

Evolución de la navegación por satélite: Galileo y sistemas híbridos

José López Vicario
Gonzalo Seco Granados

PID_00185450



Los textos e imágenes publicados en esta obra están sujetos –excepto que se indique lo contrario– a una licencia de Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 España de Creative Commons. Podéis copiarlos, distribuirlos y transmitirlos públicamente siempre que citéis el autor y la fuente (FUOC. Fundació para la Universitat Oberta de Catalunya), no hagáis de ellos un uso comercial y ni obra derivada. La licencia completa se puede consultar en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.es>

Índice

Introducción	5
Objetivos	7
1. Sistemas de aumentación	9
1.1. GPS diferencial	9
1.2. WAAS	16
1.3. EGNOS	20
2. El sistema Galileo	23
2.1. Descripción del sistema Galileo	23
2.1.1. Servicios Galileo	24
2.1.2. Bandas frecuenciales	25
2.1.3. Arquitectura Galileo	26
2.2. Estructura de la señal Galileo	30
2.2.1. Señal Galileo E1	31
2.2.2. Señal Galileo E5	41
2.2.3. Señal Galileo E6	46
2.3. Arquitectura del receptor	48
3. Sistemas multi-frecuencia/multi-constelación	53
4. Sistemas híbridos basados en sensores inerciales	56
4.1. Sistemas INS	56
4.2. Filtro de Kalman	57
4.3. Esquemas de hibridación	61
Resumen	70
Ejercicios de autoevaluación	77
Solucionario	80
Abreviaturas	81
Bibliografía	83
Anexo	84

Introducción

Tal y como se ha presentado en el módulo "El sistema GPS", un receptor convencional GPS es capaz de ofrecer precisiones mejores de 10 m el 95% del tiempo. No obstante, existen aplicaciones que requieren mayores prestaciones, como son, por ejemplo, las aplicaciones *safety-of-life*, siendo la aviación civil uno de sus casos más representativos, donde la seguridad es un aspecto crítico y se requieren altos niveles de precisión, integridad y una disponibilidad continua del sistema. Por ese motivo, han ido apareciendo en los últimos años una serie de sistemas complementarios y alternativos a GPS.

Este módulo tiene como objetivo presentar dichos sistemas, centrándose en concreto en los más importantes. En primer lugar, en el apartado 1 se describen los sistemas de aumentación, los cuales tienen como objetivo mejorar las prestaciones del usuario GPS proveyendo a este con información adicional sobre las medidas obtenidas con las señales de los diferentes satélites. Por un lado, se presenta el concepto de GPS diferencial (*differential GPS*, abreviado DGPS), basado en el uso de estaciones terrestres y, seguidamente, se presentan los sistemas SBAS (*satellite-based augmentation systems*), los cuales siguen el mismo concepto pero son capaces de aumentar la cobertura del sistema de aumentación al utilizar una constelación de satélites.

Hecho esto, en el apartado 2 se presenta la solución de navegación por satélite europea, conocida con el nombre Galileo, que nació con el objetivo de ofrecer mejores prestaciones que GPS, incluyendo además un mecanismo de integridad para poder satisfacer los requisitos de las aplicaciones *safety-of-life*. Se describen en detalle las señales que transmite Galileo en las tres bandas frecuenciales que utiliza: E1, E5 y E6, dedicando especial atención a los aspectos más novedosos de las mismas, así como al impacto que tienen en el receptor. Con referencia a lo primero, se presentan las señales BOC así como las dos formas ingeniosas que utiliza Galileo para conseguir señales de envolvente constante, que son las técnicas Interplex en E1 y E6, y AltBOC en E5. Se ilustra también el espectro de las diferentes señales. La utilización de señales BOC tiene un impacto en el receptor porque la correlación de dichas señales presenta máximos locales que pueden generar falsos puntos de enganche en el lazo de seguimiento de código. Se proporciona una clasificación de las diferentes técnicas que existen para combatir la ambigüedad causada por dichos máximos locales y se describe brevemente el principio de funcionamiento de las técnicas de cada familia.

Finalmente, se introducen una serie de técnicas diseñadas para la mejora de los sistemas de navegación por satélite basadas en la utilización de receptores con capacidad multi-frecuencia/multi-constelación (apartado 3) o en la hibridación de las señales GNSS con medidas de sensores inerciales (apartado 4).

Objetivos

Los objetivos de este módulo son los siguientes:

- 1.** Presentar los sistemas de aumentación, centrándose en los casos de DGPS y SBAS.
- 2.** Describir el sistema Galileo, presentando la arquitectura del sistema, los servicios ofrecidos.
- 3.** Exponer los parámetros básicos de las señales de Galileo y explicar las modulaciones y técnicas de multiplexado que adopta y que no estaban presentes en la señal básica de GPS. Analizar el impacto que tiene el uso de señales BOC en el receptor y esbozar las técnicas que existen para combatir la existencia de falsos puntos de enganche del lazo de código.
- 4.** Introducir el principio de funcionamiento de los receptores con capacidad multi-frecuencia/multi-constelación.
- 5.** Presentar la técnica de hibridación de señales GNSS con medidas de sensores inerciales.

1. Sistemas de aumentación

Los sistemas de aumentación son aquellos sistemas que proporcionan a los receptores GPS información adicional para que estos mejoren el cálculo de la posición.

La información que los sistemas de aumentación proporcionan a los receptores GPS puede ser desde datos sobre las fuentes de error de la señal, como el retardo ionosférico, derivas en los relojes o errores en las efemérides, hasta el estado de la propia señal. En este apartado, se presentan algunos de los sistemas de aumentación más importantes: el GPS diferencial, el sistema WAAS y el sistema EGNOS.

1.1. GPS diferencial

El método GPS diferencial¹ consiste en el uso de una o más estaciones de referencia, situadas en posiciones conocidas, para mejorar la solución de posición del receptor del usuario.

⁽¹⁾En inglés, *differential GPS* (DGPS).

Estas estaciones están equipadas con (al menos) un receptor GPS y transmiten al usuario diferentes tipos de información mediante un enlace de comunicaciones, utilizando o bien enlaces radio (con frecuencias por debajo de los 300 KHz o en la banda L) o mediante la conexión a Internet. Concretamente, se envían los siguientes datos al usuario:

- Medidas de corrección de las pseudodistancias, del reloj del satélite y de las efemérides. En algunos casos, se envían datos del reloj y efemérides que sustituyen a los transmitidos por el propio satélite.
- Medidas obtenidas por la estación de referencia, como por ejemplo, las pseudodistancias y la fase de la portadora.
- Datos de la integridad de la señal del satélite, como por ejemplo, indicaciones en cuanto al uso de los satélites visibles o datos estadísticos sobre la precisión de las correcciones enviadas.
- Datos adicionales como la localización, el estado y los factores meteorológicos de la propia estación de referencia.

Básicamente, este método explota el hecho de que la estación de referencia se encuentra en una posición conocida y, por tanto, es capaz de obtener, con alta exactitud, el sesgo de las medidas obtenidas de los satélites visibles. En el caso de que el receptor del usuario se encuentre próximo a dicha estación, se pueden reducir aquellos errores presentes en el mismo que estén correlados con los errores observados en la estación de referencia. Algunos de estos errores son los siguientes:

1) Errores del reloj del satélite. El error provocado por la imprecisión del reloj del satélite provoca el mismo efecto en las medidas de pseudodistancia y fase de la portadora independientemente de donde se encuentre el receptor del usuario. Por tanto, es uno de los errores más fáciles de corregir, teniendo además en cuenta que la variación de los errores observados en el reloj varían muy lentamente, obteniéndose valores de desviación de Allan del orden de entre 3×10^{-12} y 6×10^{-12} s/s. En términos de pseudodistancia, esto se traduce en variaciones entre 1 y 2 mm/s.

Desviación de Allan

La desviación de Allan es una medida comúnmente utilizada para caracterizar la estabilidad de un oscilador (o reloj). Considerándose un oscilador con la siguiente salida:

$$y(t) = \sin(2\pi f_n t + \phi(t)) \quad (1)$$

donde f_n es la frecuencia nominal del oscilador y $\phi(t)$ es el error presente en el mismo, el cual es variante con el tiempo, se define la desviación de Allan como:

$$\sigma_A(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2} E[(v_{k+1}(\tau) - v_k(\tau))^2]} \quad (2)$$

donde τ es el tiempo de observación utilizado para medir la fracción de desviación instantánea de la frecuencia del oscilador respecto a la frecuencia nominal, expresada como:

$$v_k(\tau) = \frac{\phi(t_k + \tau) - \phi(t_k)}{2\pi f_n \tau} \quad (3)$$

siendo t_k el instante de medida de dicha desviación instantánea.

Ejemplo

Considerad que un usuario GPS desea corregir el error del reloj correspondiente a uno de los satélites visibles y, para ello, utiliza la medida de corrección facilitada por una estación de referencia DGPS. Teniendo en cuenta que la desviación de Allan de la estabilidad del reloj de dicho satélite es de 4×10^{-12} s/s y que la información provista por DGPS no contiene errores, se pide lo siguiente:

a) Determinad la contribución de error en distancia introducida por la deriva del reloj en el caso de que la medida de corrección se corresponda con el instante t_0 y se aplique en el receptor del usuario en el instante $t_1 = t_0 + 30$ s.

b) Considerad que se define f_c como la frecuencia utilizada por la estación de DGPS para señalar las medidas instantáneas de corrección del reloj. Determinad entonces el valor de f_c mínimo necesario para que la contribución de error en distancia introducida por el reloj sea menor a 0,5 m.

Solución

a) Antes de calcular cuál es la contribución del error introducida por la deriva del reloj, debemos determinar cuál es la variación del error expresada en metros por segundo. Para

ello, determinamos la variación de pseudodistancia por segundo de una señal GPS, cuyo satélite tiene una variación en el reloj de 4×10^{-12} s/s, como:

$$\dot{\rho} = c\sigma_A(\tau) = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \times 4 \cdot 10^{-12} \text{ s/s} = 1,2 \text{ mm/s} \quad (4)$$

Hecho esto, se puede calcular el error cometido en el instante $t_1 = t_0 + 30$ s de la siguiente manera. En primer lugar se considera que la corrección aplicada a partir de la información del DGPS no contiene errores y, por tanto, el error cometido en el instante t_0 es igual a 0 m. No obstante, la corrección no es válida en el instante t_1 debido a la variación del error del reloj. Utilizando entonces la variación en pseudodistancia calculada arriba y teniendo en cuenta el tiempo transcurrido, se puede obtener el error obtenido de la siguiente manera:

$$e_\rho = \dot{\rho}\Delta t = \dot{\rho}(t_1 - t_0) = 1,2 \text{ mm/s} \times 30 \text{ s} = 36 \text{ mm} \quad (5)$$

b) En este apartado se debe obtener cuál es el máximo tiempo que puede transcurrir entre dos correcciones de reloj. Es decir, teniendo en cuenta que ese tiempo se puede expresar como Δt y en el apartado anterior se observó que el error en pseudodistancia correspondiente a la deriva del reloj venía dado por $e_\rho = \dot{\rho}\Delta t$, uno debe obtener el valor de Δt que cumple la siguiente relación:

$$e_\rho = \dot{\rho}\Delta t \leq 0,5 \text{ m} \Rightarrow \Delta t \leq \frac{0,5 \text{ m}}{\dot{\rho}} = \frac{500 \text{ m}}{1,2 \text{ mm/s}} = 416,6 \text{ s} = 416,6 \text{ s} \approx 7 \text{ min} \quad (6)$$

Una vez obtenido el tiempo entre medidas, se puede calcular f_c como la inversa de ese tiempo:

$$f_c = \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{416,6 \text{ s}} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Hz} \quad (7)$$

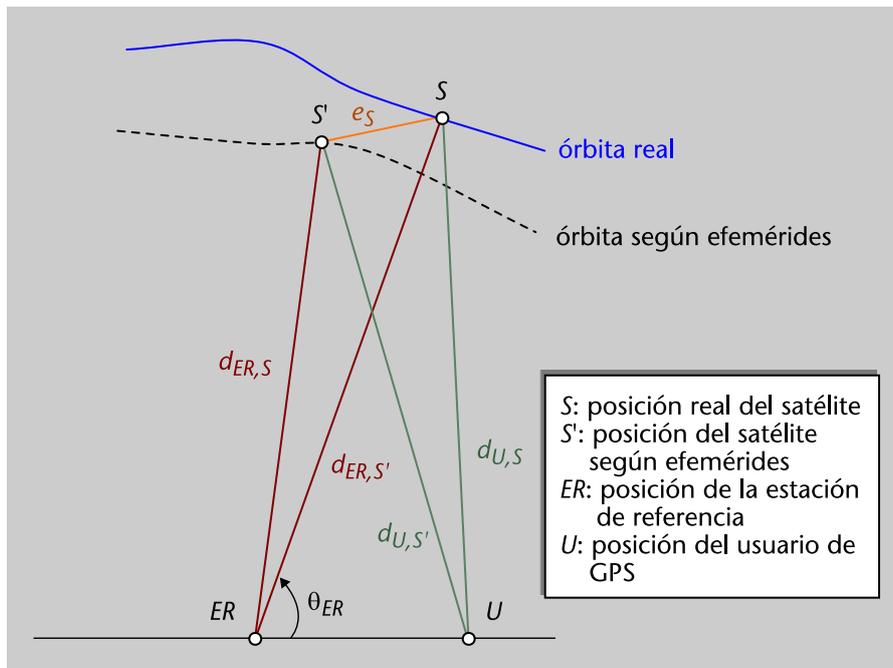
Observándose que la frecuencia necesaria para señalar la corrección de la deriva del reloj es significativamente baja. Esto es debido a que los errores observados en el reloj varían muy lentamente. No obstante, tal como se ve a continuación en la parte de teoría, este no es el único error que debe ser corregido por DGPS.

2) Errores de predicción de efemérides. Las efemérides que transmiten cada satélite son en realidad predicciones de las mismas calculadas por el segmento de control terrestre. Por tanto, cuando el receptor del usuario utiliza las mismas para calcular la posición del satélite, esta puede sufrir de cierto error. Tal como se ha comentado anteriormente, la estación de referencia conoce con exactitud su posición y puede realizar una estimación del error inducido por las efemérides. No obstante, dicho error sí que depende de la posición del receptor en este caso (véase figura 1). No obstante, si el usuario se encuentra próximo a la estación de referencia, la diferencia entre los errores observados es bastante baja, ya que las líneas de visión directa entre el satélite y ambos receptores son muy similares. Una aproximación para la diferencia de errores existente, válida cuando el usuario y la estación de referencia se encuentran a menos de 1.000 km y el ángulo de elevación donde el satélite se encuentra respecto a la estación de referencia, θ_{ER} , es mayor que 5° , es la dada por la expresión siguiente (Kaplan, E. D., Hegarty, C. J.; 2006):

$$e_{ER} - e_U \leq \frac{e_S}{d_{ER,S}} d_{ER,U} \sin^2 \theta_{ER} \quad (8)$$

donde $e_{ER} = d'_{ER,S} - d_{ER,S}$ y $e_U = d'_{U,S} - d_{U,S}$ son los errores entre las distancias reales, $d_{ER,S}$ y $d_{U,S}$, y las estimadas en la estación de referencia y el usuario, $d'_{ER,S}$ y $d'_{U,S}$, respectivamente; $d_{ER,U}$ es la distancia existente entre la estación de referencia y el usuario; y e_S es la distancia existente entre la posición real del satélite y la dada por las efemérides. En cuanto a la variación temporal, esta suele estar entre 2 y 6 cm/min.

Figura 1. Variación del error de predicción de efemérides



Ejemplo

Calculad una cota máxima para la diferencia de errores existente entre el error de predicción de efemérides observado en un receptor de un usuario GPS y el observado en una estación de referencia DGPS. Para ello considerad el caso donde dichos errores se corresponden a un satélite con elevación mayor a 5° , siendo e_S igual a 3 m y $d_{ER,U}$ igual a 100 km.

Solución

En primer lugar, se debe tener en cuenta que el satélite se encontrará a más de 20.000 km de la estación de referencia (es decir, $d_{ER,U} > 20.000$ km), ya que la órbita de un satélite GPS tiene aproximadamente 26.600 km de radio y el radio medio de la Tierra es igual a 6.371 km. Por otro lado, de los datos del problema, se sabe que $e_S = 3$ m, $d_{ER,U} = 100$ km y $\theta_{ER} > 5^\circ$. Por tanto, se puede utilizar la fórmula presentada en teoría, obteniéndose que la diferencia de errores será menor a:

$$e_{ER} - e_U \leq \frac{e_S}{d_{ER,S}} d_{ER,U} \sin^2 \theta_{ER} \leq \frac{3 \text{ m}}{20.000 \text{ km}} 100 \text{ km} = 1,5 \text{ cm} \quad (9)$$

en el caso de considerar satélites con elevaciones mayores a 5° . Obsérvese que para obtener la cota máxima se ha tenido en cuenta que $\sin^2 \theta_{ER} \leq 1$.

3) Errores debidos a efectos troposféricos. La velocidad de las ondas electromagnéticas varían al atravesar la troposfera dependiendo de la temperatura, presión y humedad relativa. En este caso, la diferencia de errores observados en el usuario y la estación de referencia también variará con la distancia $d_{ER,U}$ al depender dichos errores, entre otros parámetros, del ángulo de la línea de

visión directa existente entre el receptor GPS y el satélite. En este caso en concreto, el error varía más rápido con la distancia que en el caso anterior, habiéndose realizado pruebas experimentales que muestran que pueden obtenerse diferencias de errores del orden de 40 cm en situaciones con $d_{ER,U}$ igual a 25 km y θ_{ER} mayor a 5° . En el caso de que exista una diferencia de altitud entre el usuario y la estación de referencia, la diferencia de errores es aún mayor.

Ejemplo de errores debidos a efectos troposféricos

En el caso de que el usuario se encuentre a 1 km por encima de la estación de referencia (en el caso de una aeronave, por ejemplo) la diferencia de errores puede ser de 2 m. La variación temporal en este caso depende en gran medida del ángulo de elevación. Para elevaciones mayores de 10° , las variaciones pueden estar alrededor de 64 cm/min, pudiendo llegar a los 2 m/min en el caso de elevaciones iguales a 5° .

4) Errores por efectos ionosféricos. La ionosfera es un medio dispersivo que introduce retardos en las señales electromagnéticas que la atraviesan debido a la alta densidad de electrones libres presente en la misma. En este caso, el retardo introducido también depende de la posición del receptor, ya que este retardo depende del ángulo de elevación y del contenido de electrones totales² existente en el camino de la señal. En este caso en concreto, las diferencias de errores también dependen del valor del TEC, aumentándose en gran medida si la ionosfera se encuentra altamente cargada. Valores típicos observados en las diferencias de errores son del orden de 2 m para valores de $d_{ER,U}$ igual a 400 km el 95% del tiempo. En cuanto a la variación temporal de las mismas, estas dependen en gran medida de la zona geográfica, observándose variaciones normalmente menores a los 8 cm/min en latitudes medias, pero de hasta 65 cm/min en otras regiones.

⁽²⁾En inglés, *total electron content* (TEC).

Salvo el primer error, los errores listados arriba presentan un nivel de correlación más baja a medida que el receptor del usuario se aleja de la estación de referencia. Otros errores, no obstante, como aquellos provocados por las componentes multi-camino de la señal, la interferencia y el ruido del receptor, no están correlados con los receptores de las estaciones de referencia por la propia naturaleza de los mismos y, por tanto, no pueden corregirse mediante esta técnica.

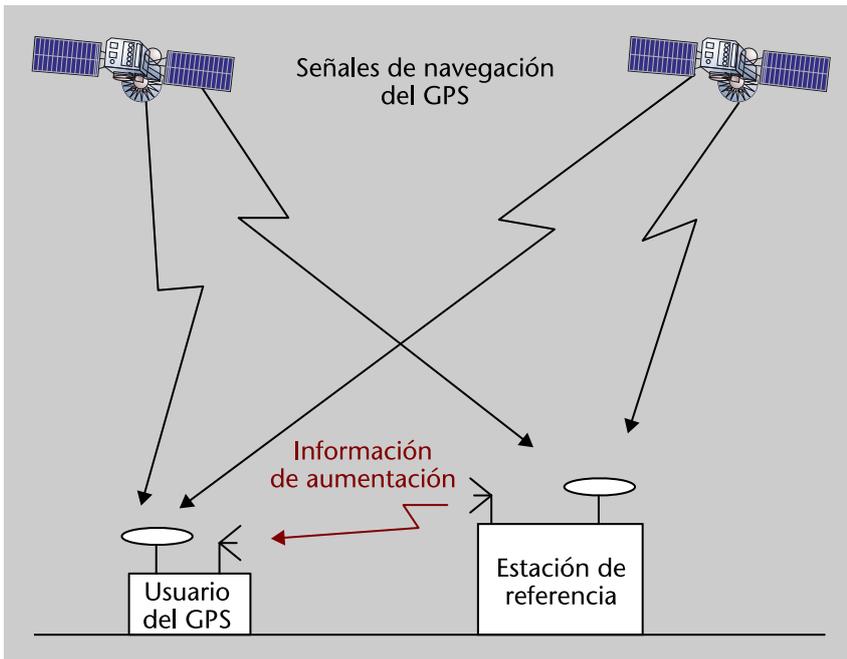
En cuanto al proceso que lleva a cabo la técnica DGPS, existen dos conceptos según la zona geográfica que cubre el sistema. Por un lado, el **DGPS de área local** está diseñado para cubrir áreas entre 10 y 100 km con una única estación de referencia. Para cubrir regiones mayores se utilizan varias estaciones de referencia y el sistema se denomina **DGPS de área extensa**.

