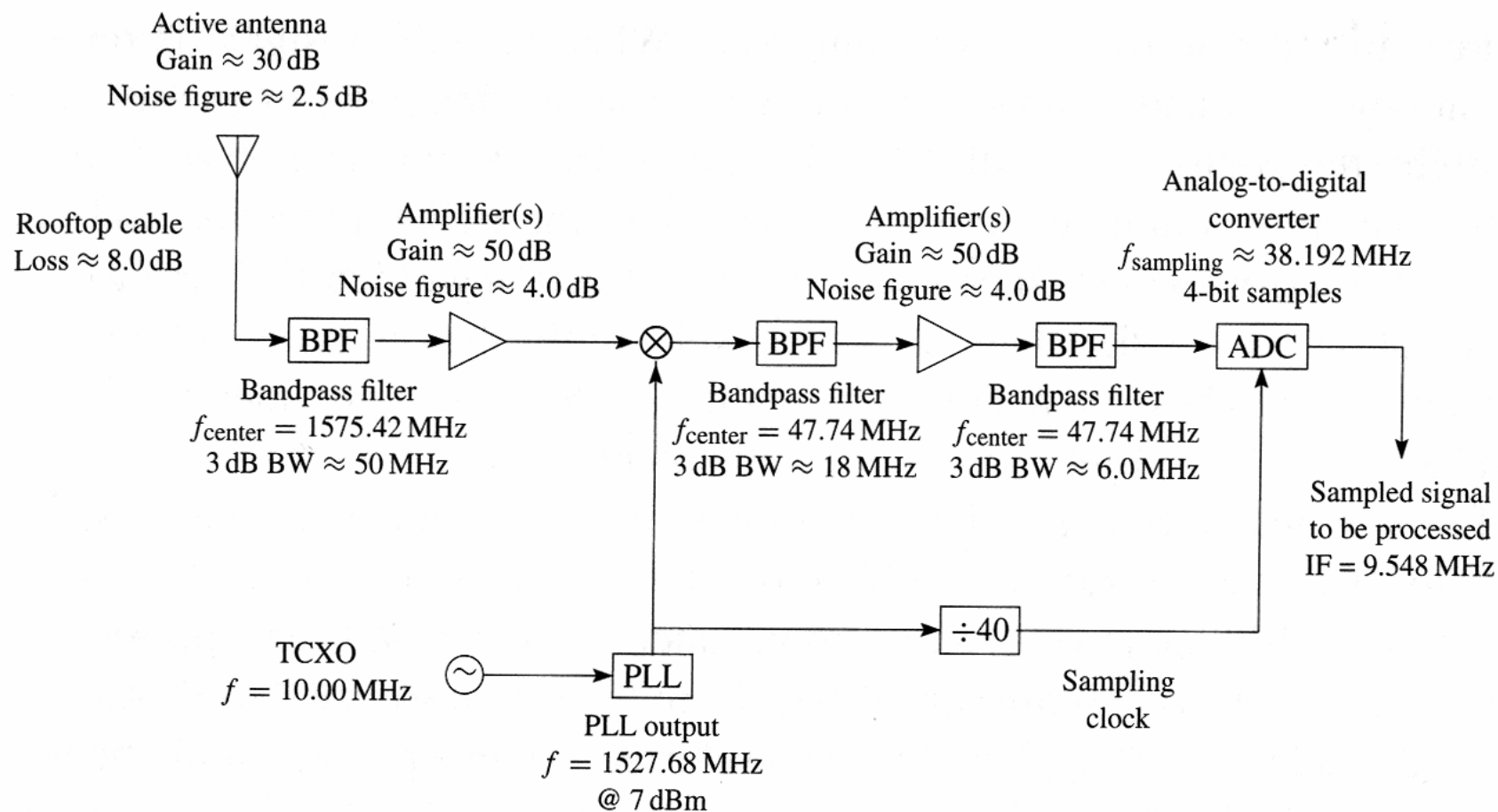
k_B = constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K)

T = temperatura

B = ancho de banda

que da un resultado de aproximadamente -141dBW para un ancho de banda de $B=2\text{MHz} \Rightarrow$ la señal analógica que resulta de la señal GPS incidente más el ruido térmico es demasiado débil para poder ser procesada por el conversor A/D \Rightarrow el front end utilizará una combinación de amplificadores, mezcladores y filtros para acondicionar el voltaje incidente.

Antenas y front ends GPS : Componentes



Antenas y front ends GPS : Antenas

- La antena es el primer filtro además de ser el transductor entre el medio de propagación y el receptor.
- Las antenas GPS tienen típicamente una impedancia de $50\ \Omega$ y una ROE (VSWR) de 2. Esto último garantiza que un 90% de la potencia pasa a través de la antena.
- La antena está diseñada para recibir ondas polarizadas circularmente a derechas, lo que proporciona una cierta supresión de multicamino.
- Los diagramas de antena normalmente evitan las señales provenientes de ángulos inferiores a 10° - 20° sobre el horizonte, donde la señal viene más degradada y donde el efecto de multipath puede ser más importante.

Antenas y front ends GPS : Antenas

Otro aspecto relevante de las antenas es si son activas o pasivas:

1. *Antenas activas*: están integradas con otros elementos del front end, como por ejemplo sus amplificadores para mejorar sus prestaciones(p. ej. Si tenemos una antena GPS en un barco y tenemos que amplificar la señal antes de tender un cable RF que añade un factor de pérdidas
2. *Antenas pasivas*: son antenas más independientes del front end que están colocadas cerca de la cadena RF analógica, en concreto, al primer amplificador.