En la figura 2 se presenta el principio de funcionamiento de DGPS de área local. Suponiendo el caso de que se esté trabajando a nivel de pseudodistancia, la estación de referencia distribuye mediante un enlace de comunicaciones las correcciones de pseudodistancias aplicadas a cada satélite visible. Como se ha

comentado antes, la estación de referencia conoce perfectamente su posición. Por tanto, estas correcciones resultan de la comparación que realiza la estación de referencia entre la pseudodistancia estimada y la distancia geométrica existente entre dicha estación y la posición del satélite considerado. Es decir, la estación de referencia primero calcula la distancia (geométrica) que la separa del satélite utilizando el conocimiento de sus coordenadas (x_{ER}, y_{ER}, z_{ER}) y las del satélite (x_S, y_S, z_S) :

$$d_{ER,S} = \sqrt{(x_S - x_{ER})^2 + (y_S - y_{ER})^2 + (z_S - z_{ER})^2} \quad (10)$$

Figura 2. Principio de funcionamiento de DGPS de área local



Por otro lado, realiza una estimación de la pseudodistancia utilizando la señal recibida del satélite, obteniéndose lo siguiente:

$$\rho_{ER,S} = d_{ER,S} + c\delta t_{ER} + \epsilon_{ER} \quad (11)$$

donde δt_{ER} es el error introducido por el reloj de la estación de referencia y ϵ_{ER} es el error de la estimación de la distancia ocasionado por los efectos comentados anteriormente (tanto los correlados como los incorrelados). Una vez calculada la distancia, la estación de referencia obtiene la corrección de la pseudodistancia como:

$$\Delta\rho_{ER,S} = d_{ER,S} - \rho_{ER,S} = -c\delta t_{ER} - \epsilon_{ER} \quad (12)$$

Esta corrección es transmitida en *broadcast* y el usuario, al recibirla, la aplica para corregir su medida de pseudodistancia, $\rho_{U,S}$. Considerando que $d_{U,S}$ es la distancia entre el usuario y el satélite, $c\delta t_U$ es el error introducido por el reloj del usuario y ε_U es el error de la estimación observado en el receptor del usuario, se obtiene la siguiente corrección:

$$\begin{aligned}\rho^{corr}_{U,S} &= \rho_{U,S} + \Delta\rho_{ER,S} = d_{U,S} + c\delta t_U + \varepsilon_U - c\delta t_{ER} - \varepsilon_{ER} \\ &= d_{U,S} + c\delta t_{U,M} + \varepsilon_{U,M}\end{aligned}\quad (13)$$

donde $c\delta t_{U,M}$ es la diferencia entre los errores introducidos por los relojes del usuario y la estación de referencia y $\varepsilon_{U,M}$ representa el error residual de pseudodistancia. Teniendo en cuenta que este error residual es normalmente menor que el error obtenido por el usuario al realizar la estimación por sí solo, se obtiene una mejor en la estimación de la misma. En cuanto al error introducido por el reloj de la estación de referencia, este también puede ser estimado por la misma estación cuando realiza el cálculo de su posición, ya que esta conoce su posición exacta. Por tanto, esta estimación se envía también en *broadcast* para que los usuarios puedan utilizarla en sus correcciones.

Lógicamente, la mejora ofrecida por DGPS aumenta a medida que el usuario se encuentra más próximo a la estación de referencia, pudiéndose obtener mejoras del orden de un factor 2. Por otro lado, cabe recordar que los errores de pseudodistancia varían con el tiempo, por tanto, el beneficio que aporta la corrección de la estación de referencia dependerá en gran medida del instante en el cual se tomaron las medidas, t_{med} . Con el fin de solventar este hecho, la estación de referencia también envía la variación de dicho factor de corrección, $\Delta\rho_{ER,S}(t_{med})$, la cual utilizará el usuario en el instante de aplicar la corrección, t , tal como se muestra a continuación:

$$\rho^{corr}_{U,S}(t) = \rho_{U,S}(t) + \Delta\rho_{ER,S}(t_{med}) + \Delta\rho_{ER,S}(t_{med})(t - t_{med}) \quad (14)$$

El sistema DGPS de área extensa, por su parte, se basa en extender el concepto de DGPS de área local mediante el despliegue de una red de estaciones de referencia para cubrir una zona determinada. En este caso, no obstante, el objetivo primordial es asegurar que las precisiones que pueden obtenerse en dicha zona sean menores de un metro. Para ello, se analizan las componentes de los errores de las pseudodistancias por separado y se estiman las variaciones de las mismas en la región entera usando las medidas de la red de estaciones de referencia. Concretamente, la red se compone de diversas estaciones de referencia, encargadas de tomar las medidas de los diferentes satélites y distribuir las correcciones a los usuarios; y de una estación de control maestra, encargada de recibir las medidas de todas las estaciones de referencia, procesarlas y determinar las correcciones que deben distribuirse en la zona de influencia (véase figura 3).

Ved también

El cálculo de la posición de una estación se detalla en el módulo "El sistema GPS".

Figura 3. Principio de funcionamiento de DGPS de área extensa



1.2. WAAS

El esquema presentado en la subpartado anterior es capaz de ofrecer correcciones a un receptor GPS, pero una de las principales limitaciones que presenta es la cobertura del mismo. En algunas aplicaciones, especialmente las relacionadas con la aviación civil, es necesario proveer de un sistema de aumentación con coberturas que aseguren la máxima disponibilidad del sistema. Con esa motivación fueron diseñados los sistemas de aumentación basados en satélites³.

⁽³⁾En inglés, *satellite-based augmentation systems (SBAS)*.

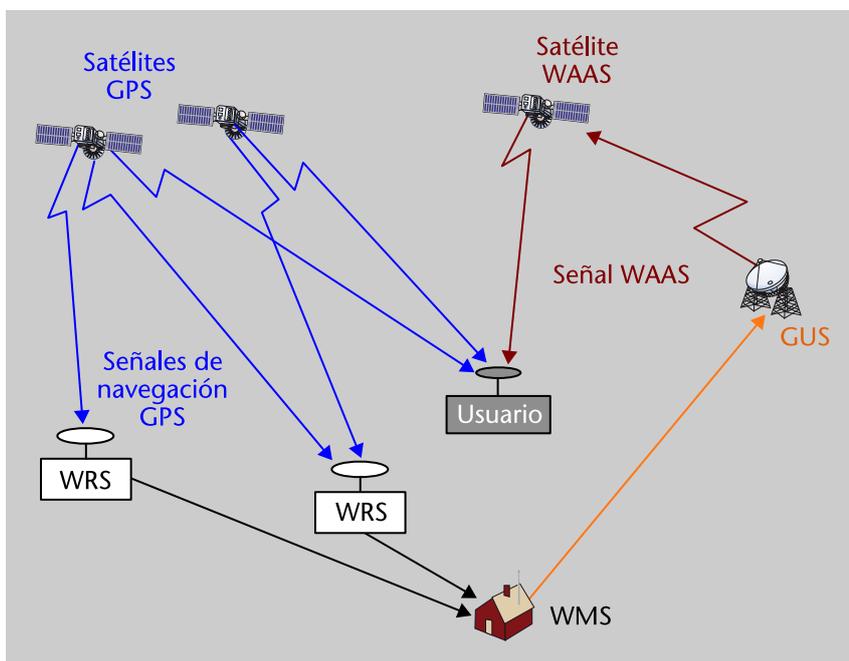
La versión estadounidense de SBAS se conoce con el nombre de WAAS⁴. Este sistema está formado por tres segmentos (véase figura 4):

⁽⁴⁾WAAS son las siglas de *wide area augmentation system*.

- **Segmento espacial.** Este segmento está formado por tres satélites geoes-tacionarios (Inmarsat 4F3, Galaxy 15 y Anik F1R) ofreciendo cobertura en territorio estadounidense (incluyendo Alaska). Estos satélites se encargan de enviar las señales de aumentación a los usuarios.
- **Segmento terrestre.** Segmento formado por los siguientes componentes:
 - **Estaciones de monitorización** (con un total de 59 estaciones), denominadas *wide-area reference stations (WRS)*, repartidas por todo el territorio estadounidense. Estas estaciones están equipadas con receptores GPS de frecuencia dual (L1 y L2) y sensores meteorológicos. Se encargan de monitorizar las señales enviadas por los satélites GPS, más las de los propios satélites WAAS, y de adquirir datos de la condición meteorológica. Toda esta información se envía a las estaciones maestras.

- **Estaciones maestras** (2 estaciones), denominadas *wide-area master stations* (WMS), encargadas de procesar los datos recibidos de las estaciones de monitorización y, a partir de los mismos, generar los datos de aumentación.
- **Estaciones de transmisión de datos** (6 estaciones), denominadas *ground uplink stations* (GUS), encargadas de enviar los datos generados por las WMS a los satélites del sistema WAAS.
- **Segmento de usuario.** Segmento formado por los receptores GPS equipados con WAAS.

Figura 4. Arquitectura del sistema WAAS



Aunque el sistema dispone de su propio segmento espacial, WAAS está diseñado para mejorar las prestaciones de GPS, siendo este último el sistema de navegación primario. Las principales ayudas que proporciona WAAS son:

- Señal de navegación adicional.
- Correcciones DGPS.
- Monitorización de la integridad.

El principio de funcionamiento de WAAS se puede resumir de la siguiente manera. Las estaciones WRS recogen los datos de los diferentes satélites y las condiciones meteorológicas para transmitirlos a las estaciones WMS. Estas procesan los datos y generan las ayudas mencionadas anteriormente. Estas ayudas se envían a los satélites geoestacionarios WAAS mediante las estaciones de transmisiones de datos, para que estos las retransmitan a los usuarios. Para ello, se utiliza una señal en la banda L1 con unas características similares a las de las señales GPS. Básicamente, utiliza una modulación similar a la de GPS basada en el uso de códigos de espectro ensanchado iguales a los códigos Gold utili-

zados en los códigos C/A de GPS, seleccionados de manera que tengan un nivel de correlación cruzada bajo con estos últimos. Por tanto, dicha señal puede ser también utilizada como señal de navegación, es decir, se puede utilizar para estimar la pseudodistancia existente entre el usuario y el satélite WAAS. Aparte, dicha señal transporta la información de corrección diferencial y de la integridad de los diferentes satélites de la constelación GPS y de los propios satélites geostacionarios del sistema WAAS. La información de integridad se basa en indicar si los datos que proporcionan los satélites visibles deben ser usados o no. A diferencia de la señal basada en el código C/A de GPS, donde los datos se enviaban a 50 bps, los datos en este caso se transmiten a 500 bps.

La información enviada por los satélites WAAS, junto a las señales de navegación provenientes de los satélites adicionales geostacionarios, ofrecen una mejora notable en las prestaciones del receptor GPS, alcanzando precisiones entre los 0,5 y 2 m (en territorio estadounidense).

Aplicaciones agrícolas

Aunque el sistema WAAS fue principalmente diseñado para incorporar GPS en aplicaciones aeronáuticas, su utilización es también bastante notoria en aplicaciones relacionadas con la agricultura. Principalmente, para poder ofrecer un servicio de localización con altas precisiones y optimizar las tareas de plantación y fertilización.

Ejemplo

Considerad la señal de navegación del sistema WAAS y realizad lo que se pide en los siguientes apartados:

- a) Determinad la ganancia de procesamiento de la señal de navegación del sistema WAAS.
- b) Comparad dicha ganancia con la ganancia de procesamiento que se obtiene con la señal de navegación C/A de GPS.
- c) Considerad ahora que en el receptor llega una interferente de banda estrecha (es decir, con un ancho de banda B_I que satisface la relación $B_I \ll B_I \ll B_C \approx 1/T_C$, siendo T_C el periodo de chip de la señal WAAS), donde la densidad espectral de dicha interferente se encuentra centrada en la banda frecuencial de la señal de navegación WAAS. Obtened el máximo nivel de potencia interferente que puede soportar la señal de navegación WAAS. Para ello, tened en cuenta que la potencia recibida de la señal WAAS es igual a -160 dBW y que el receptor necesita una relación potencia de señal a interferente⁵ mayor a 10 dB para poder demodular los símbolos del mensaje de navegación con una calidad aceptable.
- d) Obtened ahora el valor de potencia interferente máximo que puede soportar una señal de navegación C/A de GPS, suponiendo que la potencia de la señal recibida es también igual a -160 dBW en este caso.

Solución

a) La ganancia de procesamiento de una señal de navegación se define como la relación existente entre el tiempo de bit de la propia señal y el tiempo de chip del código utilizado para ensanchar el espectro de la señal. En este caso, la ganancia de procesamiento expresada en dB se puede obtener como:

$$G_{P,WAAS} = 10 \log_{10} \left(\frac{T_b}{T_C} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1/500 \text{ s}}{1/1.023 \text{ ms}} \right) = 33,1 \text{ dB} \quad (15)$$

donde se ha considerado $T_C = 1/1.023$ ms al utilizarse en WAAS un código Gold con las mismas características que los códigos C/A de GPS. En cuanto a T_b , su valor viene dado por el hecho de que la señal de navegación WAAS se modula con una información transportada con una velocidad de 500 bps.

⁽⁵⁾En inglés, *signal-to-interference power ratio* (SIR).

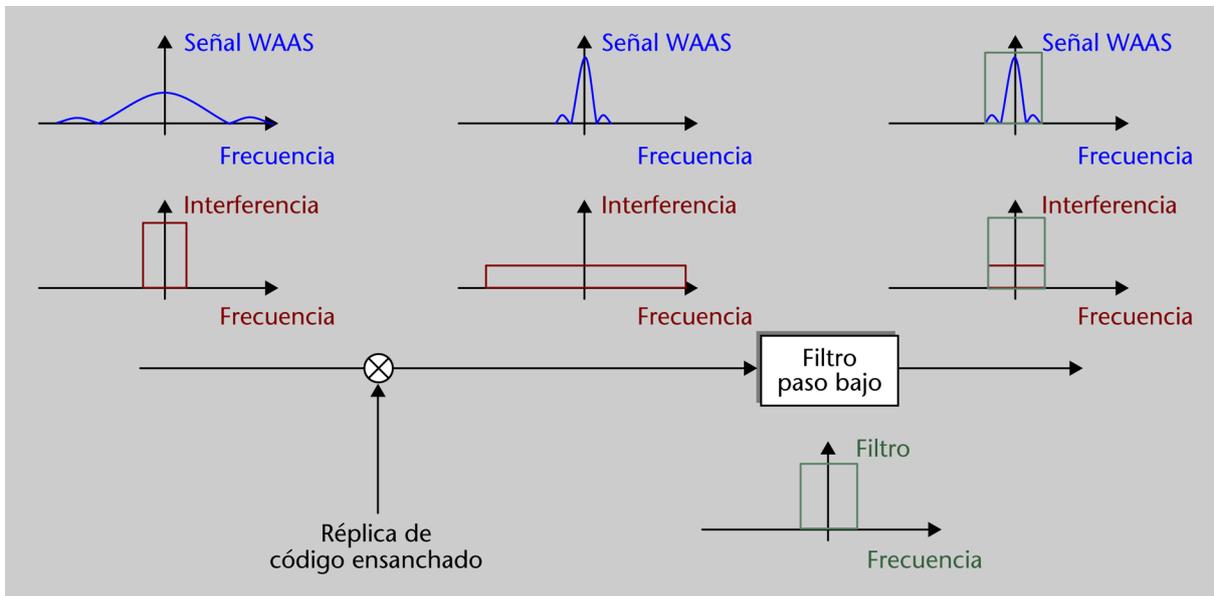
b) En el caso de la señal de navegación C/A de GPS, los datos de navegación se transportan a 50 bps, por tanto, la ganancia de procesamiento se debe calcular de la siguiente manera:

$$G_{P,GPS} = 10 \log_{10} \left(\frac{T_b}{T_c} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{1/50 \text{ s}}{1/1.023 \text{ ms}} \right) = 43,1 \text{ dB} \quad (16)$$

es decir, la señal GPS tiene una ganancia de procesamiento 10 dB mayor que la obtenida en el caso de WAAS.

c) En primer lugar se debe calcular el valor de la SIR a la salida del correlador del receptor. En dicho correlador, la señal recibida se correla con una réplica del código WAAS. Por tanto, la señal correspondiente al satélite WAAS sufre un proceso de desensanchado, teniendo como resultado una señal con ancho de banda $B_S \approx 1/T_b$, y, después de esto, se aplica un proceso de filtrado utilizando un ancho de banda igual al de la señal deseada, es decir, igual a B_S . La señal interferente, en cambio, sufre un proceso de ensanchado. Esto es debido a que la señal interferente está incorrelada con el código del receptor y, por tanto, a la salida del correlador se obtiene una señal interferente *codificada* con ancho de banda igual a $B_I = B_C \approx 1/T_c$. Por tanto, a la hora de aplicar el filtro con ancho de banda B_S , este cancela gran parte de la señal interferente (véase la figura 5).

Figura 5. Esquema de correlación del receptor WAAS



Teniendo en cuenta el espectro de las dos señales a la salida del correlador, uno puede calcular la relación SIR como:

$$SIR = \frac{P_S}{P_I^{corr}} \quad (17)$$

donde P_S es igual a la potencia recibida de la señal WAAS, ya que el nivel de potencia de señal deseada a la salida del correlador es igual al nivel que se tiene a la entrada del mismo. En cuanto a P_I^{corr} , esta es la potencia de la señal interferente a la salida del correlador, la cual se calcula de la siguiente manera:

$$P_I^{corr} = P_I \frac{B_S}{B_C} = P_I \frac{T_c}{T_b} \quad (18)$$

donde P_I es la potencia de la señal interferente a la entrada del correlador. Es decir, teniendo en cuenta que uno puede calcular la densidad espectral de potencia de la señal interferente a partir de la señal ensanchada como P_I/B_C , es fácil calcular la potencia a la salida del filtro paso bajo como densidad espectral de potencia por ancho de banda de señal interferente a la salida del filtro, $P_I B_S/B_C$.

Introduciendo ahora el resultado de arriba en la expresión de SIR, se obtiene lo siguiente:

$$SIR = \frac{P_S T_b}{P_I T_c} \Rightarrow SIR(\text{dB}) = P_S(\text{dBW}) - P_I(\text{dBW}) + G_{P,WAAS}(\text{dB}) \quad (19)$$

Por tanto, si el mínimo nivel de SIR necesario es igual a 10 dB, la máxima potencia de señal interferente tolerada es igual a:

$$\begin{aligned} P_I(\text{dBW}) &\leq P_S(\text{dBW}) + G_{P,WAAS}(\text{dB}) - SIR(\text{dB}) = \\ &= -160 \text{ dBW} + 33,1 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = -136,9 \text{ dBW} \end{aligned} \quad (20)$$

d) En este caso se debe realizar el mismo proceso al hacerlo en el apartado anterior pero teniendo en cuenta el valor de la ganancia de procesamiento de la señal GPS. Por tanto, el máximo valor de potencia interferente es en este caso:

$$\begin{aligned} P_I(\text{dBW}) &\leq P_S(\text{dBW}) + G_{P,GPS}(\text{dB}) - SIR(\text{dB}) = \\ &= -160 \text{ dBW} + 43,1 \text{ dB} - 10 \text{ dB} = -126,9 \text{ dBW} \end{aligned} \quad (21)$$

1.3. EGNOS

EGNOS⁶ es la solución SBAS europea fruto de la actividad conjunta de la Comisión Europea, la Agencia Espacial Europea y Eurocontrol. Este sistema fue mencionado por primera vez en el año 1994, empezó a funcionar de forma operacional (estado inicial) en el 2005, para declararse, finalmente, en el año 2009 el inicio oficial de operaciones del sistema (*open service*). En marzo del 2011, se declaró el sistema de forma oficial como sistema utilizable para la aviación civil (en tareas de aproximación de poca precisión y aproximación con guiado vertical).

⁽⁶⁾EGNOS son las siglas de *euro-pean geostationary navigation over-lay service*.

Proyecto cooperativo

El sistema EGNOS es fruto de la cooperación de la Comisión Europea, la Agencia Espacial Europea y Eurocontrol. La Comisión Europea lleva a cabo la consolidación de requisitos de todos los usuarios, la validación de los mismos y el soporte para el establecimiento del sistema. La Agencia Espacial Europea se encarga del desarrollo técnico. Finalmente el Eurocontrol está a cargo de los requisitos de aviación civil y validación de los mismos.

El objetivo principal de EGNOS es ofrecer un servicio de aumentación a GPS, GLONASS y Galileo.

Para llevar a cabo su objetivo EGNOS utiliza una arquitectura dividida en cuatro segmentos:

1) Segmento espacial. Este es un segmento formado por tres satélites geoestacionarios (dos satélites Inmarsat-3 y el satélite de la Agencia Espacial Europea Artemis) ofreciendo cobertura en Europa, el Mediterráneo y África.

2) **Segmento terrestre.** Segmento formado por los siguientes elementos:

a) **Estaciones de monitorización** (34 estaciones), denominadas como *ranging and integrity monitoring stations* (RIMS) encargadas de monitorizar las señales de GPS, GLONASS y Galileo.

b) **Centros de control de misión** (4 centros), referidos como *mission control centers* (MCC), encargados de procesar los datos de las RIMS y generar los mensajes transmitidos por los satélites. Estos centros de control se encuentran en Torrejón (España), Gatwick (Reino Unido), Langen (Alemania) y Ciampino (Italia). Cabe comentar que únicamente uno de los MCC se encuentra operacional, mientras que los otros tres actúan como centros de reserva para su utilización en caso necesario.

c) **Estaciones de transmisión de datos** (6 estaciones), denominadas como NLES (*navigation land earth stations*), encargadas de enviar los mensajes generados por la MCC a los satélites de la constelación EGNOS.

3) **Segmento de apoyo.** Segmento formado por dos plataformas de apoyo:

a) Una plataforma destinada a la verificación y certificación de aplicaciones EGNOS, denominada con el nombre *application specific qualification facility* (ASQF) y localizada en Torrejón (España).

b) Una plataforma destinada a realizar tareas relacionadas con la coordinación técnica, análisis de las prestaciones del sistema y gestión de la configuración del sistema, conocida como *performance assessment and system checkout facility* (PACF) y localizada en Toulouse (Francia).

4) **Segmento de usuario.** El segmento de usuario está formado por los receptores equipados con EGNOS y con (al menos) alguno de los sistemas de navegación GPS, GLONASS y Galileo.

Como en el caso de WAAS, las ayudas de aumentación de EGNOS se basan en las correcciones diferenciales, la inclusión de señales de navegación adicionales y la monitorización de la integridad. Las señales adicionales se basan también en una modulación similar a la de GPS. Concretamente, se utiliza una señal en la banda L1 que utiliza un código Gold de la misma familia a la utilizada en el código C/A de GPS. No obstante, en este caso las ayudas de aumentación sirven para mejorar las prestaciones de otros sistemas de navegación aparte del GPS, obteniéndose mejores precisiones (en general, por debajo de los 2 m y, más concretamente, estando próximas a 1 m en Europa).

Aparte, EGNOS incluye un servicio conocido como SISNET⁷. La idea de este servicio es enviar la misma información que se envía por los satélites geoestacionarios mediante Internet para que pueda recibirse por un mayor número de usuarios. Esto viene motivado por el hecho de que las elevaciones de los

Distribución del segmento terrestre de EGNOS

El segmento terrestre de EGNOS está principalmente distribuido en el continente europeo, existiendo algunas estaciones RIMS localizadas en los continentes adyacentes.

⁽⁷⁾SISNET son las siglas de *signal in space through the InterNET*.

satélites geoestacionarios son relativamente bajas (alrededor de los 30° por encima del horizonte en el caso del centro de Europa) y la visibilidad de los mismos puede verse afectada. Aunque los sistemas SBAS fueron principalmente diseñados para usuarios aeronáuticos, los cuales no tienen problemas de visibilidad con estas elevaciones, es la utilización del sistema por otros grupos de usuarios la que se ve limitada por estas características, especialmente los usuarios de zonas urbanas. Gracias a SISNET, estas limitaciones se ven reducidas teniendo en cuenta la proliferación de Internet móvil (gracias a los avances en telefonía móvil como es el caso de los sistemas celulares 3G y las tecnologías emergentes).

2. El sistema Galileo

Galileo es el programa europeo de radionavegación por satélite lanzado por la Comisión Europea y desarrollado conjuntamente con la Agencia Espacial Europea. Aunque la primera contribución europea a la radionavegación por satélite, es decir, la iniciativa EGNOS, es capaz de ofrecer buenas prestaciones, esta depende de sistemas externos como GPS y GLONASS. Galileo tiene, por tanto, como objetivo el proveer de un sistema de radionavegación por satélite propio, permitiendo el control de la disponibilidad del sistema y de las prestaciones del mismo.

En este apartado se describen las características del sistema Galileo (subapartado 2.1), presentando además las señales utilizadas (subapartado 2.2) y la arquitectura de los receptores (subapartado 2.3). Cabe comentar que este sistema no se encuentra aún operativo. Concretamente, está aún en fase de desarrollo, habiéndose lanzado únicamente, en la fecha de redacción de este módulo, dos satélites de pruebas (GIOVE-A y GIOVE-B) y el primer par de satélites de validación IOV, los cuales siguen en órbita.

Conflicto entre Galileo y GPS

Estados Unidos se opuso desde el primer momento al desarrollo del sistema Galileo. Sus argumentaciones se basaban en posibles conflictos que podrían surgir entre Galileo y GPS en el marco de la OTAN. Finalmente, los Estados Unidos y la Comisión Europea firmaron un acuerdo en el año 2004 donde reconocían a GPS y Galileo como sistemas independientes y complementarios para la radionavegación por satélite, disfrutando además de las mismas condiciones para su desarrollo y evolución.

2.1. Descripción del sistema Galileo

Al inicio de la década de los noventa, una vez reconocida la importancia estratégica de la radionavegación por satélite, la Comisión Europea inició su propio programa GNSS⁸. El programa, en concreto, se dividió en dos etapas. En la primera etapa se desarrolló un sistema de aumentación, el sistema EGNOS. La segunda etapa, por su parte, era más ambiciosa, ya que se basaba en el desarrollo de un sistema de radionavegación independiente denominado Galileo. Este nuevo sistema entraría, junto al bloque III de GPS (o GPS III), en lo que se conoce como segunda generación de sistemas de radionavegación por satélite o GNSS-2. El objetivo inicial era que el sistema Galileo estuviera operativo en el 2008, pero sufre ya de algunos años de retraso, en parte debido a contrariedades entre los países participantes en el programa. Algunas previsiones sitúan su operatividad para el año 2014.

⁽⁸⁾GNSS son las siglas de *global navigation satellite system*.

Ved también

El sistema EGNOS se describe en el apartado 1 de este módulo.

A continuación se describen las características principales del sistema que son los servicios ofrecidos por Galileo, las bandas frecuenciales utilizadas y la arquitectura del sistema.

2.1.1. Servicios Galileo

A diferencia del sistema GPS, el sistema Galileo está diseñado para ofrecer, principalmente, servicios de uso civil. Concretamente, los servicios ofrecidos por Galileo son:

- **Open service (OS).** Es un servicio abierto orientado al usuario general (conocido como *mass-market*), especialmente adecuado para su uso en navegadores de coches y para la integración en dispositivos de telefonía móvil. El servicio en sí provee al usuario de información de posición, velocidad y sincronización con el sistema de tiempo Galileo. El servicio está definido tanto para receptores con mono-frecuencia como receptores multi-frecuencia. Dicho servicio se transmite mediante las señales Galileo en las bandas E5a, E5b y E1 (tal y como se presenta en el subapartado 2.2).
- **Commercial service (CS).** Es un servicio orientado a las aplicaciones profesionales. Para ello ofrece la posibilidad de que terceras partes distribuyan información de valor añadido mediante las señales Galileo, como alertas meteorológicas, alertas de accidentes, actualizaciones de mapas, información de tráfico, etc. Este servicio se transmite mediante las señales de las bandas E5b, E6 y E1, estando los datos de las mismas protegidas con cifrado. Este cifrado se gestiona por parte de las empresas prestadoras del servicio, restringiendo por tanto su uso a los receptores con acceso.
- **Safety of life (SOL) service.** Este servicio está orientado a aplicaciones donde la seguridad de los usuarios es crítica, como son, por ejemplo, aplicaciones relacionadas con el transporte marítimo, aéreo o ferroviario, u operaciones donde se requiera de un nivel de seguridad alto. Este servicio se envía sin cifrar mediante las señales en las bandas E5a, E5b y E1, y dispone de un mecanismo de autenticación para que el usuario compruebe que las señales recibidas realmente son señales Galileo. Además, se incorpora un mecanismo de monitorización y notificación de la integridad de las diferentes señales para informar al usuario si estas cumplen con las especificaciones necesarias.
- **Public regulated service (PRS).** Son servicios únicamente ofrecidos a usuarios autorizados por entidades gubernamentales que requieren de un alto nivel de protección ante interferencia o *jamming* (utilizando señales con espectro más ensanchado). Se transmiten mediante las señales en las bandas E1 y E6, utilizando cifrado de datos.
- **Search and rescue (SAR) service.** Los satélites Galileo van equipados con un receptor SAR para detectar balizas de mensajes de socorro de forma glo-

bal. Estas mismas señales se retransmiten a estaciones terrestre para alertar a los servicios de rescate. A su vez, los satélites actúan también como canal de retorno, transmitiendo una señal ACK (*acknowledgment*), al usuario que emite la baliza, conforme el servicio de rescate ha recibido la alerta. Aparte, el sistema Galileo se utiliza para ofrecer servicio de posicionamiento para localizar con más precisión a los usuarios.

Las características de los principales servicios se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Principales servicios de Galileo

Servicios Galileo	OS	CS	SOL	PRS
Precisión posicionamiento (H – Horizontal 95%, V – Vertical 95%)	24 m H – 35 m V (mono-frecuencia) 4 m H – 8 m V (multi-frecuencia)	24 m H – 35 m V (mono-frecuencia) 4 m H – 8 m V (multi-frecuencia)	4 m H – 8 m V (multi-frecuencia)	24 m H – 35 m V (mono-frecuencia) 6,5 m H – 12 m V (multi-frecuencia)
Precisión temporal	30 ns	30 ns	30 ns	30 ns
Integridad (distancia máxima para activar alarma, tiempo de recepción alarma en el usuario)	Sin integridad	Sin integridad	12 m H – 20 m V 6 s	20 m H – 35 m V 10 s
Disponibilidad de servicio	99,5%	99,5%	99,5%	99,5%
Control de acceso	Acceso libre	Acceso controlado	Autenticación de la información de integridad	Acceso controlado

2.1.2. Bandas frecuenciales

Como se ha ido comentando, los servicios Galileo se transmiten mediante la utilización de diferentes señales. Concretamente, cada satélite Galileo transmite 10 señales diferentes de navegación y una de SAR en las siguientes bandas:

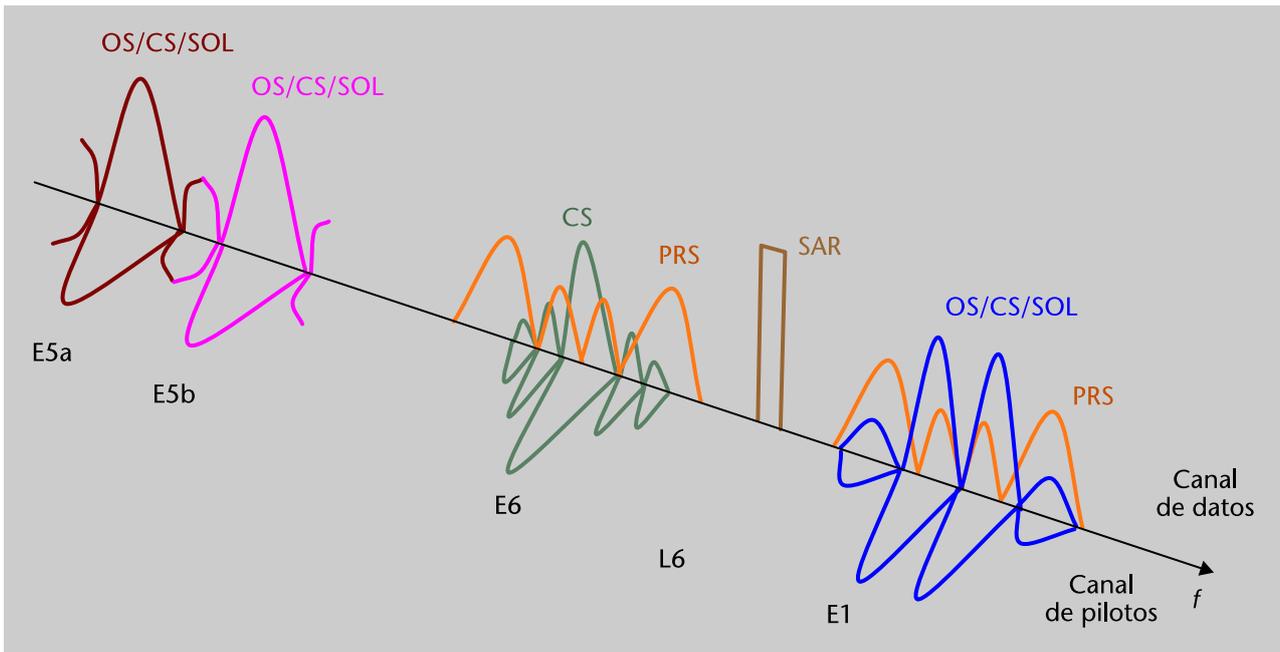
- E5a: centrada en 1.176,45 MHz, servicios OS, CS y SOL.
- E5b: centrada en 1.207,14 MHz, servicios: OS, CS y SOL.
- E6: centrada en 1.278,75 MHz, servicios CS y PRS.
- L6: centrada en 1.544,50 MHz, servicio SAR.
- E1: centrada en 1.575,42 MHz, servicios OS, CS, SOL y PRS.

En la figura 6 se representan el espectro de las diferentes señales.

Ved también

Las señales de navegación E1, E5a, E5b y E6 se estudian con más detalle en el subapartado 2.2 de este módulo.

Figura 6. Bandas frecuenciales de Galileo



2.1.3. Arquitectura Galileo

Como en el caso de otros sistemas de radionavegación por satélite, la arquitectura del sistema Galileo está dividida en tres segmentos: segmento espacial, segmento terrestre y segmento de usuario. A continuación, se describen los diferentes segmentos.

Segmento espacial del sistema Galileo

El segmento espacial de Galileo está formado por una constelación de 30 satélites en tres planos orbitales. Cada uno de estos planos contiene 10 satélites con órbitas presentando una inclinación de 56° , una excentricidad de $e = 0,002$ y un valor de semieje mayor de $a = 29.600,318$ km. El periodo orbital es igual a 14 horas y 22 minutos, dando a lugar 10 órbitas completas en 17 días.

La idea es que en cada órbita exista un satélite no operativo. Este satélite se usa como reserva para poder sustituir de forma rápida a un satélite que haya fallado en el mismo plano. Este diseño de constelación asegura que se pueda tener, con una probabilidad mayor al 90%, un mínimo de 4 satélites visibles en cualquier posición del mundo en cualquier instante. En gran parte del planeta se puede llegar a tener entre 6 y 8 satélites visibles, ofreciendo por tanto unas prestaciones del sistema excelentes.

Como se puede observar, los parámetros orbitales difieren de los presentados en GPS. Como en el caso de GPS, no obstante, los satélites están equipados con relojes de atómicos (en este caso de rubidio o hidrógeno) para poder asegurar un alto nivel de sincronización del sistema. Aparte del transpondedor de navegación, los satélites también vienen equipados con un transpondedor SAR. Cabe comentar también que los satélites del sistema se han diseñado para tener una vida útil de 20 años.

Ved también

Los parámetros orbitales del sistema GPS se describen en el módulo "El sistema GPS" de esta asignatura.

Como se ha mencionado anteriormente, en la actualidad existen únicamente dos satélites de pruebas en órbita. El primero de ellos, el GIOVE-A, fue construido por Surrey Satellite Technology Ltd y lanzado en el año 2005 desde el cosmódromo de Baikonur (Kazajistán). Las señales enviadas por dicho satélite son totalmente representativas de las señales Galileo en cuanto a modulaciones, velocidades de chip y datos. No obstante, dicho satélite únicamente puede transmitir a la vez en dos bandas frecuenciales. Aparte, los códigos de *spreading* utilizados son diferentes de los códigos de Galileo y los datos del mensaje de navegación tampoco se corresponden al formato establecido.

En cuanto al segundo satélite, el GIOVE-B, fue ensamblado por un consorcio de empresas encabezado por Astrium y Thales Alenia Space y lanzado en el 2008 (también desde Kazajistán). Uno de los avances de este satélite es la incorporación, aparte de los relojes atómicos de rubidio presentes en GIOVE-A, de un reloj atómico de hidrógeno. En concreto, este reloj es el reloj más estable de los puestos en órbita de forma permanente. En este caso, las señales transmitidas difieren también de las señales Galileo en algunos aspectos.

Como continuación de las pruebas realizadas con los satélites GIOVE, se pondrán en órbita otros cuatro satélites conocidos con el nombre de satélites IOV⁹. Estos satélites presentan unas características muy próximas a los diseños finales de los satélites Galileo. El lanzamiento del primer par de satélites IOV fue llevado a cabo el 21 de octubre del 2011. Una vez desplegada la fase de experimentación IOV, se comenzará a poner en órbita los satélites FUC¹⁰ destinados a cubrir la constelación necesaria para declarar el sistema Galileo operativo.

⁽⁹⁾IOV son las siglas de *in-orbit validation*.

⁽¹⁰⁾FUC son las siglas de *full operational capability*.

Segmento terrestre del sistema Galileo

Las principales funciones del segmento terrestre del sistema Galileo son el control de la constelación de satélites y el control de la misión. Para llevar a cabo dichas funcionalidades, el segmento terrestre está dividido, a su vez, en dos segmentos:

1) **Ground control segment (GCS)**. Es el segmento encargado de llevar a cabo todas las tareas de control de la constelación de satélites Galileo. Las tareas principales son:

- Mantenimiento de la constelación de satélites y definición de estrategia de reposición.

- Tareas de recuperación ante fallos de satélites.
- Monitorización, seguimiento, telemetría y control de cada satélite.
- Maniobrar los satélites para mantener las órbitas.
- Soporte del mantenimiento del software de a bordo de cada satélite.

Para llevar a cabo estas tareas, el GCS dispone de una red nominal de 5 estaciones terrestres, denominadas estaciones TTC (*telemetry, tracking and control*). Estas estaciones se comunican con los satélites en la banda S mediante antenas de 13 metros. Las comunicaciones se llevan a cabo combinando un esquema de comunicaciones regular con un sistema de mensajes de contingencia.

2) **Ground mission segment (GMS)**. Segmento encargado de controlar el sistema de navegación y de proveer los principales servicios Galileo. Las principales funciones son:

- Monitorizar las señales de navegación de los satélites Galileo.
- Determinar las órbitas y posiciones de los diferentes satélites.
- Asegurar la sincronización del sistema Galileo.
- Generar los mensajes de navegación.
- Distribuir la información de integridad de las señales de navegación.

Este segmento está formado por una red nominal de entre 30 y 40 estaciones GSS¹¹ distribuidas por la superficie terrestre, las cuales tienen como principal tarea estar continuamente monitorizando las señales de navegación enviadas por los satélites Galileo. La utilización de una red tan grande, y la continua monitorización de la integridad de las señales, viene motivada por la necesidad de satisfacer los requisitos del servicio SOL. De hecho, la gran complejidad del sistema Galileo, en cuanto a arquitectura y estructura de señales, se debe principalmente a los altos requisitos de dicho servicio. La información recogida por las estaciones GSS (medidas de pseudodistancia, mensaje de navegación recibido, etc.), junto a información meteorológica del sitio de las mismas, se envían al centro de control GCC¹². Cabe comentar que en el sistema Galileo existen dos centros de control GCC redundantes. El GCC, por su parte, procesa la información recibida para llevar a cabo dos tareas:

- Determinar las órbitas y el desfase temporal del reloj de cada uno de los satélites.
- Determinar la integridad de las señales de los diferentes satélites.

Con esta información se generan los mensajes de navegación (incluyendo la información de integridad) de cada satélite y se envían a los mismos mediante nueve estaciones ULS¹³ repartidas también por la superficie terrestre, las cuales operan en la banda C (5 GHz) utilizando antenas de 3 metros.

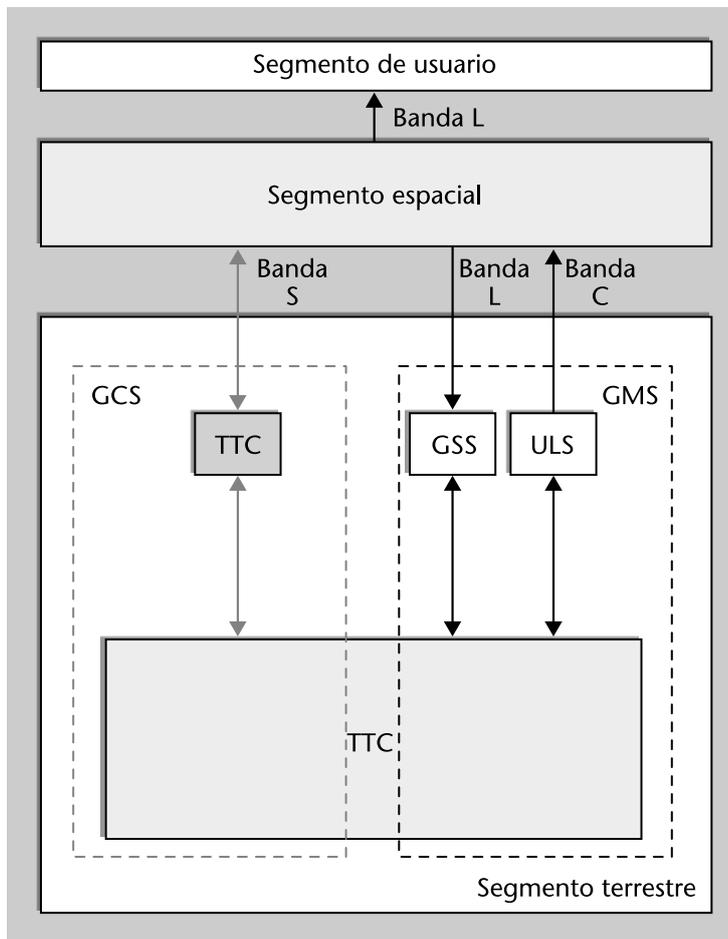
⁽¹¹⁾GSS son las siglas de *Galileo sensor station*.