Antenas y front ends GPS : Mezclador

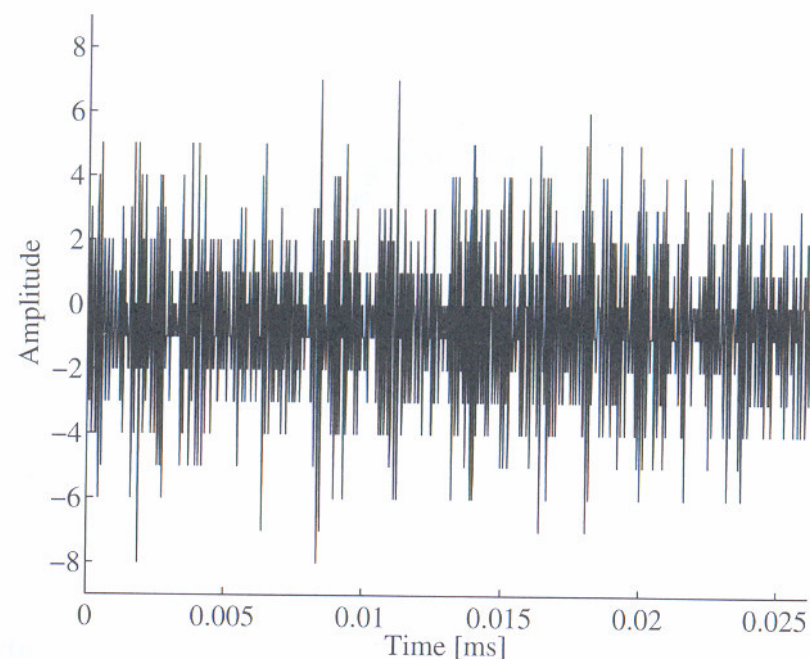
- La función principal del mezclador es bajar las portadoras de UHF a frecuencias intermedias (IF) preservando la estructura modulada de la señal.
- Hay tres buenas razones para hacer esto:
 1. Los conversores analógico-digitales operan a estas frecuencias intermedias.
 2. Es muy difícil fabricar filtros de banda muy estrecha (2-8 MHz) a altas frecuencias.
 3. Los efectos de reflexión pueden ser muy dañinos sobre la cadena RF si una amplificación de más de 100 dB se realiza en una sola frecuencia.

Antenas y front ends GPS : Conversor analógico-digital

- El conversor analógico digital (ADC) es responsable de la conversión de la señal analógica en una señal digital.
- Los parámetros que definen un conversor A/D son:
 1. *El número de bits*: típicamente 4 u 8 bits
 2. *Frecuencia máxima de muestreo*: alrededor de 60 MHz
⇒ ancho de banda de muestreo de 30 MHz
 3. *ancho de banda del input analógico*: hasta 300 MHz ⇒ se necesita un filtro paso banda antes del conversor A/C
 4. *nivel de señal de input*: mínimo de -20 dBW
- La introducción de una frecuencia de muestreo implica una segunda bajada de frecuencia a la frecuencia resultante de restar la de input y la de muestreo.

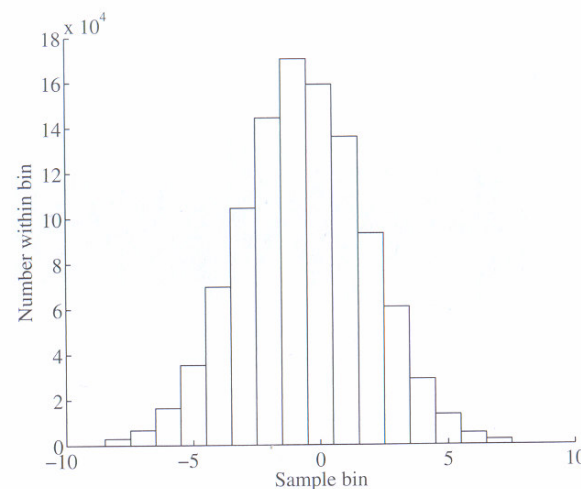
Antenas y front ends GPS : Ejemplo de datos muestreados

- Tomamos el ejemplo del diagrama anterior, donde tenemos
 - una frecuencia de muestreo de 38.192 MHz
 - una frecuencia intermedia de 9.548 MHz
 - muestreo en 4 bits



Antenas y front ends GPS : Ejemplo de datos muestreados

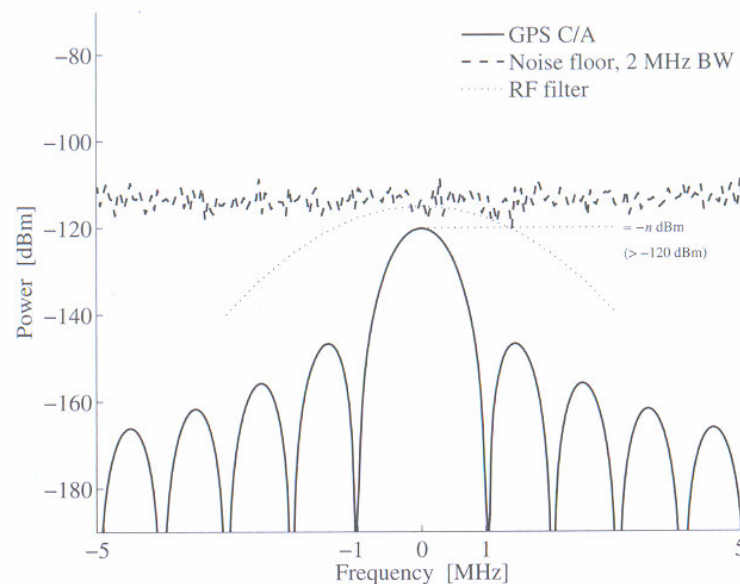
- Tomamos el ejemplo del diagrama anterior, donde tenemos
 - una frecuencia de muestreo de 38.192 MHz
 - una frecuencia intermedia de 9.548 MHz
 - muestreo en 4 bits



Antenas y front ends GPS : Ejemplo de datos muestreados

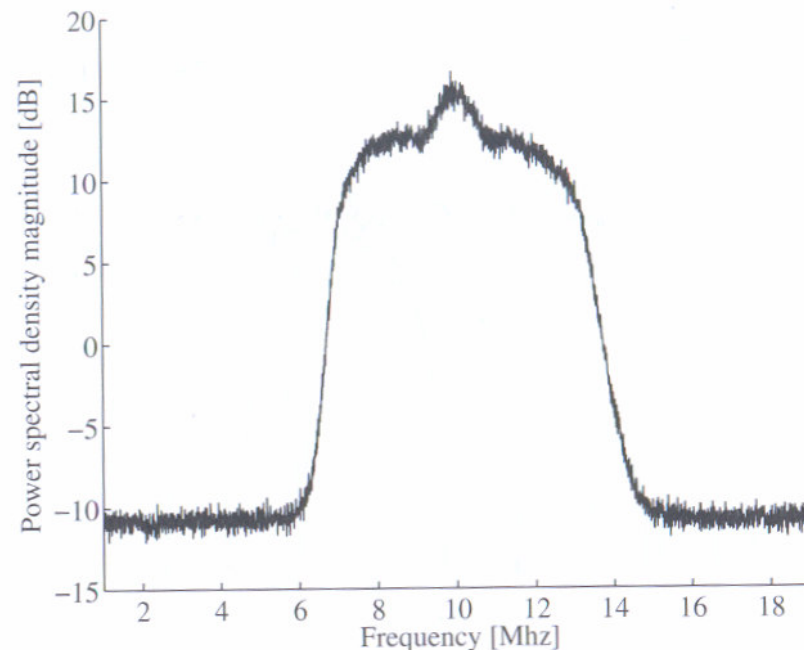
■ Tomamos el ejemplo del diagrama anterior, donde tenemos