⁽¹²⁾GCC son las siglas de *Galileo Control Center*.

⁽¹³⁾ULS son las siglas de *up-link stations*.

En la figura 7, se presenta la arquitectura del sistema Galileo, donde se puede observar la organización del segmento terrestre.

Figura 7. Arquitectura del sistema Galileo



Nota

Cabe mencionar que, en el momento de redacción de este módulo, el segmento terrestre del sistema Galileo se encontraba aún en fase de desarrollo.

Segmento de usuario del sistema Galileo

En el caso de Galileo, el segmento de usuario está principalmente orientado a los servicios del sistema. En concreto, se define dicho segmento como el que traducirá las señales de Galileo a los diferentes servicios que utilizarán los usuarios finales, y se compone de:

- Tecnologías.
- Servicios de valor añadido (combinación con comunicaciones, servicios de mapas, servicios de tasación, etc.).
- Aplicaciones de usuario.

El segmento de usuario está aún en fase de definición debido a que el sistema no se encuentra operativo. En la actualidad existen los primeros receptores de prueba, formando lo que se conoce como *test user segment*, los cuales se utilizan para validar el sistema y llevar a cabo tareas de experimentación con las señales generadas por los satélites GIOVE-A y GIOVE-B.

2.2. Estructura de la señal Galileo

Antes de entrar en la descripción concreta de la señal, vamos a analizar los principales cambios que ha habido en las señales GNSS modernizadas (que se refiere a las señales de GPS modernizado o GPS III, Galileo y otros sistemas en desarrollo, como Compass) y la lógica que hay detrás de los mismos.

Las señales de los sistemas modernizados incluyen varios o la totalidad de los siguientes aspectos:

- **Códigos pseudoaleatorios más largos.** Estos códigos aportan una reducción de la interferencia intra e intersistema. También aumentan la resistencia de la señal al efecto *near-far* y a las interferencias externas. El principal inconveniente es que hace la adquisición más compleja computacionalmente.
- **Mayor velocidad de chip.** Hace la señal más robusta al efecto multicamino y a las interferencias.
- **Pilotos.** La existencia de componentes que no transmiten datos permiten aumentar los intervalos de correlación y mejorar la sensibilidad. Esto es especialmente interesante para la recepción de las señales en entornos degradados. También hace posible utilizar un discriminador mejorado en el PLL, ya que no hay que contrarrestar los valores de los símbolos.
- **Señales en más bandas frecuenciales.** Esto mejora en general la robustez y flexibilidad del sistema. También hace posible que usuarios civiles corrijan el retardo ionosférico, y facilita la resolución de las ambigüedades de fase.
- **Señales del tipo BOC.** Para un mismo ancho de banda total de la señal, se consigue aumentar el ancho de banda efectivo y por tanto, una mayor precisión de los pseudorrangos y una menor influencia del multicamino. No obstante, el procesado de las señales BOC conlleva algunas dificultades.
- **Protección del mensaje mediante códigos de canal.** Permite aumentar la velocidad de transmisión del mensaje y también reducir el umbral de recepción, de manera que sea posible recuperar el mensaje en entornos ligeramente degradados.

Galileo agrupa las prestaciones que ofrece al usuario en cuatro servicios:

- Open Service (OS),
- Safety of Life Service (SoL),
- Commercial Service (CS),
- Public Regulated Service (PRS)

Ved también

El efecto *near-far* se estudia en el módulo "El sistema GPS" de esta asignatura.

Ved también

Las dificultades del procesado de las señales BOC se estudian en el subapartado 2.3 de esta asignatura.

Ved también

Los cuatro servicios del sistema Galileo se estudian en el subapartado 2.1 de este módulo.

Hay muy poca información pública sobre el servicio PRS, por lo que las descripciones que siguen se centrarán fundamentalmente en los otros servicios, que son los que podrá utilizar cualquier usuario civil. Los servicios están mapeados a diferentes tipos de mensajes de navegación y a diferentes componentes de las señales, como se indica en la tabla 2.

Tabla 2. Asociación entre tipos de mensajes, servicios y componentes de las señales

Tipo de mensaje	Servicios	Componente de la señal
F/NAV	OS	E5a-I
I/NAV	OS/CS/SoL	E5b-I, E1-B
C/NAV	CS	E6-B

En cada uno de los tres subapartados siguientes vamos a explicar las señales que transmite Galileo en las tres bandas que utiliza. Concretamente, el subapartado 2.2.1 trata sobre la señal E1, el subapartado 2.2.2, sobre la señal E5, y finalmente, el subapartado 2.2.3, sobre la señal E6.

2.2.1. Señal Galileo E1

La señal Galileo E1 se transmite centrada en la frecuencia 1.575,42 MHz y en la banda que va de 1.559 MHz a 1.591 MHz. Consta de tres componentes: dos de uso civil y una de uso regulado (PRS).

Las dos primeras son:

- Una componente de datos (e_{E1-B}) que transmite el mensaje de navegación I/NAV mediante los símbolos D_{E1-B} . Los chips del código pseudoaleatorio utilizado se representan como C_{E1-B} . Esta componente modula una combinación de las subportadoras denominadas $SC_{E1,a}$ y $SC_{E1,b}$.
- Una componente piloto (e_{E1-C}) cuyo código pseudoaleatorio se representa como C_{E1-C} . Modula una combinación de las subportadoras $SC_{E1,a}$ y $SC_{E1,b}$.

Terminología

Utilizaremos indistintamente los términos *código pseudoaleatorio*, *código de spreading*, y *código de ranging*.

La formulación matemática de estas dos componentes es:

$$\begin{aligned}
 e_{E1-B}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E1-B}[i \bmod L_{E1-B}] D_{E1-B} \left[\text{floor} \left(i \frac{R_{s,E1-B}}{R_{c,E1-B}} \right) \right] \prod (R_{c,E1-B}t - i) \\
 e_{E1-C}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E1-C}[i \bmod L_{E1-C}] \prod (R_{c,E1-C}t - i)
 \end{aligned} \tag{22}$$

donde L_X es la longitud del código pseudoaleatorio de la componente X , "mod" realiza la operación módulo, "floor" redondea el número entero inferior más próximo, $R_{c,E1-X}$ y $R_{s,E1-B}$ son la velocidad de chip y de símbolo, respectivamente, y $\Pi(t)$ representa un pulso rectangular de longitud unidad. La velocidad de símbolo se denota mediante $R_{s,E1-B}$, por lo que $R_{c,E1-B}/R_{s,E1-B}$ es el número de chips por símbolo que hay en la componente B.

Todas las subportadoras se pueden expresar como

$$sc(t) = \text{sign}(\sin(2\pi R_{sc}t)), \quad (23)$$

para un determinado valor de la frecuencia de la subportadora R_{sc} . Cada una de ellas es simplemente una secuencia alternada de unos y menos unos de duración $1/(2R_{sc})$, que sirve para modificar la forma de cada chip.

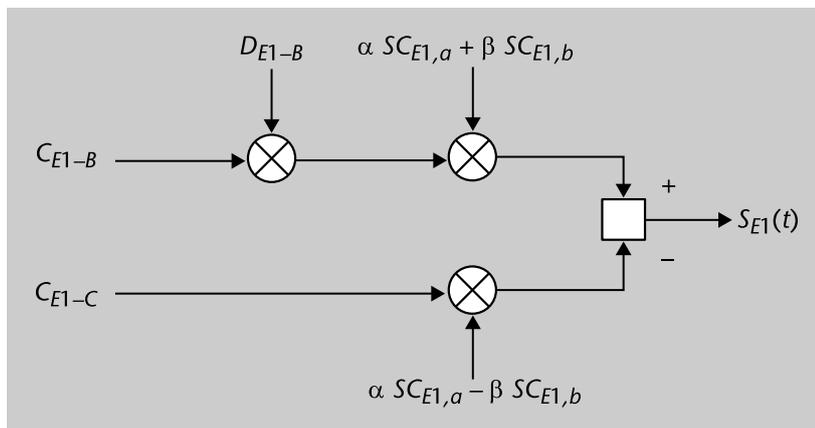
Los valores de todos estos parámetros están recogidos en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros básicos de la señal E1

Parámetro	Valor
L_{E1-B}	4.092 chips
L_{E1-C}	102.300 chips
$R_{s,E1-B}$	250 symbols/s
$R_{c,E1-B}$	1,023 Mchips/s
$R_{c,E1-C}$	1,023 Mchips/s
$R_{sc,E1,a}$	1,023 Mchips/s
$R_{sc,E1,b}$	6,138 Mchips/s

El diagrama de bloques de generación de la señal incluyendo las subportadoras se muestra en la figura 8.

Figura 8. Esquema de generación de la señal Galileo E1



Alternativamente mediante fórmulas, se puede expresar la señal Galileo E1 como

$$s_{E1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(e_{E1-B}(t) (\alpha sc_{E1,a}(t) + \beta sc_{E1,b}(t)) - e_{E1-C}(t) (\alpha sc_{E1,a}(t) - \beta sc_{E1,b}(t)) \right) \quad (24)$$

donde α y β son unas determinadas constantes sobre las que vamos a discutir un poco más adelante.

Podemos observar que las subportadoras que se utilizan en ambas componentes (por ejemplo, $\alpha sc_{E1,a}(t) \pm \beta sc_{E1,b}(t)$) están formadas por la combinación de las dos subportadoras básicas ($sc_{E1,a}(t)$ y $sc_{E1,b}(t)$). Por esta razón se dice que tanto la componente B como la C utilizan una modulación CBOC (*composite BOC*), que como su nombre indica se puede entender como la combinación de señales BOC. Pero ahora nos preguntaremos qué son las señales BOC. Se denominan señales BOC¹⁴ a aquellas en las que el pulso conformador de chip es una secuencia de "+1s" y "-1s" alternados. Por lo tanto, si tuviéramos los valores $\alpha = 1, \beta = 0$ o $\alpha = 0, \beta = 1$ (o sea, si las subportadoras fueran subportadoras básicas de la forma dada por la ecuación 23), entonces las componentes B y C serían señales BOC. Las señales BOC se suelen identificar mediante la siguiente nomenclatura: BOC(f_s, f_c), donde el primer parámetro es la frecuencia de la subportadora y el segundo es la frecuencia de chip. Es habitual dar estos valores relativos a la frecuencia básica de 1.023 MHz, en lugar de en términos absolutos. En el caso de la señal Galileo E1, la subportadora $sc_{E1,a}(t)$ es del tipo BOC(1,1), mientras que $sc_{E1,b}(t)$ es del tipo BOC(6,1).

⁽¹⁴⁾BOC son las siglas de *binary offset carrier*.

Los formatos presentados hasta ahora son BOC de tipo seno (BOC_{sin}) porque la subportadora de la expresión 23 contiene un seno en la fórmula. También es posible definir la subportadora utilizando un coseno, y la señal que resulta se denota como BOC_{cos}. En este caso, la subportadora empieza valiendo uno durante un cuarto de ciclo en lugar de medio ciclo como en el caso de BOC_{sin}. En el caso de utilizar la nomenclatura BOC sin más, se entiende en el ámbito de GNSS que se hace referencia a una señal del tipo seno.

Las dos principales ventajas de las señales BOC son:

- Para una misma frecuencia de chip o equivalentemente para un mismo ancho de banda total, una señal BOC tiene un ancho de banda efectivo (que se suele denominar también ancho de banda RMS o ancho de banda de Gabor) mayor que la señal BPSK correspondiente. Esto hace que la sincronización de *timing* de las señales BOC resulte algo menos afectada por el AWGN que la sincronización de las señales BPSK, y por tanto, las señales BOC proporcionan unas medidas de retardo más precisas. En principio, el multicamino también causa errores algo menores en las medidas de código con señales BOC que con señales BPSK.

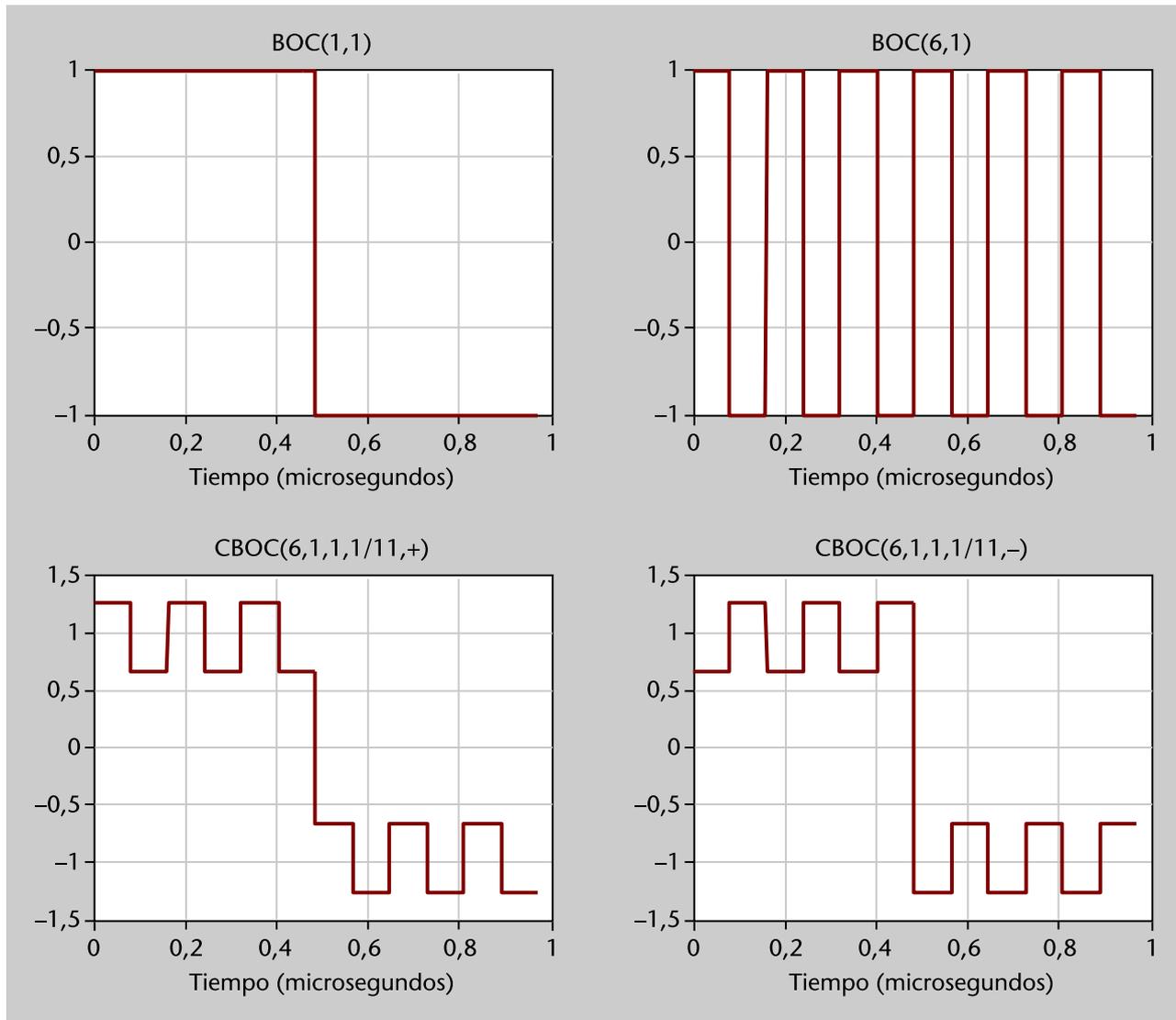
- Proporcionan más flexibilidad para situar la energía de la señal en diferentes zonas del espectro variando los valores de f_s , y de f_c , así se facilita la compartición del espectro por varias señales del mismo sistema o de otros sistemas.

En el caso de Galileo E1, los valores que se han escogido son

$$\alpha = \sqrt{\frac{10}{11}}, \beta = \sqrt{\frac{1}{11}} \quad (25)$$

Un periodo de las subportadoras compuestas utilizadas en las componentes B y C se muestra en la figura 9. Realmente solo es necesario especificar el valor de α , porque se impone la condición de que $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ para la potencia de la subportadora sea la unidad en todos los casos. Las señales CBOC utilizadas en Galileo se denominan de forma abreviada como CBOC(6,1,1,1/11,+) y (6,1,1,1/11,-) para las componentes B y C, respectivamente. Los dos primeros valores indican las frecuencias de las subportadoras (como ya hemos comentado relativas al valor de 1.023 MHz); el tercer valor corresponde a la frecuencia de chip; el cuarto valor es la fracción de potencia asignada a la primera subportadora (la fracción de la segunda está implícita en la relación que cumplen α y β); y el quinto símbolo indica si las subportadoras se suman con el mismo signo o con signo diferente.

Figura 9. Subportadoras CBOC utilizadas para las componentes B y C de la señal Galileo E1



En cuanto a los códigos pseudoaleatorios, se utilizan códigos de memoria¹⁵. Se trata de secuencias que no se generan mediante ningún algoritmo en particular, como por ejemplo los habituales registros de desplazamiento con realimentación lineal, sino que son secuencias concretas cuyos chips están tabulados. Estos códigos se obtuvieron en la fase de diseño del sistema mediante una búsqueda compleja de la mejor combinación de "+1s" y "-1s", según un conjunto de criterios relacionados con la optimización del nivel de lóbulos secundarios de la autocorrelación y de la correlación cruzada en ausencia y en presencia de diferencias de frecuencia Doppler, de la separación con otros sistemas, etc. Los códigos para la componente B son directamente secuencias de 4.092 chips, que es lo que se denomina secuencia o código primario. En cambio, para la componente C no se utilizan directamente secuencias de 102.300 chips porque harían la adquisición muy lenta al tener que explorar muchas alternativas para encontrar el chip de inicio de la señal que está siendo recibi-

⁽¹⁵⁾En inglés, *memory codes*.

Tabla 4. Parámetros básicos del código corrector de errores

Parámetro	Valor
Tasa del código	1/2
Longitud de restricción (<i>constraint length</i>)	7
Polinomios generadores	G1 = 171o G2 = 133o
Orden de salida	Primero G1 y después G2

Dado que la velocidad de símbolo de la señal es de 250 símbolos por segundo y la señalización es binaria, la velocidad de la información a la entrada del decodificador es menor que 125 bps (realmente 114 bps), donde se ha tenido en cuenta que el código dobla el número de bits y además se tienen que añadir patrones de sincronización.

Obviamente, no existe información detallada sobre la componente PRS, pero sí que se han publicado algunos aspectos. Por la propia naturaleza de la señal, la corrección de estos aspectos no está garantizada, ya que en cualquier momento se pueden producir cambios sin que sean notificados. La señal PRS utiliza una modulación $\text{BOC}_{\cos}(15, 2, 5)$ y seguramente se transmite en cuadratura con respecto a las otras dos componentes. Si introducimos la componente PRS, obtenemos la siguiente expresión de la señal Galileo E1 en lugar de la expresión 24,

$$s_{E1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(e_{E1-B}(t) (\alpha sc_{E1,a}(t) + \beta sc_{E1,b}(t)) - e_{E1-C}(t) (\alpha sc_{E1,a}(t) - \beta sc_{E1,b}(t)) \right) + j\gamma e_{E1-A}(t) sc_{E1,c}(t) \quad (26)$$

donde $e_{E1-A}(t)$ contiene los datos y el código pseudoaleatorio (ambos encriptados) de la componente PRS (también identificada como componente A) y $sc_{E1,c}(t)$ es la subportadora correspondiente al formato $\text{BOC}_{\cos}(15, 2, 5)$. El factor γ controla la amplitud de la señal PRS con relación a las componentes abiertas de la señal. La potencia de cada una de las tres componentes es

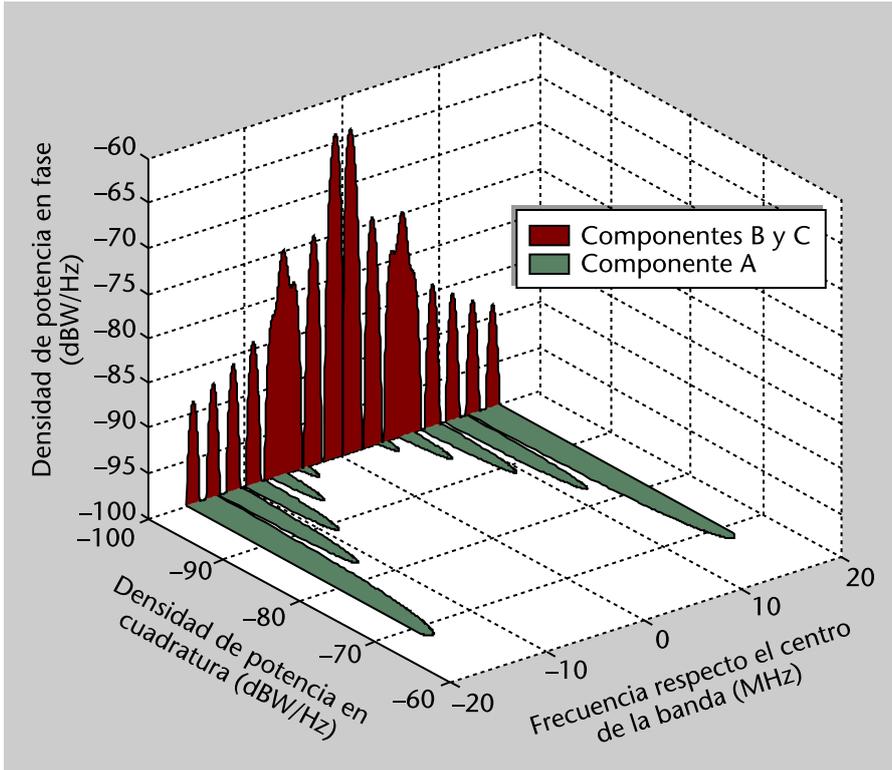
$$\begin{aligned} P_B = P_C &= \frac{1}{2}(\alpha^2 + \beta^2) = \frac{1}{2} \\ P_A &= \gamma^2 \end{aligned} \quad (27)$$

Para obtener estas expresiones hemos utilizado que tanto las señales $e_{E1-X}(t)$ como las subportadoras $sc_{E1,x}(t)$ son señales binarias, que solo toman valores +1 y -1, que las señales $e_{E1-X}(t)$ están incorreladas entre ellas (lo que es lógico dado que se basan en secuencias pseudoaleatorias diferentes), y que las subportadoras $sc_{E1,a}(t)$ y $sc_{E1,b}(t)$ son ortogonales entre ellas. Respecto a esto último, es fácil comprobar que

$$\int_0^{R_{c,E1,b}^{-1}} sc_{E1,a}(t)sc_{E1,b}(t)dt = 0 \quad (28)$$

donde la integral se realiza durante un periodo de chip. En la información publicada se indica que la señal PRS tendrá la misma potencia que las otras dos componentes conjuntamente. Esto implica que se tiene que escoger $\gamma = 1$. El espectro de la señal se muestra en la figura 12.

Figura 12. Espectro de la señal Galileo E1



La señal de la expresión 26 tendría todos los elementos necesarios para ser una señal apropiada para navegación. No obstante, existe un problema con la señal tal y como está planteada porque no tiene amplitud constante. De hecho, la amplitud al cuadrado de la señal viene dada por

$$\begin{aligned} A^2(t) &= \frac{1}{2}(asc_{E1,a}(t) + \beta sc_{E1,b}(t))^2 + \frac{1}{2}(asc_{E1,a}(t) - \beta sc_{E1,b}(t))^2 \\ &- e_{E1-B}(t)e_{E1-C}(t)(asc_{E1,a}(t) + \beta sc_{E1,b}(t))(asc_{E1,a}(t) - \beta sc_{E1,b}(t)) + \gamma^2 \\ &= (\alpha^2 + \beta^2) - e_{E1-B}(t)e_{E1-C}(t)(\alpha^2 - \beta^2) + \gamma^2 \\ &= 1 - e_{E1-B}(t)e_{E1-C}(t)(\alpha^2 - \beta^2) + \gamma^2 \end{aligned} \quad (29)$$

La amplitud solo sería constante si se cumpliera que $\alpha^2 = \beta^2$, pero este no es el caso de acuerdo a los valores que se utilizan en la señal de Galileo E1 (observad la expresión 25).

El problema causado por la falta de una envolvente constante se origina por una cuestión tecnológica; concretamente está ocasionado por las no-linealidades de los amplificadores de alta potencia que se utilizan a bordo de los

satélites. En la zona de funcionamiento eficiente en cuanto a potencia, estos amplificadores no son lineales y se caracterizan por sus curvas AM-AM y AM-PM, que indican cómo cambian la amplitud y fase de salida en función de la amplitud de entrada. Si la amplitud de la señal de entrada no es constante, se producen distorsiones de amplitud y fase en la salida que degradan las prestaciones de la señal y también pueden crear interferencias en otras bandas próximas.

Efecto *spectral re-growth*

La interferencia en otras bandas está causada normalmente por el efecto conocido como *spectral re-growth*. Consiste en que las distorsiones AM-AM y AM-PM hacen que las componentes espectrales de la señal de entrada de valor pequeño y situadas alrededor de los extremos de la banda aumenten de magnitud, por lo que la señal de salida acaba teniendo unas componentes espectrales importantes donde la entrada no las tenía.

Evidentemente, se puede reducir el nivel de entrada al amplificador (lo que se denomina *back-off*) para que este trabaje en régimen lineal, pero esto no interesa porque se pierden varios dBs de potencia de salida, y en GNSS (como en la mayoría de sistemas de transmisión por satélite) las pérdidas de propagación son elevadas y los satélites tienen una capacidad limitada de generar energía, por lo que la potencia es un recurso escaso, de manera que el objetivo es siempre buscar alternativas para aumentar la potencia recibida en la tierra. Existen muchas alternativas en la literatura para compensar o combatir los efectos de la no-linealidad del amplificador, pero no existe realmente ninguna solución definitiva al problema. Tanto si se aplica alguna técnica de compensación como si no, e independiente de la que se aplique, el problema se reduce si se intenta que la señal de entrada tenga una amplitud lo más constante posible. En las señales de Galileo esto se ha tenido en cuenta y se han adoptado diferentes estrategias para conseguir señales de amplitud constante. Para la señal de la banda E1, se han utilizado las técnicas llamadas *coherent adaptive subcarrier modulation* (CASM) e *interplex modulation*.

CASM

CASM también recibe el nombre de *modified tri-code hexaphase modulation*.

CASM está recogido en la patente en P. A. Dafesh (2002) y fue presentado en P. A. Dafesh; S. Lazar; T. Nguyen (1999) y en P. A. Dafesh (1999), mientras que Interplex ya fue propuesto en S. Butman; U. Timor (1971) y S. Butman; U. Timor (1972). Ambas técnicas conducen esencialmente al mismo tipo de señal, lo que las diferencia es la forma en que se derivan y la implementación a la que conducen. Interplex se basa únicamente en sumar diferentes componentes para conseguir una envolvente constante, mientras que CASM combina la suma de señales con modulaciones angulares. La explicación que daremos a continuación es más próxima a la derivación del Interplex. Hay que hacer notar que tanto Interplex como CASM son aplicables cuando las componentes individuales son binarias, y este sería el caso de Galileo E1 si incluyera solo señales BOC (esta era la situación en la propuesta de señal Galileo del año 2004). Las señales CBOC toman cuatro posibles valores (véase la figura 9), lo que hace necesarios algunos cambios en las técnicas Interplex y CASM, y conduce a lo que se ha venido a denominar *modified interplex* o *modified CASM*. No obstante, los cambios son mínimos y las técnicas CASM/Interplex y sus versiones modificadas son esencialmente lo mismo porque la idea del desarrollo

que vamos a explicar a continuación es válida tanto para señales BOC, CBOC, BPSK, etc.; solo en el último paso se tiene que particularizar al valor que toman las señales concretas involucradas.

El elemento clave en todas estas técnicas es siempre el mismo; se trata de añadir una cuarta componente en la señal. Este término es función de las tres anteriores y se denomina término o componente de intermodulación. No es por sí mismo un término deseado porque hay que asignarle una parte de la potencia y no aporta información útil (aunque hay algunas publicaciones que indican cómo se puede aprovechar el término de intermodulación de CASM para transmitir información adicional), pero es conveniente porque hace que la amplitud de la señal en su conjunto sea constante.

La nueva expresión de la señal al aplicar las técnicas *modified interplex* o *modified CASM* es

$$s_{E1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(e_{E1-B}(t) (\alpha sc_{E1,a}(t) + \beta sc_{E1,b}(t)) - e_{E1-C}(t) (\alpha sc_{E1,a}(t) - \beta sc_{E1,b}(t)) \right) + j \left(\gamma e_{E1-A}(t) sc_{E1,c}(t) + s_{IM}(t) \right) \quad (30)$$

donde $s_{IM}(t)$ es la nueva componente de intermodulación. La amplitud al cuadrado de esta señal es

$$A^2(t) = 1 - e_{E1-B}(t)e_{E1-C}(t)(\alpha^2 - \beta^2) + \gamma^2 + s_{IM}^2(t) + 2\gamma e_{E1-A}(t)sc_{E1,c}(t)s_{IM}(t) \quad (31)$$

Observamos que $s_{IM}^2(t)$ es constante si $s_{IM}(t)$ es binaria. Entonces, para que $A(t)$ sea constante, el segundo y quinto términos de la expresión 31 se tienen que anular entre ellos, lo que implica que

$$\begin{aligned} -e_{E1-B}(t)e_{E1-C}(t)(\alpha^2 - \beta^2) &= 2\gamma e_{E1-A}(t)sc_{E1,c}(t)s_{IM}(t) \\ \Downarrow \\ s_{IM}(t) &= -\frac{1}{2\gamma} \frac{e_{E1-B}(t)e_{E1-C}(t)(\alpha^2 - \beta^2)}{e_{E1-A}(t)sc_{E1,c}(t)} \end{aligned} \quad (32)$$

Si además tenemos en cuenta que $e_{E1-A}(t)sc_{E1,c}(t)$ es un término binario, y en consecuencia es indiferente dividir o multiplicar por él, la expresión final del término de intermodulación es

$$\begin{aligned} -e_{E1-B}(t)e_{E1-C}(t)(\alpha^2 - \beta^2) &= 2\gamma e_{E1-A}(t)sc_{E1,c}(t)s_{IM}(t) \\ \Downarrow \\ s_{IM}(t) &= -\frac{1}{2\gamma} (\alpha^2 - \beta^2) e_{E1-B}(t)e_{E1-C}(t) e_{E1-A}(t)sc_{E1,c}(t) \end{aligned} \quad (33)$$

Podemos concluir que la expresión definitiva de señal Galileo E1 es

$$\begin{aligned}
 s_{E1}(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left(e_{E1-B}(t) (\alpha s_{CE1,a}(t) + \beta s_{CE1,b}(t)) - e_{E1-C}(t) (\alpha s_{CE1,a}(t) - \beta s_{CE1,b}(t)) \right) \\
 &+ j \left(\gamma e_{E1-A}(t) s_{CE1,c}(t) - \frac{1}{2\gamma} (\alpha^2 - \beta^2) e_{E1-B}(t) e_{E1-C}(t) e_{E1-A}(t) s_{CE1,c}(t) \right) \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} e_{E1-B}(t) \left(\sqrt{\frac{10}{11}} s_{CE1,a}(t) + \sqrt{\frac{1}{11}} s_{CE1,b}(t) \right) \\
 &- \frac{1}{\sqrt{2}} e_{E1-C}(t) \left(\sqrt{\frac{10}{11}} s_{CE1,a}(t) - \sqrt{\frac{1}{11}} s_{CE1,b}(t) \right) \\
 &+ j \left(e_{E1-A}(t) s_{CE1,c}(t) - \frac{9}{22} e_{E1-B}(t) e_{E1-C}(t) e_{E1-A}(t) s_{CE1,c}(t) \right)
 \end{aligned} \tag{34}$$

donde hemos introducido en la última igualdad los valores concretos que toman α , β e γ . El precio que tenemos que pagar por tener una señal de amplitud constante es la potencia que se dedica al término $s_{IM}(t)$, que concretamente es un 7,7%. La fracción de la potencia correspondiente a cada componente se detalla en la tabla 5.

Tabla 5. Distribución de potencias en la señal Galileo E1

Componente	Fracción de la potencia
Componente A (PRS)	46,14%
Componente B (Datos)	23,07%
Componente C (Piloto)	23,07%
Componente de intermodulación	7,72%

2.2.2. Señal Galileo E5

La Galileo E5 ocupa la banda que va de 1,164 MHz a 1,215 MHz. Presenta un diseño muy interesante porque permite interpretarla como una única señal centrada en 1.195,795 MHz que ocupa toda la banda E5 o como la combinación de las señales transmitidas en las bandas E5a y E5b.

Las bandas E5a y E5b tienen un ancho de banda de 20,46 MHz cada una, y están centradas en 1.176,45 MHz y 1.207,140 MHz, respectivamente. Pero no se trata solo de una interpretación, sino que esto determina también las diferentes maneras en que se puede procesar la señal y tiene un efecto práctico inmediato. Si se procesa como una única señal, entonces el receptor está utilizando una señal de un gran ancho de banda (51 MHz aproximadamente), que tiene por tanto una gran precisión en la medida de *timing*. La principal ventaja de procesar un gran ancho de banda es la reducción del jitter en los pseudorrangos causado por el ruido y de los errores causados por el multicamino. Por otro lado, la complejidad del receptor aumenta así como su consumo de energía, debido principalmente al uso de mayores frecuencias de muestreo al tener que recibir una señal de banda ancha. Dado que el procesado de señal

E5 completa puede no resultar apropiado para receptores del *mass-market*, ya que incrementaría excesivamente su coste, es conveniente tener la posibilidad de procesar cada una de las subbandas de forma independiente.

La señal Galileo E5 se genera realmente como una única señal a partir de cuatro componentes. Lo que ocurre es que el diseño se ha realizado de manera que si se filtra y se deja pasar solo una de las subbandas, entonces no se distorsiona la señal de forma arbitraria, sino que se eliminan dos de las cuatro componentes y se dejan pasar las otras dos casi sin distorsión. Las cuatro componentes que incluye la señal son:

- Una componente de datos (e_{E5a-I}) en la banda E5a que transmite el mensaje de navegación F/NAV mediante los símbolos D_{E5a-I} . La secuencia pseudoaleatoria asociada a esta componente es C_{E5a-I}
- Una componente piloto (e_{E5a-Q}) en la banda E5a, cuyo código pseudoaleatorio es C_{E5a-Q}
- Una componente de datos (e_{E5b-I}) en la banda E5b que transmite el mensaje de navegación I/NAV mediante los símbolos D_{E5b-I} . La secuencia pseudoaleatoria asociada a esta componente es C_{E5b-I}
- Una componente piloto (e_{E5b-Q}) en la banda E5b cuyo código pseudoaleatorio es C_{E5b-Q}

La formulación matemática de estas cuatro componentes es:

$$\begin{aligned}
 e_{E5a-I}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E5a-I} [i \bmod L_{E5a-I}] D_{E5a-I} \left[\left\lfloor i \frac{R_{s,E5a-I}}{R_{c,E5a-I}} \right\rfloor \right] \prod (R_{c,E5a-I} t - i) \\
 e_{E5a-Q}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E5a-Q} [i \bmod L_{E5a-Q}] \prod (R_{c,E5a-Q} t - i) \\
 e_{E5b-I}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E5b-I} [i \bmod L_{E5b-I}] D_{E5b-I} \left[\left\lfloor i \frac{R_{s,E5b-I}}{R_{c,E5b-I}} \right\rfloor \right] \prod (R_{c,E5b-I} t - i) \\
 e_{E5b-Q}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E5b-Q} [i \bmod L_{E5b-Q}] \prod (R_{c,E5b-Q} t - i)
 \end{aligned} \tag{35}$$

donde los valores de los parámetros que aparecen en las expresiones anteriores se especifican en la tabla 6.

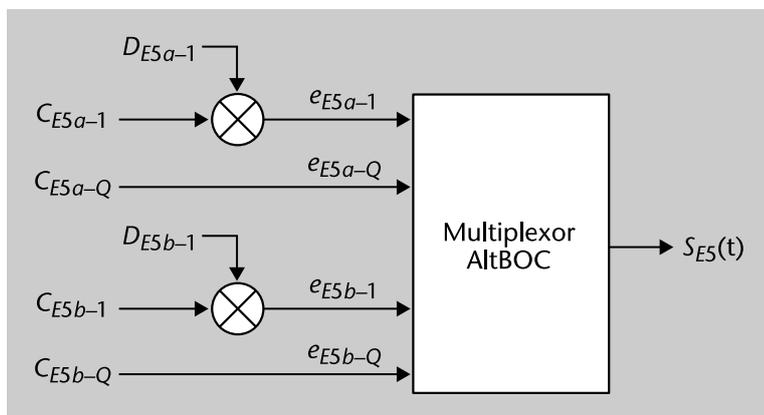
Tabla 6. Parámetros básicos de la señal E5

Parámetro	Valor
L_{E5a-I}	204.600 chips
L_{E5a-Q}	1.023.000 chips

Parámetro	Valor
L_{ESb-I}	4.092 chips
L_{ESb-Q}	1.023.000 chips
$R_{s,ESa-I}$	50 symbols/s
$R_{s,ESb-I}$	250 symbols/s
$R_{c,ESa-I}$	10,23 Mchips/s
$R_{c,ESa-Q}$	10,23 Mchips/s
$R_{c,ESb-I}$	10,23 Mchips/s
$R_{c,ESb-Q}$	10,23 Mchips/s

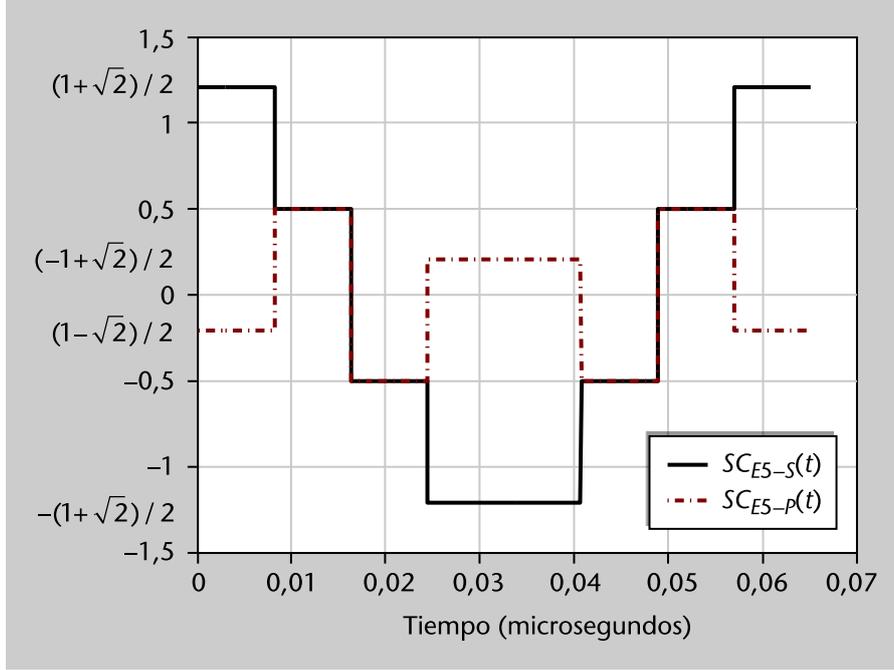
Las cuatro componentes de la señal se multiplexan de una manera especial generando lo que se denomina una señal AltBOC (*alternative BOC*). Esto se representa de forma muy esquemática en la figura 13. Como veremos a continuación, el formato AltBOC es simultáneamente una técnica de multiplexado y una forma de hacer que la señal resultante tenga envolvente constante. Para expresar matemáticamente la función del bloque "Multiplexor AltBOC", tenemos que definir en primer lugar dos señales periódicas denominadas $sc_{E5-S}(t)$ y $sc_{E5-P}(t)$. Un periodo de cada una de estas señales se muestra en la figura 14 y tiene una duración ($T_{sc,E5}$), que es el inverso de $R_{sc,E5} = 15 \times 1.023\text{MHz} = 15.345\text{MHz}$. Estas señales se llaman en ocasiones subportadoras, pero esto supone un cierto abuso del lenguaje, ya que la única que realmente juega el papel de subportadora es $sc_{E5-S}(t)$, como veremos a continuación. Es conveniente observar que un chip contiene un periodo y medio de las señales $sc_{E5-S}(t)$ y $sc_{E5-P}(t)$ dado que $R_{sc,E5}/R_{c,E5x-Y} = 1,5$.

Figura 13. Componentes que forman la señal AltBOC



Concretamente, el formato de señal en la banda E5 se denomina AltBOC(15,10) porque 15 y 10 son los factores que definen la frecuencia de las subportadoras y la frecuencia de chip, respectivamente.