- una frecuencia de muestreo de 38.192 MHz
- una frecuencia intermedia de 9.548 MHz
- muestreo en 4 bits



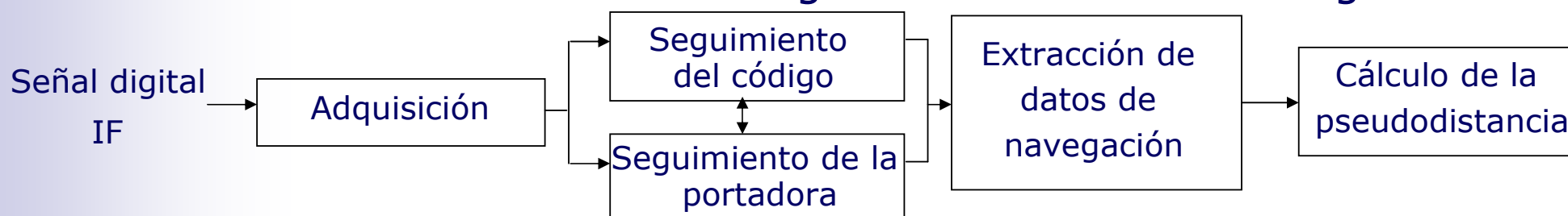
Antenas y front ends GPS : Ejemplo de datos muestreados

- Tomamos el ejemplo del diagrama anterior, donde tenemos
 - una frecuencia de muestreo de 38.192 MHz
 - una frecuencia intermedia de 9.548 MHz
 - muestreo en 4 bits



Sumario del la operación de un receptor GPS

- El procesado de señal de los sistemas de navegación por satélite se basa en una estructura de canales, donde canal corresponde a la vinculación a un satélite según la estructura de la figura



- *Adquisición*: El propósito de la adquisición es identificar todos los satélites visibles para el usuario. Si el satélite es visible, el proceso de adquisición debe determinar las siguientes dos propiedades de la señal: frecuencia y fase del código, es decir, el punto del bloque de datos en observación en el que comienza.
- *Seguimiento*: El propósito fundamental es refinar los valores de la fase de código y frecuencia así como de efectuar un seguimiento de la evolución de los mismos.

Adquisición y Seguimiento de la portadora y el código : Demodulación

- La señal L1 total a la salida del front end es

$$\begin{aligned} s^k(n) \cos w_{\text{IF}} t &= A_{\text{C/A}} C^k(n) \cdot D^k(n) \cos w_{\text{IF}} t \cos w_{\text{IF}} t \\ &= -\frac{A_{\text{C/A}}}{2} C^k(n) \cdot D^k(n) - \frac{A_{\text{C/A}}}{2} C^k(n) \cdot D^k(n) \cos 2w_{\text{IF}} t \end{aligned}$$

- Se multiplica por la portadora en IF

$$\begin{aligned} s^k(n) &= A_{\text{C/A}} C^k(n) \cdot D^k(n) \cos w_{\text{IF}} t + A_{\text{P}} P^k(n) \cdot D^k(n) \sin w_{\text{IF}} t \\ &= A_{\text{C/A}} C^k(n) \cdot D^k(n) \cos w_{\text{IF}} t + r(n) \end{aligned}$$

que, tras el filtrado resulta, salvo por constantes, en

$$C^k(n) \cdot D^k(n)$$

Adquisición y Seguimiento de la portadora y el código : Demodulación

- Si el resultado de mezclar con la señal IF generada localmente se multiplica por la réplica local del código se obtiene

$$\sum_{n=0}^{N-1} C^k(n+p) \cdot C^k(n) \cdot D^k(n) = N D^k(n) \delta_{n,m}$$

donde δ es la delta de Kronecker. De esta manera se extraen los datos de navegación.



Adquisición

- El propósito de la adquisición es determinar qué satélites están en el campo de visión así como valores aproximados de la frecuencia de la portadora y de la fase del código de sus señales.
- Los satélites se diferencian por 32 secuencias PRN diferentes que configuran el procedimiento llamado *code division multiple access* (CDMA).
- Es necesario sintonizar la fase del código para poder hacer uso de la propiedad de autocorrelación tan “afilada” de dicho código.
- La portadora de la señal input ha de sintonizarse también correctamente, con su Doppler corregido.