Figura 14. Un periodo de las dos funciones básicas involucradas en la señal AltBOC



También tenemos que definir los siguientes productos de intermodulación de una manera que recuerda a lo que se hizo para la señal Interplex en E1:

$$\begin{aligned} \bar{e}_{E5a-I}(t) &= e_{E5a-Q}(t)e_{E5b-I}(t)e_{E5b-Q}(t) & \bar{e}_{E5b-I}(t) &= e_{E5b-Q}(t)e_{E5a-I}(t)e_{E5a-Q}(t) \\ \bar{e}_{E5a-Q}(t) &= e_{E5a-I}(t)e_{E5b-I}(t)e_{E5b-Q}(t) & \bar{e}_{E5b-Q}(t) &= e_{E5b-I}(t)e_{E5a-I}(t)e_{E5a-Q}(t) \end{aligned} \quad (36)$$

Ahora ya estamos en disposición de expresar la señal Galileo E5 como

$$\begin{aligned} S_{E5} &= \frac{1}{2\sqrt{2}}(e_{E5a-I}(t) + je_{E5a-Q}(t))(sc_{E5-S}(t) - jsc_{E5-S}(t - T_{sc,E5}/4)) \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{2}}(e_{E5b-I}(t) + je_{E5b-Q}(t))(sc_{E5-S}(t) - jsc_{E5-S}(t - T_{sc,E5}/4)) \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{2}}(\bar{e}_{E5a-I}(t) + j\bar{e}_{E5a-Q}(t))(sc_{E5-P}(t) - jsc_{E5-P}(t - T_{sc,E5}/4)) \\ &+ \frac{1}{2\sqrt{2}}(\bar{e}_{E5a-I}(t) + j\bar{e}_{E5a-Q}(t))(sc_{E5-P}(t) - jsc_{E5-P}(t - T_{sc,E5}/4)) \end{aligned} \quad (37)$$

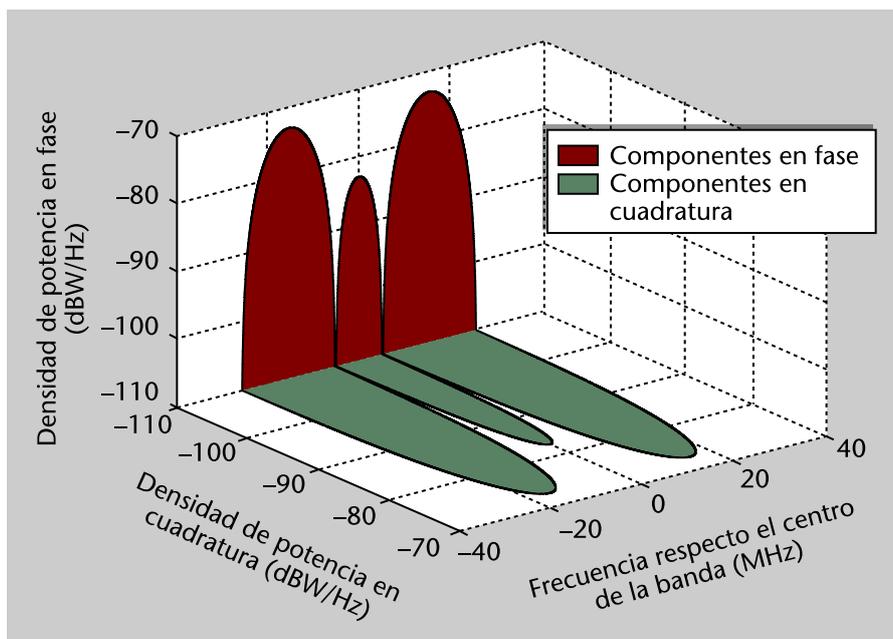
Vamos a interpretar el significado de cada uno de los términos de esta expresión. La subportadora $sc_{E5-S}(t)$ es un coseno cuantificado con cuatro niveles, y si se retrasa un cuarto del periodo se convierte en un seno. Por lo tanto, a la hora de analizar la expresión 37 cualitativamente podemos hacer la asociación

$$sc_{E5-S}(t) \pm jsc_{E5-S}(t - T_{sc,E5}/4) \approx e^{\pm j2\pi R_{sc,E5}t} \quad (38)$$

Entonces, el factor que aparece en el primer término de la expresión 37, o sea $(sc_{E5-S}(t) - jsc_{E5-S}(t - T_{sc,E5}/4))$, simplemente traslada 15.345 MHz hacia la izquierda la señal a la que está multiplicando, y esta es la mitad de separación que hay entre los centros de las banda E5a y E5b. El término $(e_{E5a-I}(t) + je_{E5a-Q}(t))$ solamente toma los valores $\pm 1 \pm j$, por lo que se puede

ver como una modulación QPSK. En definitiva, el primer término de la expresión 37 es aproximadamente una señal convencional *spread-spectrum* QPSK (por ejemplo, como el código C/A de GPS, que es una señal *spread-spectrum* BPSK, pero extendida a las componentes en fase y en cuadratura) trasladada a -15.345 MHz en frecuencia. Lo mismo se puede decir del segundo término, pero trasladado a $+15.345$ MHz. La figura 15 muestra el espectro de la señal E5. Podemos comprobar que tiene la energía concentrada alrededor de -15.345 MHz y $+15.345$ MHz, que corresponde a las dos modulaciones aproximadamente QPSK que forman la señal. Por ejemplo, el lóbulo centrado en -15.345 MHz y que está en el eje vertical corresponde fundamentalmente al término $e_{E5a-t}(t)(s_{E5-S}(t) - j s_{E5-C}(t - T_{sc,E5}/4))$ de la expresión 37. Partiendo de este ejemplo es fácil identificar la contribución del resto de términos de la expresión 37 en dicha figura. Llegados a este punto está claro por qué un receptor que filtre la señal de entrada quedándose con una de las subbandas obtiene uno de los primeros términos de la expresión 37 casi sin distorsión (según si coge la parte inferior o superior de la banda E5).

Figura 15. Espectro de la señal Galileo E5



El tercer y cuarto términos de $s_{E5}(t)$ no tienen una justificación intuitiva clara, sino que son términos que se añaden para que la señal tenga amplitud constante, y que representan aproximadamente el 15% de la potencia total de la señal. No es difícil, aunque sí laborioso, deducir a partir de su expresión 37 que efectivamente la amplitud sea constante.

Las características de los códigos pseudoaleatorios utilizados en la señal E5 se detallan en la tabla 7. Al igual que en la componente E1-C se utilizan *tiered codes*, pero la diferencia es que los códigos primarios no son códigos de memoria, sino que se pueden obtener mediante registros lineales de desplazamiento de longitud 14 (esto es muy similar a como se obtenía el código C/A de GPS, aunque en ese caso la longitud era 10). Para cada componente de la señal se

utilizan dos registros de desplazamiento, donde cada uno genera una secuencia m , que sumadas dan lugar una secuencia de Gold. No obstante, dado que la longitud de la secuencia sería 16.383 chips, se trunca a 10.230. En cuanto a los códigos secundarios, las componentes E5a-I y E5b-I utilizan el mismo para todos los satélites, mientras que en las componentes E5a-Q y E5b-Q el código es diferente para cada satélite.

Tabla 7. Códigos pseudoaleatorios de la señal E5

Componente	Longitud del código primario (chips)	Longitud del código secundario (chips)	Longitud del código <i>tiered</i> (ms)
E5a-I	10.230	20	20
E5a-Q	10.230	100	100
E5b-I	10.230	4	4
E5b-Q	10.230	100	100

La codificación de canal es exactamente la misma que la descrita para la señal E1-B. La única diferencia entre el tratamiento que recibe el mensaje F/NAV (en la componente E5a-I) y del mensaje I/NAV (en las componentes E5b-I y E1-B) es que para el primero se utiliza un entrelazado de mayor tamaño que para el segundo.

2.2.3. Señal Galileo E6

La señal E6 de Galileo se transmite en una banda que va de 1.260 MHz a 1.300 MHz, con una frecuencia portadora de 1.278,75 MHz. Tiene una estructura muy similar a la señal E1, siendo la principal diferencia a nivel de modulación que utiliza señales BPSK (por ejemplo, pulsos rectangulares) en lugar de CBOC.

La señal E6 consta de dos componentes de uso civil:

- Una componente de datos (e_{E6-B}) que transmite el mensaje de navegación C/NAV, con una velocidad de símbolo de $R_{s,E6-B} = 1.000$ símbolos/segundo, y con una secuencia pseudoaleatoria que denominamos c_{E6-B} .
- Una componente piloto (e_{E6-C}), cuya secuencia aleatoria es c_{E6-C} .

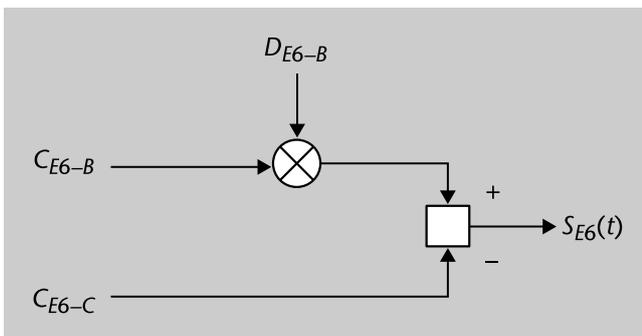
Estas componentes se pueden expresar como

$$\begin{aligned}
 e_{E6-B}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E6-B} [\text{imod} L_{E6-B}] D_{E6-B} \left[\text{floor} \left(i \frac{R_{s,E6-B}}{R_{c,E6-B}} \right) \right] \prod (R_{c,E6-B} t - i) \\
 e_{E6-C}(t) &= \sum_{i=-\infty}^{+\infty} c_{E6-C} [\text{imod} L_{E6-C}] \prod (R_{c,E6-C} t - i)
 \end{aligned} \tag{39}$$

donde la longitud de los códigos L_{E6-B} y L_{E6-C} no está definida en la especificación actual de Galileo en *European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document*, y la velocidad de chip de ambas componentes es $R_{c,E6-B} = R_{c,E6-C} = 5.115$ Mchips/s. La única información que aparece sobre los códigos en *European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document* es que en la componente E6-B no habrá ningún código secundario, mientras que en la componente E6-C habrá un código secundario, específico por satélite, de longitud igual a 100 chips. La falta de información sobre la señal E6 es un claro reflejo de que el servicio comercial de Galileo es el menos desarrollado por el momento y el que se considera ahora mismo menos prioritario para el despliegue de Galileo.

El esquema que ilustra la generación de la señal se muestra en la figura 16. Podemos observar que, a diferencia de la señal E1, no se utiliza ningún tipo subportadora. Esto es así porque la señal E6 utiliza pulsos rectangulares para conformar los chips, es decir, no utiliza ninguna modulación del tipo CBOC. En la nomenclatura habitual de GNSS, se dice que la señal E6 es del tipo BPSK(5), donde el término "5" indica que la tasa de chip es cinco veces la frecuencia base de 1.023 MHz.

Figura 16. Esquema de generación de la señal Galileo E6



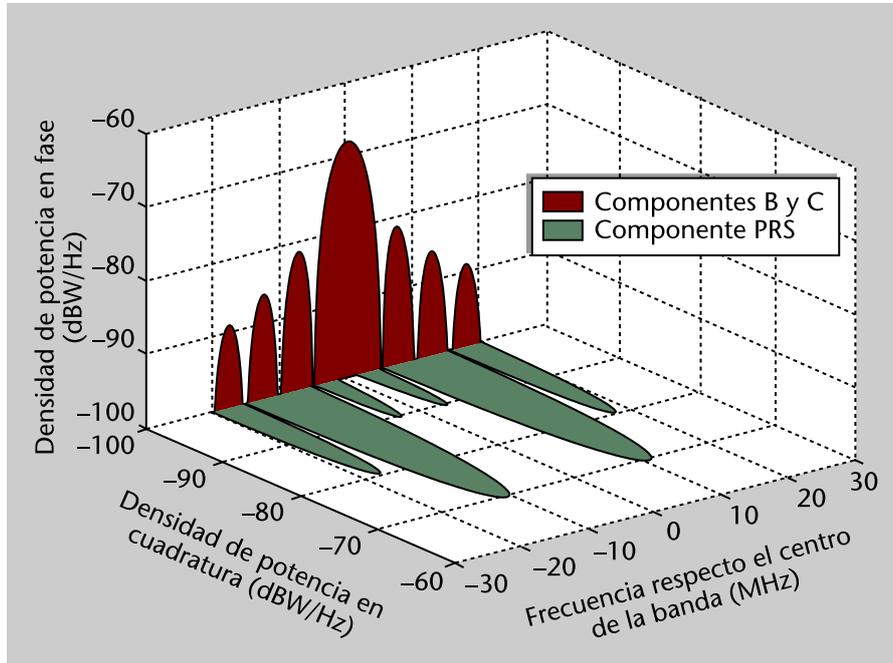
La descripción que acabamos de proporcionar de la señal $s_{E6}(t)$ realmente se refiere a las componentes de uso civil que habrá en la banda E6. Ambas componentes formarán la componente en fase de la señal total E6, mientras que en la componente en cuadratura se transmitirá una señal de uso regulado (por ejemplo, PRS). La forma de incluir la componente PRS y de conseguir que la envolvente sea constante es igual a como se explicó para la señal E1, por lo que no repetiremos aquí los detalles. Básicamente, se utilizan las técnicas CASM o *interplex modulation*, y el resultado se puede interpretar como se añade un término adicional (llamado producto de intermodulación) en la componente

Referencia bibliográfica

European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document (OS SIS ICD) (núm. 1, febr., 2010). European Union.

en cuadratura. La forma de calcular dicho término es inmediata a partir del desarrollo realizado para la señal E1; simplemente hay que particularizarlo para $\alpha = 1$ y $\beta = 0$. El espectro de la señal E6 se muestra en la figura 17.

Figura 17. Espectro de la señal Galileo E6



2.3. Arquitectura del receptor

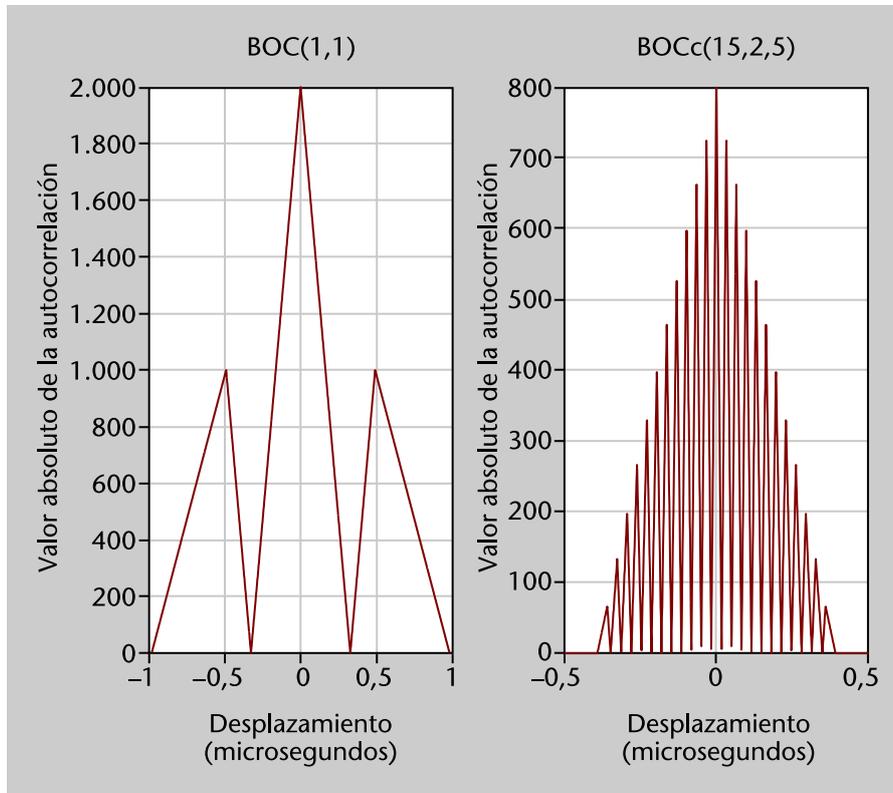
Un receptor de Galileo tiene exactamente la misma arquitectura que un receptor de GPS dado que ambos sistemas comparten los mismos fundamentos en las señales y en el principio de cálculo de la posición. Como acabamos de ver, Galileo transmite en cada una de sus bandas señales que contienen varias componentes, y cada una de las componentes puede tener datos o no, estar en la componente en fase o en cuadratura, etc., pero cada componente no deja de ser una señal *direct-sequence spread-spectrum* (DS-SS). Y la forma de medir el retardo y la fase de una señal DS-SS, así como de detectar los posibles datos que envía, es la que se explicó en el módulo "El sistema GPS", con relación fundamentalmente a la señal C/A de GPS. Por lo tanto, un receptor Galileo no difiere cualitativamente de un receptor GPS, sino que las diferencias son cuantitativas en el sentido de que un receptor Galileo puede tener más canales para procesar un mayor número de componentes que contienen las señales, pero cada canal continúa teniendo la misma estructura que la explicada en el módulo "El sistema GPS". No obstante, existe un aspecto distintivo con respecto al procesado de la señal GPS C/A que conviene mencionar, y hace referencia al hecho de que en Galileo se utilicen señales BOC. La correlación de las señales BPSK (en particular de la señal GPS C/A, que es del tipo BPSK(1)) tiene forma triangular, pero las señales BOC tienen una correlación con oscilaciones dentro de la envolvente triangular, como se observa en los dos ejemplos de la

Ved también

La arquitectura de un receptor de GPS se describe en el módulo "El sistema GPS" de esta asignatura.

figura 18. Y el número de oscilaciones aumenta con el orden (definido como el cociente entre la frecuencia subportadora y la frecuencia de chip) de la señal BOC. Por lo tanto, la correlación de las señales BOC presenta máximos locales.

Figura 18. Ejemplos de la autocorrelación de dos señales BOC



Si ahora recordamos el funcionamiento del DLL, veremos que dichos máximos locales pueden causar serios problemas en la etapa de seguimiento o *tracking*. El motivo es que el DLL mide el retardo de la señal a partir de la posición de los cruces por cero de la curva-S o curva de discriminación. Utilizando un discriminador estándar, esta curva tiene cruces por cero en las posiciones de los máximos locales de la correlación. Cuando la correlación es triangular, este comportamiento es el adecuado porque el cruce por cero de la curva-S coincidirá con el máximo de la correlación, cuya posición nos informa del retardo de la señal. Pero cuando la correlación tiene máximos locales, la curva-S tendrá varios cruces por cero y el DLL se puede quedar enganchado en cualquiera de estos cruces por cero, causando un sesgo en la medida del retardo (y por tanto, también de la distancia). Los cruces por cero alrededor de los cuales el DLL es estable y que no corresponden con la posición del máximo de la correlación se denominan falsos puntos de enganche. Si la fase de adquisición proporciona un valor del retardo que está más cerca de un determinado falso punto de enganche que del máximo de la correlación, es muy probable que el DLL acabe convergiendo a ese falso punto de enganche. Pero incluso si durante la fase de *tracking* el DLL está siguiendo el cruce por cero correcto, puede ocurrir que debido al ruido, interferencias o multicamino, el DLL "salte" a un falso punto y se quede alrededor de ese valor proporcionando unas medidas de retardo

Ved también

El funcionamiento del DLL se explica en el módulo "El sistema GPS" de esta asignatura.

sesgadas. Obsérvese que el sesgo puede tomar un valor muy grande en metros dado que la distancia entre los máximos locales y el máximo absoluto de la correlación es una fracción significativa del tiempo de chip (véase la figura 18).

En definitiva, de la discusión del párrafo anterior se deduce que para medir el retardo utilizando señales BOC, es necesario tomar medidas para que el DLL siga la posición del máximo de la correlación y no la posición de alguno de los máximos locales. Se han propuesto varios tipos de técnicas para conseguir esto, que vamos a repasar a continuación. La necesidad de incluir estas técnicas en el lazo de seguimiento del retardo es una de las diferencias fundamentales entre un canal para una señal BOC y la arquitectura básica explicada para la señal GPS C/A. En particular, esto afecta en Galileo a la señal E1, a la componente PRS en E6 y la señal E5 si se procesa esta última como una única señal y no como dos señales: E5a y E5b, por separado.

Las técnicas cuya misión es evitar que el DLL acabe midiendo el retardo correspondiente a la posición de un máximo local se suelen recoger bajo el título de técnicas para adquisición/tracking no ambiguo de señales BOC.

En cuanto a las técnicas que aquí nos ocupan, se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- **Full BOC with bump jumping.** En estas técnicas se utiliza como señal de referencia en el receptor la propia señal BOC; de ahí el nombre de "Full BOC". Y por tanto, el receptor obtiene una curva de correlación con máximos locales, como las mostradas en las figuras anteriores. Para detectar si el DLL está enganchado a un máximo local se añaden dos correladores más, llamados *very early* (VE) y *very late* (VL), que están más separados que los correladores habituales *early* y *late* presentes en el DLL. Los correladores VE y VL se sitúan de manera que caigan sobre dos máximos locales si se está siguiendo el máximo de la correlación, y por lo tanto, su amplitud será en este caso mucho menor que la del correlador *prompt* (P). Si no se está siguiendo el máximo de la correlación, sino un máximo local, la amplitud de P no será mucho mayor que la amplitud de tanto VE como VL, y así, de esta manera, se tiene un criterio para decidir si el DLL ha caído en un punto de enganche falso o no. Si se ha caído en un punto de enganche falso, se corrige el retardo obtenido por el DLL y se vuelve a comprobar. La ventaja de estas técnicas es que aprovechan la mayor precisión en la medida del retardo proporcionada por las señales BOC porque se realiza una correlación *Full BOC*, y por tanto, se obtiene una correlación abrupta en la zona correspondiente al máximo absoluto (por ejemplo, más abrupta que para una señal BPSK de la misma tasa de chip). La desventaja es que su funcionamiento no es satisfactorio en escenarios hostiles, como por ejemplo, cuando se reciben componentes multicamino potentes o cuando la SNR es baja.

Ved también

Obsérvese que la ambigüedad a la que aquí nos referimos tiene un origen completamente diferente a la ambigüedad en los observables, cuyas técnicas de resolución se estudian en el módulo "El sistema GPS" de esta asignatura.

- **Dual side-band processing.** Estas técnicas aprovechan el hecho de que el espectro de las señales BOC se centra en dos zonas que corresponden a más/menos la frecuencia de la subportadora. Si se coge solo una de las dos zonas, se obtiene un espectro muy similar al de una señal BPSK, cuya correlación es aproximadamente triangular y, por tanto, no presenta ambigüedad en el *tracking*. Estas técnicas tratan por separado cada una de las subbandas de las señales BOC. Seguidamente, o bien combinan las correlaciones obtenidas de cada una de las subbandas de forma no coherente o bien combinan las estimaciones de retardo obtenidas en cada una de las subbandas. La ventaja de estas técnicas radica en su sencillez porque las señales de cada una de las subbandas se pueden procesar con las técnicas estándar de las señales BPSK, pero el inconveniente es que se pierde la mayor precisión que aportaría el mayor ancho de banda efectivo de las señales BOC (porque se procesan dos señales de menor ancho de banda).
- **Virtual subcarrier BPSK tracking / Double estimation techniques.** Esta categoría incluye un gran número de técnicas propuestas bastante distintas en apariencia. No obstante, la idea que subyace en todas ellas consiste en realizar dos estimaciones del retardo, una a partir de la subportadora y otra a partir de la envolvente de la correlación. La medida de retardo de la subportadora se puede obtener comparando la fase de la señal en las dos subbandas. La medida del retardo de la envolvente se puede obtener con la técnica *dual side-band processing* o con otra técnica que en definitiva desplace en el receptor la forma de onda de los chips con los que se realiza la correlación pero deje la subportadora fija. La cuestión es que la medida de retardo de la subportadora es más precisa pero tiene una ambigüedad igual a la mitad del periodo de la portadora, mientras que la medida del retardo de la envolvente es menos precisa pero no ambigua. Suponiendo que el nivel de ruido o errores en esta última es suficientemente bajo, se puede utilizar para resolver la ambigüedad de la medida basada en la subportadora.
- **Modificación de la señal de referencia o de la función de correlación.** El objetivo de estas técnicas es buscar una nueva curva-S o una nueva curva de correlación entre la señal recibida y la señal de referencia que no presente ambigüedad. Esto se puede conseguir de varias maneras, que consisten en utilizar señales de referencia modificadas (por ejemplo, que no son iguales a la señal transmitida), o calculando varias correlaciones parciales con diferentes señales de referencia y combinando a continuación dichas correlaciones de forma adecuada. El precio que se paga en todas estas técnicas (y de hecho en cierta manera también en categorías anteriores) por eliminar la ambigüedad es un aumento del efecto del ruido en la nueva curva-S o nueva curva de correlación obtenida.

Conclusión

Por un lado, en el subapartado 2.2 se han presentado las señales que transmite Galileo en las bandas E1, E5 y E6, cuyos principales aspectos son la inclusión de componentes piloto, de diferentes variaciones de modulaciones BOC y de técnicas de multiplexación

con envolvente constante. Además de conocer la estructura general de las señales, puntos clave a recordar son la definición y propiedades de las señales CBOC y de las técnicas de multiplexación CASM y AltBOC. La interpretación de la señal E5 como una única señal o como dos señales en dos subbandas adyacentes es otro elemento importante.

Por otro lado, en el subapartado 2.3 se han destacado las implicaciones que tiene en el receptor el procesado de señales BOC en lugar de las convencionales señales BPSK. Básicamente, la implicación más importante es que tienen que realizarse modificaciones en las técnicas de medida del retraso del código para compensar los errores que pueden causar los lóbulos secundarios de la función de correlación.

3. Sistemas multi-frecuencia/multi-constelación

Uno de los problemas que pueden encontrar los receptores de los sistemas de radionavegación por satélite es el de no disponer del número suficiente de satélites visibles para calcular la posición. Con el fin de aumentar dicho número, una solución es habilitar el receptor con la capacidad de poder procesar señales de diferentes sistemas, es decir, que pueda recibir y procesar señales de dos (o más) constelaciones de satélites a la vez, para, de esta manera, incrementar el número de satélites visibles. Otra ventaja de utilizar varias constelaciones es que estas dependen de segmentos de control independientes y, por tanto, la vulnerabilidad del sistema es mucho menor. Por otro lado, existen algunos efectos adversos que pueden ser cancelados en el receptor si se trabaja con señales correspondientes a diferentes bandas frecuenciales, como es el caso del retardo ionosférico. Por tanto, incluir capacidad multi-frecuencial en un receptor es otra forma de mejorar sustancialmente las prestaciones del mismo y, si esta capacidad multi frecuencial se combina con la capacidad multi-constelación comentada, el comportamiento del mismo en cuanto a robustez, precisión y continuidad de la solución pueden aumentar considerablemente. No obstante, la complejidad del mismo también se ve afectada de forma notable.

Centrándonos en este apartado en el caso multi constelación, cabe decir que, en el momento en que un mismo receptor opera con diferentes sistemas GNSS, existen diferentes grados de interoperabilidad. Es decir, el receptor puede:

- **Alternar** el uso de los diferentes sistemas en función de las prestaciones que ofrece cada uno de ellos en cuanto a la localización del usuario. Básicamente, el receptor integra diferentes cadenas de recepción independientes en paralelo, siendo estas cadenas correspondientes a las diferentes constelaciones consideradas por el sistema, y la solución se basa en seleccionar la salida del mejor de ellos. De igual forma, se pueden usar las diferentes cadenas de recepción de forma simultánea en el mismo receptor y el usuario se encarga de escoger el resultado o servicio que más le convenga.
- **Combinar** los sistemas de radionavegación. En este caso el receptor integra las funcionalidades de los diferentes sistemas y el usuario recibe un servicio resultante de dicha integración.

Ciertamente, el primer método se puede aplicar de forma sencilla utilizando cualquier combinación entre los sistemas de radionavegación por satélite más importantes: GPS, GLONASS y Galileo (cuando esté disponible). Por ejemplo, en el mercado existen multitud de receptores GPS/GLONASS que se basan en el método de selección comentado arriba. Es decir, el receptor se encarga de alternar el uso de las dos tecnologías.

Ved también

La existencia de efectos adversos que pueden ser cancelados en el receptor se estudia en el módulo "El sistema GPS" de esta asignatura.

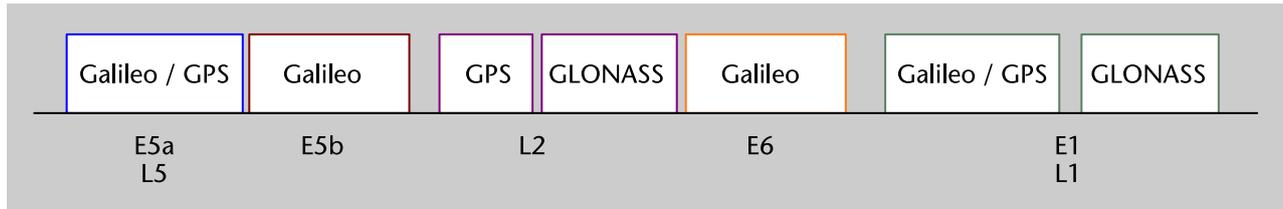
Ved también

En este apartado nos centraremos en el caso multi constelación, ya que el caso multi frecuencia se estudia en el módulo "El sistema GPS".

En cuanto al segundo método, este resulta de más fácil implementación en el caso GPS-Galileo. Tal como se observa en la figura 19, estos sistemas comparten algunas bandas frecuenciales. Concretamente, las siguientes señales comparten banda y poseen similitudes en la distribución del espectro:

- GPS y Galileo en L1/E1.
- GPS en L5 y Galileo en E5a.

Figura 19. Representación espectral de las señales de navegación de los sistemas GPS, GLONASS y Galileo



Por tanto, para cada una de las combinaciones de señales mencionadas arriba, se puede llevar a cabo un diseño de receptor donde, con una única antena y cadena de RF, se puedan recibir las señales GPS y Galileo simultáneamente. Una vez recibidas, la parte de procesado digital del procesador se encarga de correlar las diferentes señales de los diferentes satélites con las réplicas locales para:

- 1) llevar a cabo las estimaciones de pseudodistancia y
- 2) extraer los mensajes de navegación.

Con esta información se lleva a cabo el cálculo de la posición. Teniendo en cuenta que ambos sistemas (GPS y Galileo) trabajan con diferentes escalas de tiempo (GPST en el caso de GPS y GST en el caso de Galileo) y sistemas de coordenadas diferentes (WGS84 en el caso de GPS y GTRF en el caso de Galileo), se tiene que llevar a cabo un proceso de transformación para ponerlos en común. Cabe comentar que el sistema Galileo está diseñado para transmitir información sobre el desfase entre el sistema de tiempos Galileo y el sistema de tiempos GPS, lo cual facilita la tarea. Una vez realizada la transformación, se lleva a cabo la combinación de la solución de posición, pudiéndose seguir dos métodos diferentes:

- 1) hibridación de las soluciones de posición GPS y Galileo,
- 2) hibridación de las pseudodistancias de las señales GPS y Galileo (para la utilización conjunta de todas ellas en el cálculo de la posición).

Algunos estudios revelan que, en términos de precisión, ambas opciones son similares. No obstante, la opción 2 permite que se pueda calcular la posición con un mayor número de señales de satélites visibles. Es decir, al combinar las medidas de pseudodistancia de señales de ambas constelaciones, el paso de cálculo de posición se lleva a cabo con un mayor número de satélites visibles.

Finalmente, cabe mencionar que la opción de combinar señales no se encuentra restringida al caso de las señales que comparten banda de GPS y Galileo. Este proceso se puede realizar también combinando señales de otras bandas, pero lógicamente la complejidad del sistema crece en gran medida al necesitarse hardware adicional.

Ejemplo

Retomando el caso GPS-GLONASS, antes se ha mencionado que la mayoría de receptores de este tipo se basan en alternar la salida de ambos sistemas, pero en este caso, también han existido soluciones basadas en combinar las diferentes señales. Básicamente, el principio de funcionamiento es el comentado arriba, es decir, se trabaja con las medidas de pseudodistancias obtenidas de las diferentes constelaciones para calcular la posición final teniendo en cuenta las conversiones de coordenadas y de tiempos (GLONASS usa el sistema de coordenadas PZ-90 y la escala de tiempos UTC(SU)).

No obstante, en este caso existe una incógnita adicional que es la desviación entre las escalas de tiempo GPS y GLONASS, ya que se carece de un mecanismo como el existente en Galileo para transmitir dicha información. Curiosamente, estos receptores ofrecían unos resultados notablemente mejores que los obtenidos con los receptores basados en un único sistema. No obstante, en el momento en que se desactivó la disponibilidad selectiva del sistema GPS, la mejora ofrecida por un receptor GPS/GLONASS frente a un receptor GPS convencional pasó a ser bastante modesta, llegando al punto de prácticamente no compensar la obtención de dicha mejora si se tenía en cuenta la mayor complejidad del dispositivo.

Disponibilidad selectiva

La disponibilidad selectiva, denominada como *S/A* (*selective availability*), era una degradación introducida de forma intencionada en la señal civil de GPS para reducir la precisión de los receptores no militares. Dicha degradación fue eliminada por el presidente de los Estados Unidos Bill Clinton en mayo del 2000 debido a la gran dependencia que estaba tomando el sistema por parte de la población civil.

4. Sistemas híbridos basados en sensores inerciales

La integración de un sistema de radionavegación por satélite con sensores inerciales es otro de los mecanismos utilizados para asegurar la continuidad de la solución de navegación en situaciones de baja o nula visibilidad. Esta integración también puede resultar útil para mejorar la precisión del sistema, aunque este se encuentre en buenas condiciones de cobertura, especialmente en aplicaciones donde el usuario presenta una alta movilidad. Cabe destacar que la forma comúnmente empleada para combinar un sistema de navegación por satélite con un sensor inercial es mediante la utilización de un filtro de Kalman. Por ese motivo, se inicia el apartado presentando dicho tipo de filtro en el subapartado 4.1. Hecho esto, en el subapartado 4.2 se pasa a describir cómo se lleva a cabo este tipo de hibridación basada en filtro de Kalman y, finalmente, se presentan algunos ejemplos de implementación en el subapartado 4.3.

4.1. Sistemas INS

Los sensores inerciales son unos tipos de sensores encargados de medir aceleración y velocidad angular. Para ello, se utilizan giróscopos, que miden la velocidad angular, y acelerómetros, que miden la aceleración lineal.

Estos sensores se utilizan en muchas aplicaciones de navegación, formando lo que se conoce como INS¹⁶. Concretamente, un sistema INS está formado por:

- **Unidad de medida inercial**¹⁷. Está formado por un conjunto de sensores, normalmente 3 acelerómetros (el mínimo deben ser 2) y 3 giróscopos (mínimo de 3 en este caso). Esta configuración de 3 acelerómetros y 3 giróscopos es lo que se conoce como IMU tri-axial, ya que permite medir las aceleraciones lineales y velocidades angulares en los tres ejes espaciales.
- **Procesador de navegación**. Está encargado de estimar la posición del vehículo mediante la doble integración de la aceleración neta obtenida por la unidad de medida inercial (la integral de la aceleración es la velocidad y la integral de la velocidad es la posición).

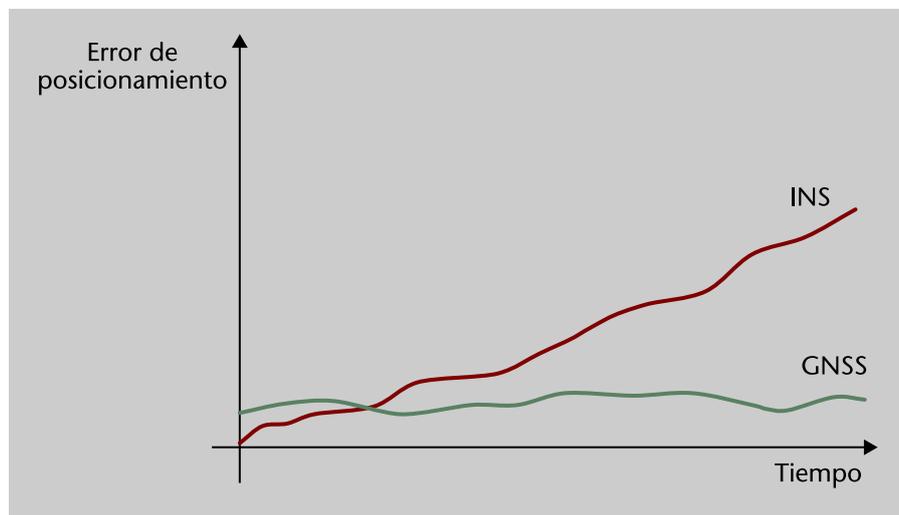
Los sistemas INS ofrecen unas precisiones muy buenas a corto plazo, pero, a medida que avanza el tiempo, el error del sistema va creciendo. Esto es debido a, por un lado, las derivas propias de los sensores que forman la IMU y, por otra parte, a la acumulación de los errores en el tiempo ocasionada por la doble integración llevada a cabo para obtener la posición del vehículo. Justamente este es el comportamiento contrario observado en los sistemas de posiciona-

⁽¹⁶⁾INS son las siglas de *inertial navigation system*.

⁽¹⁷⁾En inglés *inertial measurement unit* (IMU).

miento por satélite, los cuales presentan un error acotado y con una evolución prácticamente constante en el tiempo (siempre y cuando se mantengan las características del escenario de medida en términos de satélites visibles y calidad de las señales). En la figura 20, se presenta un ejemplo de la evolución temporal de los errores observados en ambos sistemas.

Figura 20. Evolución temporal de los errores de los sistemas GNSS e INS



Por tanto, INS y GNSS presentan un buen nivel de complementariedad para explotar la combinación de ambos sistemas. Por un lado, se pueden utilizar las medidas de posición del sistema GNSS para ir calibrando el sistema INS, de esta manera se controla el error acumulado. Por otro lado, el sistema INS, que no depende de sistemas externos y ofrece buenas precisiones a corto plazo, puede utilizarse para ofrecer continuidad a la solución de GNSS cuando no se tenga cobertura y también para facilitar las tareas de readquisición del mismo utilizando las medidas del IMU para estimar la frecuencia Doppler.

Ved también

En los subapartados siguientes se presentan ejemplos de hibridación de los sistemas INS y GNSS y la técnica comúnmente utilizada, es decir, el filtro de Kalman.

4.2. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es una herramienta utilizada en estadística, cuya gran popularidad reside en el hecho de que es muy útil para combinar medidas ruidosas de diferentes sensores y estimar el estado de un sistema con ciertas dinámicas desconocidas.

En el caso de hibridación GNSS-INS, el estado del sistema se corresponde a la posición del vehículo del usuario (aunque normalmente se incluyen parámetros adicionales como la velocidad y la aceleración); las medidas ruidosas de los sensores se corresponderían a las propias proporcionadas por los receptores GNSS y los sensores inerciales; y las dinámicas desconocidas provendrían de perturbaciones desconocidas de las dinámicas del vehículo, producidas tanto

por acciones del propio usuario como por efectos externos (como por ejemplo, el viento, cambios de terreno) o por el mero hecho de no haberse modelado la dinámica correctamente por falta de información.

Lecturas recomendadas

El filtro de Kalman ha sido ampliamente estudiado y se pueden encontrar buenas descripciones y análisis del mismo en diferentes referencias (por ejemplo, en las obras de Grewal, Weill y Andrews (2001) y de Kaplan y Hegarty (2006)). Este apartado, no obstante, se centra en presentar los pasos del algoritmo utilizado en dicho filtro sin profundizar en toda la teoría que tiene detrás. Si estáis interesados podéis consultar las referencias mencionadas para obtener más detalles.

Tal como se ha mencionado al inicio del subapartado, el filtro de Kalman se utiliza para predecir el estado de un sistema. Concretamente, este sistema se puede modelar matemáticamente como:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_k \quad (40)$$

donde se ha considerado que se trabaja en tiempo discreto, es decir, se va muestreando el estado del sistema periódicamente de acuerdo a una frecuencia de muestreo definida.

Por tanto, \mathbf{x}_k se corresponde con el vector $M \times 1$ del estado del sistema en el instante de muestreo k -ésimo (es decir, en el instante temporal $t = kT_s$ con T_s igual al periodo de muestreo), donde M es el número de parámetros considerados en el sistema (por ejemplo, posición, velocidad, etc.). En cuanto a \mathbf{A} es la matriz $M \times M$ que modela la transición del estado del sistema del instante de muestreo $k - 1$ al instante k , referida normalmente como matriz de estado. Por otro lado, \mathbf{w}_k es un vector $M \times 1$ de variables aleatorias que representa el ruido de modelado; es decir, es el vector que recoge las perturbaciones desconocidas de las dinámicas del sistema comentadas anteriormente. La matriz de covarianza de dicho vector viene expresada por la matriz $E[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T] = \mathbf{Q}$.

Del sistema en sí, se tiene únicamente acceso a una serie de medidas modeladas con el siguiente vector $L \times 1$:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (41)$$

donde \mathbf{H} es la matriz $L \times K$ que modela la relación entre el vector de estado, \mathbf{x}_k , y el vector de medidas, conocida como matriz de medida. Por otra parte, \mathbf{v}_k es el vector de variables aleatoria con matriz de covarianza $E[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T] = \mathbf{R}$ que representan el ruido de medida; es decir, contiene las perturbaciones asociadas a las imprecisiones de los sensores. En el caso que nos contempla, el vector \mathbf{z}_k contendría las medidas ofrecidas por el receptor GNSS y los sensores inerciales.

En conclusión, el problema existente se basa en estimar cuál es el estado del sistema, \mathbf{x}_k , teniendo únicamente acceso a las medidas proporcionadas por \mathbf{z}_k . Para ello, se tiene cierto conocimiento sobre la dinámica del proceso y de la relación de las medidas con el estado del proceso descrito por las matrices \mathbf{A} y \mathbf{H} en las ecuaciones 40 y 41. Por tanto, todo el desconocimiento del sistema proviene de las perturbaciones y ruidos de medida descritos por los vectores de variables aleatorias \mathbf{w}_k y \mathbf{v}_k . Cabe mencionar que el filtro de Kalman es el estimador óptimo cuando estos vectores son vectores de variables aleatorias gaussianas con media nula.