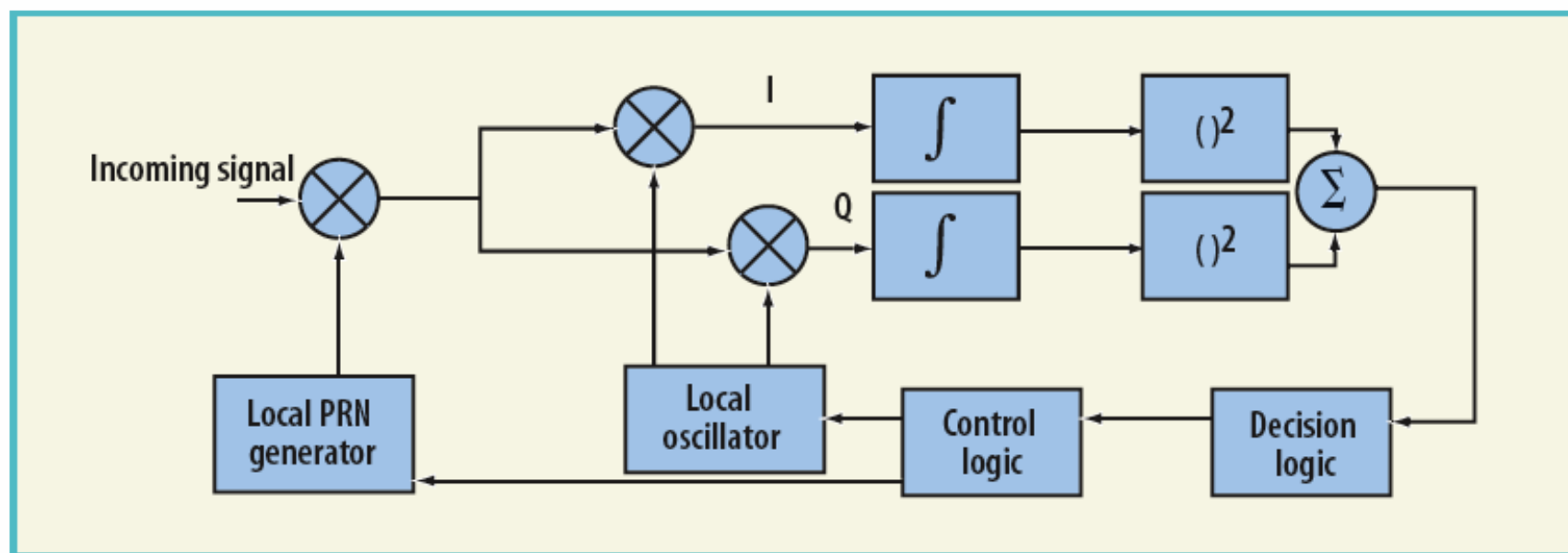
Adquisición

- Antes de asignar un canal a un satélite, ya hemos dicho que se han de identificar su pertenencia al conjunto de los satélites visibles. Hay dos maneras de realizar esta asignación:
 1. *Arranque en caliente*: el receptor usa la información de almanaque¹ almacenada previamente en su último uso.
 2. *Arranque en frío*: empieza de cero y necesita hacer uso del proceso de búsqueda o adquisición.
- Existen tres métodos de adquisición:
 1. Búsqueda serial
 2. Búsqueda paralela en el espacio frecuencial
 3. Búsqueda paralela de la fase del código

¹La información del almanaque es un subconjunto de los datos de efemérides con una exactitud inferior.

Adquisición por búsqueda serial

- Este método de búsqueda es común en los sistemas CDMA



Adquisición por búsqueda serial

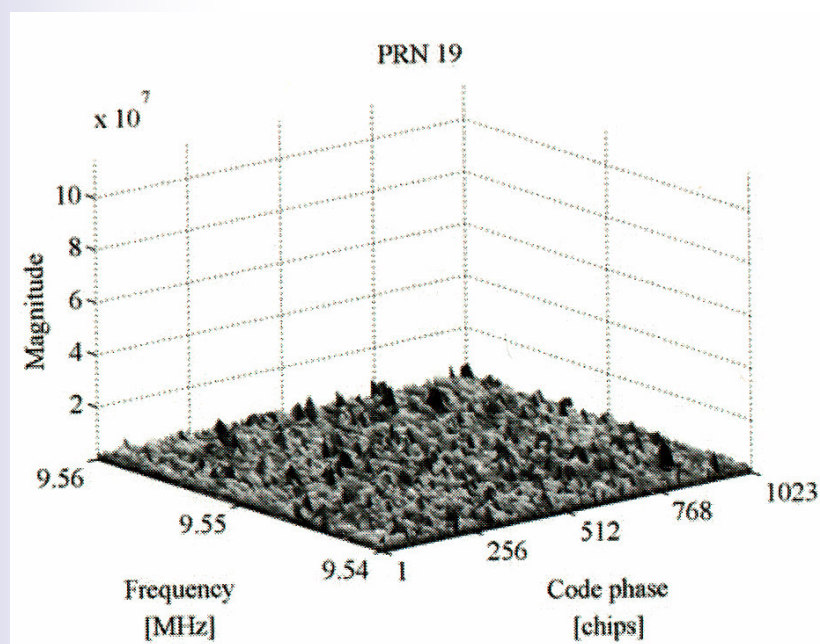
- Este método se basa en dos fases de “barrido”:
 - Un barrido de frecuencias en $IF \pm 10$ kHz, que es el margen típico por variación Doppler, en pasos de 500 Hz, y
 - Un barrido de fase del código a lo largo de las 1023 fases posibles

$$\underbrace{1023}_{\text{fases del código}} \underbrace{\left(2^{\frac{10,000}{500}} + 1\right)}_{\text{frecuencias}} = 1023 \cdot 41 = 41,943 \text{ combinaciones}$$

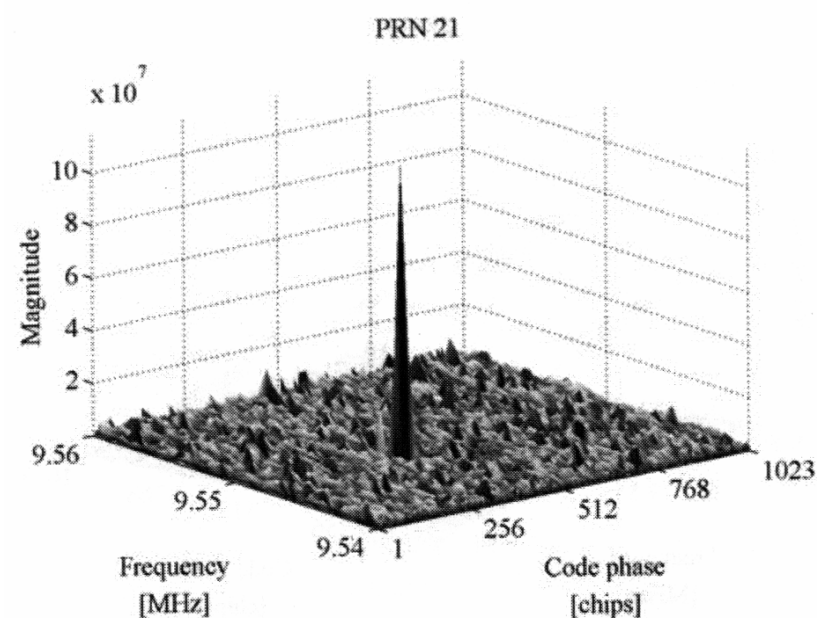
Adquisición por búsqueda serial

- *Generación de la secuencia PRN* : los 32 códigos C/A se generan off-line y permanecen almacenados; cada código con cada una de sus fase posibles (es decir, comenzando en cada chip posible, lo que implica 32×1023 operaciones de comprobación) se multiplicará por la señal digital en IF que proviene del front end. Estas secuencia han de estar muestreadas al mismo nivel que la señal IF: en vez de 1023 chips tendremos 38,192 muestras chip si la frecuencia de muestreo es 38.192 MHz.
- *Generación de la portadora*: Se han de generar dos señales de portadora, desfasadas 90° una de la otra (seno y coseno).
- *Integración y elevación al cuadrado*: Si se han alineado el código local y el de la señal, y la frecuencia está sintonizada correctamente, la integral, es decir, la correlación no es el valor despreciable que se obtiene en caso contrario.

Adquisición por búsqueda serial



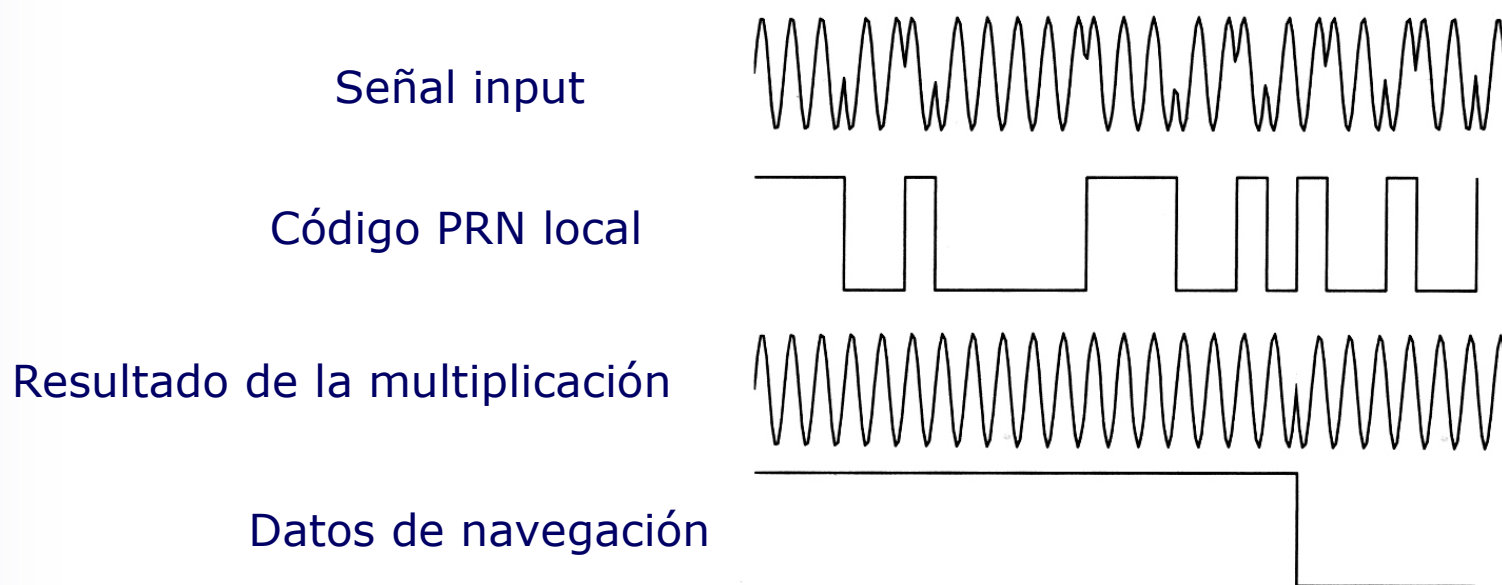
El satélite con PRN19 no es visible ya que no se presenta ningún pico de correlación.



El satélite con PRN21 es visible ya que no se presenta ningún pico de correlación.

Búsqueda paralela en el espacio frecuencial

- La idea es eliminar uno de los dos parámetros de la búsqueda, en concreto el barrido en frecuencia. Esto se consigue multiplicando la señal por el código PRN sin portadora y se analiza el espectro resultante.



Búsqueda paralela en la fase del código

- La cantidad de pasos de búsqueda se simplifica más aún si eliminamos la búsqueda en la fase del código además de la frecuencia. Esto se realiza multiplicando la transformada discreta de Fourier (DFT) de cada código con la DFT de la señal digital IF. Luego se hace la transformada inversa y se calcula la fase del código localizando el máximo.
- Este método se basa en la siguiente propiedad

$$F(f \otimes g) = F(f) \cdot F(g)$$

donde F significa transformada de Fourier y en la circularidad de la correlación/convolución discretas.

Comparación de los algoritmos de adquisición

Algoritmo	Tiempo de Ejecución	Repeticiones	Complejidad
Búsqueda serial	87	41,943	Baja
Búsqueda paralela en el espacio de frecuencia	10	1023	Media
Búsqueda paralela en la fase del código	1	41	Alta

Seguimiento de la portadora y el código

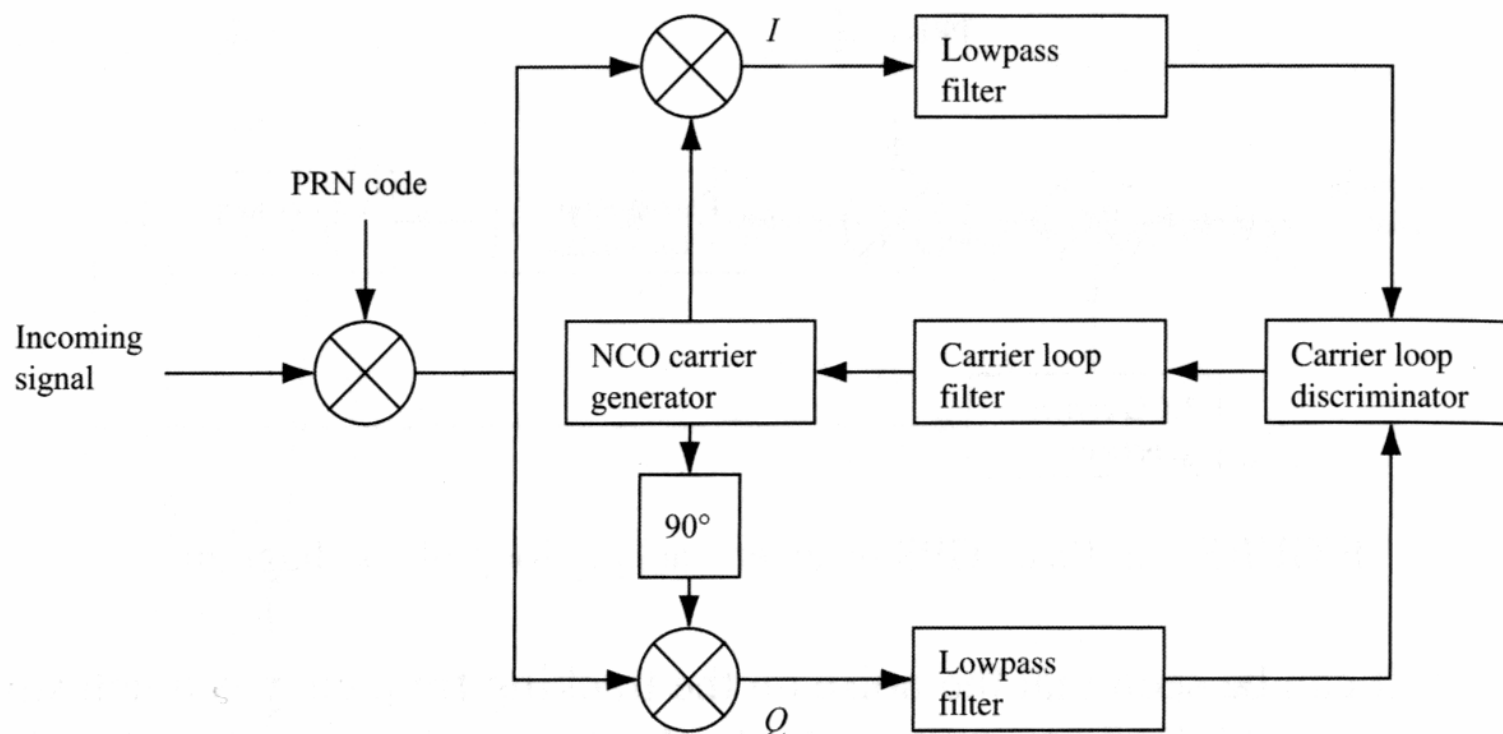
- *Motivación:* La adquisición proporciona solamente una estimación tosca de la frecuencia y la fase del código. El propósito principal del seguimiento es redefinir estos valores, seguir su evolución y demodular los datos de navegación.

Seguimiento de la portadora y el código

- *Motivación:* La adquisición proporciona solamente una estimación tosca de la frecuencia y la fase del código. El propósito principal del seguimiento es redefinir estos valores, seguir su evolución y demodular los datos de navegación.
- *Metodología:*
 1. Primero se multiplica la señal de input por la portadora.
 2. Después se multiplica la señal por una réplica del código y el output será el mensaje de navegación.

Seguimiento de la portadora

- Seguimiento de la portadora para señales con un deslazamiento de fase: bucle de Costas (tipo especial de *phase lock loop* (PLL))



Seguimiento de la portadora

El objetivo del bucle de Costas es tratar de mantener toda la energía en el canal en fase I

$$D^k(n) \cos w_{\text{IF}} n \cos (w_{\text{IF}} n + \varphi) = \frac{1}{2} D^k(n) \cos \varphi + \frac{1}{2} D^k(n) \cos (2w_{\text{IF}} n + \varphi)$$

$$D^k(n) \cos w_{\text{IF}} n \sin (w_{\text{IF}} n + \varphi) = \frac{1}{2} D^k(n) \sin \varphi + \frac{1}{2} D^k(n) \sin (2w_{\text{IF}} n + \varphi)$$

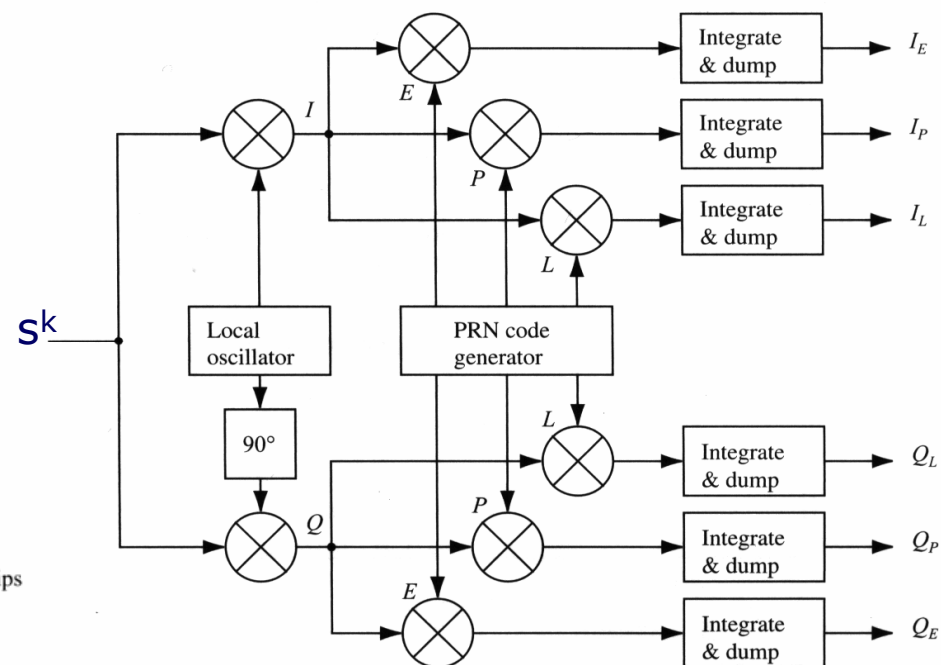
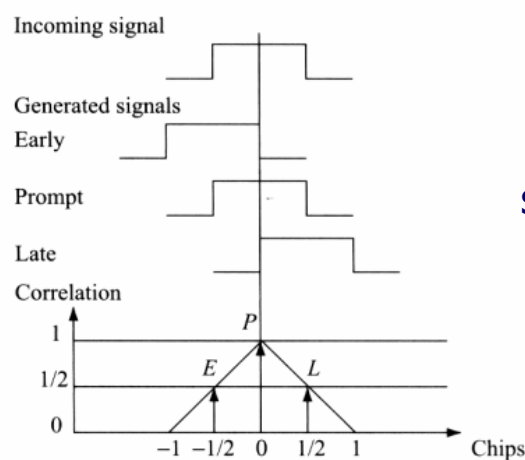
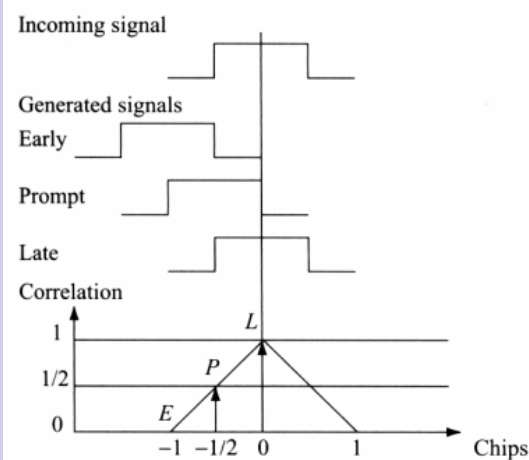
$$I^k = \frac{1}{2} D^k(n) \cos \varphi$$

$$Q^k = \frac{1}{2} D^k(n) \sin \varphi$$

$$E = \frac{Q^k}{I^k} = \tan \varphi \Rightarrow \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{Q^k}{I^k} \right)$$

Seguimiento del código

- Se lleva a cabo a través de un *delay lock loop* (DLL)



Procesado de datos para el Posicionamiento

- *Recuperación de los datos de navegación:* la salida del grupo de seguimiento es el valor del brazo I del bloque de seguimiento \Rightarrow teóricamente podemos obtener un bit cada ms, pero debido al ruido y a la debilidad de la señal es más seguro utilizar bits de 20 ms, una vez que se ha conseguido *sincronización de bits*
- *Registro de los datos de s^k navegación:* la descripción completa del codificado de la señal se encuentra en el documento GPS Interface Control Document ICD-GPS-200 (1991). Explica:
 1. *Cómo localizar el preámbulo*
 2. *Cómo extraer los datos de navegación*

Procesado de datos para el Posicionamiento

■ Los pasos principales son:

1. Cálculo de la posición de los satélites a partir de los datos de efemérides
2. Estimación de la pseudodistancia a partir del retardo medido
 - i. Para encontrar un conjunto inicial de pseudodistancias al menos 12s de datos s_k son necesarios lo que corresponde a los dos primeros subframes del mensaje de navegación
 - ii. Para pseudodistancias posteriores, el receptor mueve los índices por ejemplo 100 ms si está configurado para calcular posiciones 10 veces por segundo.

Procesado de datos para el Posicionamiento

3. Cálculo de la posición del receptor a través de las ecuaciones

$$\rho_1 = \sqrt{(x_1 - x_p)^2 + (y_1 - y_p)^2 + (z_1 - z_p)^2} + c \delta t$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x_2 - x_p)^2 + (y_2 - y_p)^2 + (z_2 - z_p)^2} + c \delta t$$

$$\rho_3 = \sqrt{(x_3 - x_p)^2 + (y_3 - y_p)^2 + (z_3 - z_p)^2} + c \delta t$$

$$\rho_4 = \sqrt{(x_4 - x_p)^2 + (y_4 - y_p)^2 + (z_4 - z_p)^2} + c \delta t$$

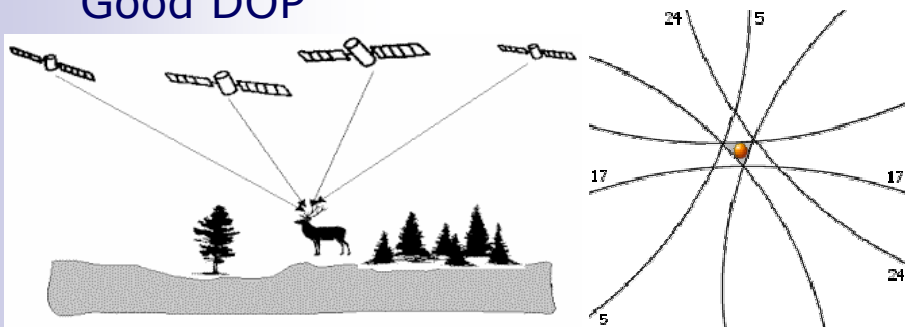
que pueden ser más de cuatro si tenemos más satélites en el campo de recepción \Rightarrow uso del método de los mínimos cuadrados

Procesado de datos para el Posicionamiento : Dilución of Precisión

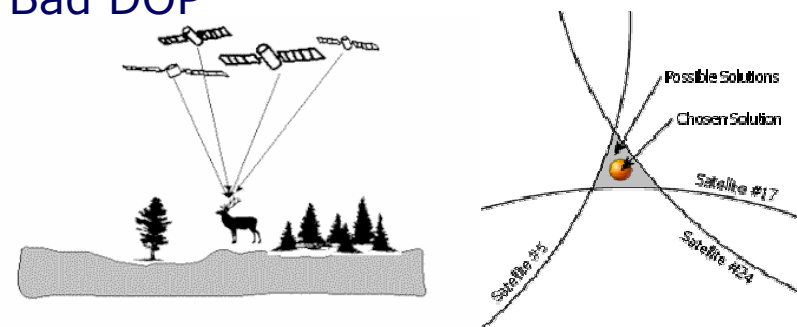
La *dilución de precisión* (DOP) es una medida de cómo la distribución geométrica de los satélites en el espacio puede afectar la exactitud de las medidas y se calcula como la covariancia de los estimadores de posición.

DOP value	Rating
1	Ideal
2-3	Excellent
4-6	Good
7-8	Moderate
9-20	Fair
21-50	Poor

Good DOP



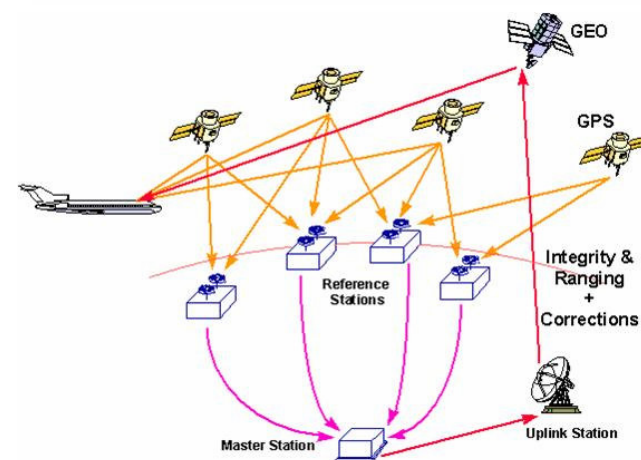
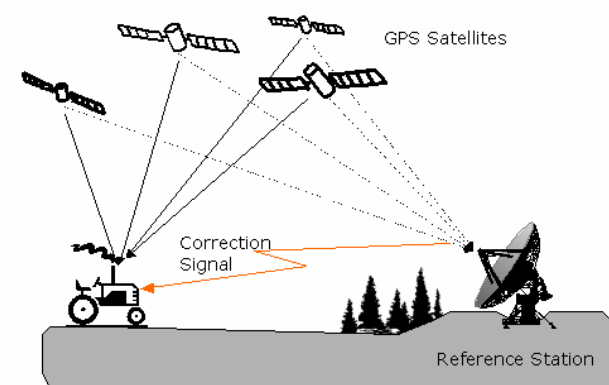
Bad DOP



Otras posibilidades del GPS: GPS Diferencial

Differential GPS El GPS diferencial necesita al menos dos receptores y se basa en el hecho de que los errores tienen un grado de correlación espacial alto entre dos receptores cercanos. Por tanto, si la posición de un receptor se conoce con una exactitud de, por ejemplo, 15 m, la posición relativa de uno con respecto al otro se puede determinar con mucha mayor exactitud ($\sim 10\text{cm}$).

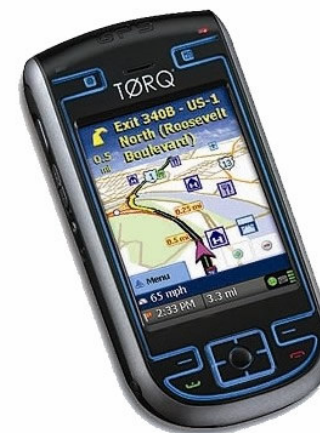
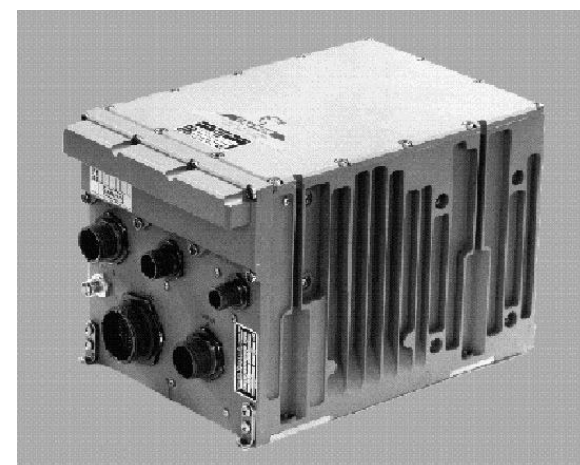
Si una estación de referencia hace uso de un sistema satelital geoestacionario de comunicaciones para DGPS tenemos un sistema que se llama de GPS extendido como el WAAS (Wide Area Augmentation System) o el EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System).



Otras posibilidades del GPS : Integración del GPS con otros sensores y asistencia en red

Hay muchas combinaciones para mejorar el rendimiento de un receptor GPS:

1. Integración GPS+ Sistema Inercial (acelerómetros, giróscopos)
2. Integración del GPS en sistemas de movimiento rodado.
3. Asistencia por redes: GSM, TDMA, CDMA, WCDMA/UMTS.



Señales GPS Modernas

- **L2C (1227.6 MHz).** Permitirá el desarrollo de receptores civiles de dos frecuencias, que permiten introducir una corrección a los errores de retardo en la ionosfera. Será interoperable con el sistema japonés Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)
- **L5 (1176.45 MHz).** Se trata de un servicio de radionavegación aeronáutica para labores de seguridad y salvamento. Será compatible con Galileo, GLONASS y QZSS, con el objetivo de ser interoperable. Se transmitirá su señal con más potencia que las señales civiles actuales y tendrá mayor ancho de banda. Su frecuencia más baja facilitará su utilización en interiores.
- **L1C (1575.42 MHz).** Obedece a un acuerdo entre EE.UU. Y la U.E. de tener una señal L1 compatible e interoperable con Galileo. Tendrá más potencia que la L1.
- **Código M.** Es el código militar modernizado. Empleará una modulación similar a la de la señal de Galileo.

Galileo

- Es un sistema basado como el GPS en Code Division Multiple Access (CDMA).
- Se beneficia de un mejor conocimiento del procesamiento y está definido de acuerdo a requisitos más exigentes.
- Existen dos satélites en pruebas que ya están en órbita: Giove A y Giove B.



Señal Galileo

- Galileo proporcionará seis señales de navegación de polarización circular a derechas en las frecuencias 1,164-1,215 MHz (banda E5), 1,260-1,300 MHz (banda E6) y 1,559-1,592 MHz (banda E2-L1-E1). Las señales L1 y E5a son comunes con GPS, lo que es de gran utilidad para la interoperabilidad.
- Las señales se modulan según el procedimiento conocido como *coherent adaptive subcarrier modulation* (CASM) en amplitud y *binary offset carrier modulation* (BOC) en fase.

Galileo en Europa

- La Agencia Espacial Europea ofrece una serie de servicios e información a todo aquel que esté interesado en desarrollar aplicaciones para el European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) y para Galileo.
- Hay dos sedes para Galileo:
 - El Radio Navigation Laboratory, situado en el European Space Research and Technology Centre (ESTEC) en Holanda
 - La EGNOS Applications Specific Qualification Facility (ASQF) en el Centro de Control Master del EGNOS en Torrejón.