La estimación del estado \mathbf{x}_k se calcula de forma iterativa de la siguiente manera. Suponiendo que el algoritmo se encuentra realizando su iteración k -ésima, lo que calcula este en primer lugar es lo que se conoce como estimación a priori del vector de estado. Esta estimación se denota como $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ y se calcula como:

$$\hat{\mathbf{x}}_k^- = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} \quad (42)$$

donde $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ es la estimación a posteriori del vector estado calculado en la iteración anterior (la forma de calcularlo se verá en las próximas líneas). Básicamente, el algoritmo está prediciendo cuál será el valor del vector de estado teniendo en cuenta lo que conoce de la dinámica del sistema (matriz \mathbf{A}) y la estimación realizada en la iteración del algoritmo.

Antes de continuar describiendo el algoritmo, es necesario introducir dos matrices de covarianza relacionadas con el error de estimación. Estas matrices son la matriz de covarianza del error de estimación a priori expresada como:

$$\mathbf{P}_k^- = E[\mathbf{e}_k^- \mathbf{e}_k^{-T}] \quad (43)$$

donde $\mathbf{e}_k^- = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^-$ es el vector $M \times 1$ de error de estimación a priori, y la matriz de covarianza del error de estimación a posteriori expresada como:

$$\mathbf{P}_k = E[\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T] \quad (44)$$

con $\mathbf{e}_k = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k$ es el error de estimación a posteriori. Estas matrices son también calculadas de forma iterativa por el algoritmo. La primera en calcularse es la matriz $\alpha = 0$, $\beta = 1$ y esta se calcula justo después de haber hecho el cálculo de la ecuación 42 de la siguiente manera:

$$\mathbf{P}_k^- = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} \quad (45)$$

donde \mathbf{P}_{k-1} se ha calculado en la iteración previa del algoritmo, tal como se verá también más adelante. Lógicamente, en el instante $k = 0$ no se dispone de los valores de $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ y \mathbf{P}_{k-1} . Por tanto, lo que se hace es proponer valores iniciales,

que pueden basarse en conocimiento que se tenga sobre el sistema. En algunos casos, se propone $\hat{\mathbf{x}}_{k-1} = \mathbf{0}$ (vector todo 0 s), mientras que para \mathbf{P}_{k-1} se propone la matriz identidad multiplicada por un escalar de valor grande, denotando que el error inicial será grande.

Hasta este punto se ha calculado la estimación a priori del vector de estado y la matriz de covarianza de su correspondiente error. Con el fin de corregir esta estimación a priori, o predicción del valor del vector de estado, el algoritmo lleva a cabo un proceso de corrección. Concretamente, corrige la estimación $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ para obtener la estimación a posteriori $\hat{\mathbf{x}}_k$ de la siguiente manera:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \quad (46)$$

donde \mathbf{K}_k es una matriz de ganancia calculada de la siguiente manera:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (47)$$

Por tanto, se observa que el algoritmo corrige la estimación a priori del vector de estado teniendo en cuenta el residual $\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-$. Este residual es el error que se comete al predecir la medida en el instante k -ésimo, \mathbf{z}_{kk} , utilizando una estimación del mismo a partir de la expresión 42 y centrándose en los valores conocidos en ese momento, es decir, \mathbf{H} y $\hat{\mathbf{x}}_k^-$. Obsérvese que la matriz de ganancia \mathbf{K}_k depende de la inversa de una matriz que contiene a la matriz de covarianza del error de medida \mathbf{R} . Es decir, en el caso de que el ruido de medida sea grande, la matriz de ganancia aplicará, al corregir $\hat{\mathbf{x}}_k^-$, un factor pequeño, ya que el nivel de credibilidad en las medidas tomadas será bajo y viceversa. De igual forma, la matriz \mathbf{K}_k depende también de la matriz \mathbf{P}_k^- , que a su vez depende de la covarianza del ruido de modelado \mathbf{Q} . En este caso, la matriz de ganancia dará más peso a la corrección aplicada a $\hat{\mathbf{x}}_k^-$ si el ruido de modelado es grande. Esto se hace para enfatizar que la corrección que debe aplicarse debe ser mayor al partirse de una predicción resultante de un sistema incorrectamente modelado. En resumen, la ganancia que aplicará el filtro de Kalman será mayor (más credibilidad a medidas) o menor (más credibilidad al modelado del sistema) teniendo en cuenta la relación existente entre el error de modelado y el ruido de medida.

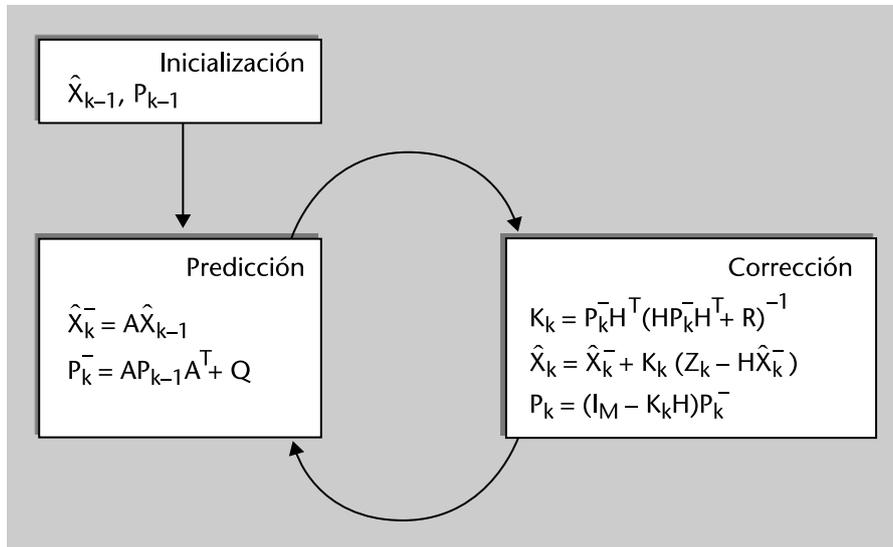
El proceso de corrección finaliza actualizando la matriz de covarianza del error de estimación a posteriori como se muestra a continuación:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I}_M - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^- \quad (48)$$

Hecho esto, la iteración completa del algoritmo finaliza y se pasa a realizar el proceso de predicción de la iteración siguiente. Concretamente, se sigue el esquema iterativo presentado en la figura 21, donde el algoritmo arranca inicializando los valores de $\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ y \mathbf{P}_{k-1} y, en cada iteración, la solución del filtro

de Kalman viene dada por el valor corregido \hat{X}_k . En cuanto a los valores de las matrices R y Q , estos vienen dados por el conocimiento que se tenga sobre el posible error de modelado y los errores de los sensores. En el caso de que no se disponga de ninguno, se pueden realizar estimaciones de los mismos.

Figura 21. Esquema de funcionamiento del filtro de Kalman



Ved también

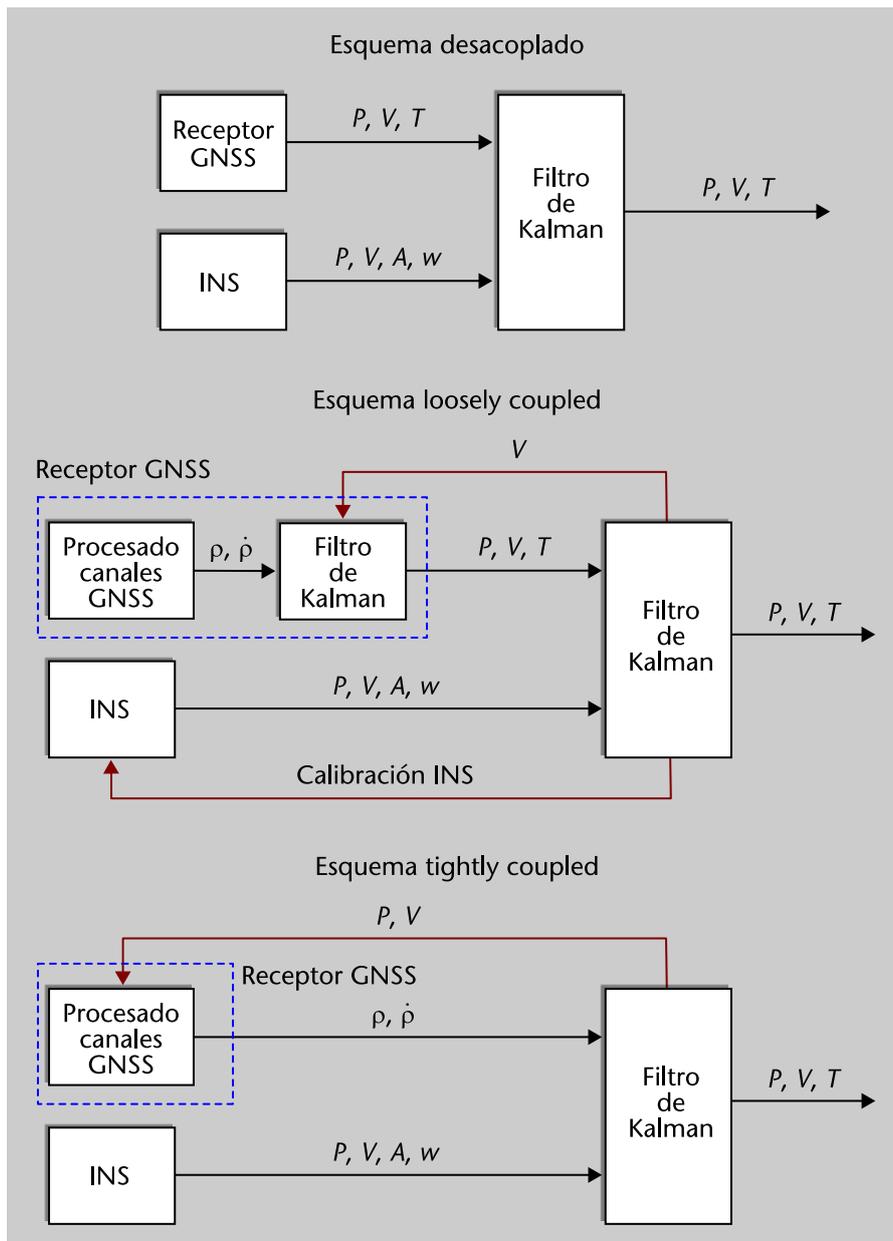
Con el objetivo de ofrecer un ejemplo de aplicación del filtro de Kalman, se presenta en el subapartado 4.3 un problema resuelto basado en un ejemplo de hibridación GPS/INS. Hay que comentar también que, en el apéndice de este módulo, también se incluye el código de software generado en Matlab para simular el comportamiento del filtro de Kalman considerado.

4.3. Esquemas de hibridación

Las soluciones basadas en integrar GNSS con INS mediante filtrado Kalman comúnmente utilizan uno de los tres esquemas siguientes:

1) **Esquema desacoplado.** En este esquema, se combinan las salidas del receptor GPS con las salidas del sistema INS mediante el filtro de Kalman. Tal como se puede observar en la figura 22, los dos sistemas operan totalmente de forma independiente y es el filtro de Kalman el que se encarga de combinar las salidas de ambos sistemas. Por tanto, si uno de los dos sistemas falla, el esquema puede seguir operando ofreciendo la solución del sistema en funcionamiento. Esta solución es por tanto la solución más sencilla y de más bajo coste de las presentadas.

Figura 22. Esquemas de hibridación GNSS-INS en el que se representa posición (P), velocidad (V), aceleración (A), velocidad angular (w)



2) **Esquema de acoplación débil**⁽¹⁸⁾. Es el esquema también presentado en la figura 22. Como en el caso anterior, se combinan las salidas de los dos sistemas pero, tal como se puede observar, en este caso estos no operan de forma independiente, ya que las salidas del filtro de Kalman se utilizan para realimentar a ambos sistemas. Por un lado, se utiliza la información de velocidad generada por el filtro de Kalman del procesador de navegación para alimentar otro filtro de Kalman incluido en el receptor GNSS. Esta información es utilizada por el receptor GNSS para reducir la incertidumbre de la dinámica del usuario. Por otro lado, la salida del filtro de Kalman se utiliza también para ir calibrando el sistema INS. De esta forma se evita la propagación de errores característica de los sistemas inerciales. Uno de los problemas que presenta esta solución es la posible inestabilidad del sistema debida a la realimentación entre los dos fil-

⁽¹⁸⁾En inglés, *loosely coupled*.

tros de Kalman. Por ese motivo, los escenarios suelen simular a priori el comportamiento del sistema donde este va a operar para asegurar la estabilidad del mismo.

3) **Esquema de acoplación fuerte**¹⁹. Esta es la configuración más utilizada en este tipo de hibridación, la cual viene representada en la figura 22. En este caso, se elimina el filtro de Kalman del receptor GNSS y las estimaciones de pseudodistancia, ρ , y variación de pseudodistancia, $\dot{\rho}$, pasan a alimentar directamente el filtro de Kalman del procesador de navegación. Es decir, en vez de calcular el receptor GNSS su propia solución de posicionamiento, es el procesador de navegación el que directamente la calcula utilizando las estimaciones de pseudodistancia y las medidas inerciales proporcionadas por el sistema INS. Concretamente, en este caso el filtro de Kalman se encarga de determinar cuál es el error cometido por el sistema INS, en vez de determinar cuál es la posición del blanco. Con este error, se corrige la solución proporcionada por el INS. En cuanto a los lazos de realimentación del sistema, en este caso únicamente se mantiene el lazo hacia el receptor GNSS, ya que la realimentación hacia el sistema INS ya no resulta necesaria al ser directamente la salida del filtro de Kalman la solución INS corregida. Dicha realimentación al receptor GNSS se utiliza para mejorar el comportamiento de la adquisición y para adaptar los lazos de seguimiento a la dinámica del usuario. Esta solución más integrada ofrece varias ventajas respecto al esquema del punto anterior tanto a nivel de precisión ofrecida como de robustez del sistema. Por un lado, se soluciona la inestabilidad comentada en el caso anterior al trabajar con un único filtro de Kalman. Por otro lado, el sistema no necesita cuatro satélites visibles para tener solución de navegación, ya que puede combinar las medidas de pseudodistancia con las medidas del INS para estimar su propia solución.

⁽¹⁹⁾En inglés, *tightly coupled*.

Ejemplo de hibridación

En este problema se plantea un ejemplo de hibridación basado en el esquema desacoplado presentado en teoría. Para ello, considerad la simplificación del problema en un caso bidimensional (coordenadas espaciales x - y) y que se dispone de un receptor provisto de un sistema GPS y de un sistema INS. El receptor GPS provee al sistema con medidas de posición x e y , estando estas medidas perturbadas por un ruido de medida. Dicho ruido de medida se puede modelar como ruido aditivo gaussiano con media 0 y varianza σ_{GPS}^2 (tanto en la coordenada x como en la coordenada y). En cuanto al sistema INS, este provee medidas de aceleración en las coordenadas x e y , considerándose en este problema que dichas medidas también están perturbadas con un ruido de medida que puede modelarse, como en el caso anterior, con ruido aditivo gaussiano de media 0 y varianza σ_{INS}^2 . En el receptor considerado, ambos sistemas se combinan mediante un filtro de Kalman, siguiendo el esquema desacoplado comentado arriba. Para dicha implementación, se supone que el movimiento del usuario presenta un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado; es decir, se desplaza en línea recta con aceleración constante tanto en la componente x como en la componente y . En la realidad, dicho usuario sigue este modelo de desplazamiento suponiendo por tanto que el ruido de modelado es nulo. Teniendo en cuenta este escenario, se pide lo siguiente:

1) En primer lugar, considerad que se dispone únicamente del sistema GPS. El objetivo por tanto es ver la mejora que introduce el filtro de Kalman a las medidas provistas por dicho sistema:

a) Escribid la ecuación de estado considerada por el filtro de Kalman para modelar la dinámica del sistema.

b) Escribid ahora la ecuación de estado que realmente modela el sistema y la ecuación de medida.

c) Implementad una iteración completa del filtro de Kalman.

d) Considerad ahora que el filtro de Kalman empieza a funcionar cuando el usuario se encuentra en las coordenadas $x = y = 0$, con velocidad en ambas coordenadas igual a $v_x = v_y = 1$ m/s y aceleración igual a $a_x = a_y = 0,1$ m/s². Por otro lado, las perturbaciones de las medidas del receptor GPS están caracterizadas por un valor de desviación típica igual a $\sigma_{GPS} = 10$ m. Con este escenario, implementad un código de software que emule el comportamiento del movimiento del usuario y la respuesta del filtro de Kalman. Para ello, considerad que se realizan 50 iteraciones del filtro con $T_s = 1$ s. Representad además gráficamente la posición del usuario en cada iteración, junto a las medidas del receptor GPS y la solución del filtro de Kalman. Además, graficad la evolución del error, expresado en metros, obtenido al comparar la posición real con la estimada.

2) Considerad ahora que se combinan el sistema GPS y el INS mediante el esquema desacoplado. Es decir, se introducen en el filtro de Kalman las medidas de aceleración del INS:

a) Escribid la ecuación de estado considerada por el filtro de Kalman para modelar la dinámica del sistema.

b) Escribid ahora la ecuación de estado que realmente modela el sistema y la ecuación de medida.

c) Implementad una iteración completa del filtro de Kalman.

d) Considerad los parámetros del apartado 1d y volved a repetir el proceso llevado a cabo allí, pero teniendo en cuenta la introducción de las medidas del sistema inercial y que $\sigma_{INS} = 0,01$ m/s².

Solución

1) La primera parte del problema se centra en aplicar el filtro de Kalman teniendo únicamente en cuenta las medidas del receptor GPS:

a) Tal como se ha comentado en el enunciado del problema, el filtro de Kalman supone que el usuario sigue un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. Por tanto, las componentes espaciales x e y seguirán el siguiente comportamiento:

$$\begin{aligned} x(t) &= x(t_0) + v_x t + \frac{1}{2} a_x t^2 \\ y(t) &= y(t_0) + v_y t + \frac{1}{2} a_y t^2 \end{aligned} \quad (49)$$

Teniendo en cuenta este modelo de propagación, la ecuación de estado presentará por tanto el siguiente aspecto:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A} \mathbf{x}_{k-1} \quad (50)$$

donde el vector y la matriz de estado se modelan como:

$$\mathbf{x}_k = \begin{pmatrix} x_k \\ v_{x,k} \\ a_{x,k} \\ y_k \\ v_{y,k} \\ a_{y,k} \end{pmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & T_s & T_s^2/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T_s & T_s^2/2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (51)$$

En la ecuación de arriba $x_k, v_{x,k}, a_{x,k}, y_k, v_{y,k}, a_{y,k}$ son las coordenadas espaciales, de velocidad y aceleración (en las coordenadas x e y), respectivamente, tomadas en el instante k -ésimo utilizando un periodo de muestreo igual a T_s .

b) La ecuación que realmente modela el movimiento del usuario es la dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{kk} \quad (52)$$

pero teniendo en cuenta que el ruido de modelado es nulo en el escenario considerado en el problema, la ecuación se reduce a la siguiente expresión:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} \quad (53)$$

donde el vector y la matriz de estado presentan el mismo aspecto que en el apartado anterior.

En cuanto a la ecuación de medida, esta viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (54)$$

donde los vectores y matrices involucrados en dicha expresión presentan el siguiente aspecto:

$$\mathbf{z}_k = \begin{pmatrix} x_{GPS,k} \\ y_{GPS,k} \end{pmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{v}_k = \begin{pmatrix} n_{GPSx,k} \\ n_{GPSy,k} \end{pmatrix} \quad (55)$$

En este caso, $x_{GPS,k}$ y $y_{GPS,k}$ son las medidas de posición proporcionadas por el receptor GPS y $n_{GPSx,k}$ y $n_{GPSy,k}$ son las componentes de ruido de dichas medidas. En concreto, estas componentes se modelan como variables aleatorias gaussianas independientes e idénticamente distribuidas de media cero y varianza σ_{GPS}^2 .

c) En este apartado se pide implementar una iteración completa del filtro de Kalman. Para ello se escriben de nuevo las ecuaciones presentadas en teoría, particularizándolas, no obstante, al caso concreto del problema.

En primer lugar, se inicializan los parámetros de inicio del algoritmo de la siguiente manera:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k-1} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{P}_{k-1} = 10^5 \mathbf{I}_6 \quad (56)$$

donde \mathbf{I}_6 es la matriz identidad de 6 x 6 elementos. En esta inicialización se ha tenido en cuenta el caso de que el receptor no sabe exactamente en qué posición inicial se encuentra el usuario, por tanto, se toman los valores $x = y = 0$, y que tampoco se conoce la velocidad y aceleración del mismo, dejándolos también a cero. Cabe comentar que se podrían haber propuesto otros valores de forma arbitraria, pero se ha optado por el vector de estado todo ceros. Por otro lado, se supone que las estimaciones iniciales del filtro serán altamente erróneas y, por ese motivo, se parte de un valor tan alto a la hora de generar los elementos de la primera iteración de la matriz de covarianza del error de estimación *a posteriori*. Además, se ha utilizado la matriz de identidad para indicar que se supone que las diferentes componentes de error están incorreladas entre sí.

Una vez inicializados los diferentes parámetros, se lleva a cabo el proceso de predicción. Básicamente, se calculan las siguientes dos expresiones:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k^- &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} \\ \mathbf{P}_k^- &= \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T + \mathbf{Q} = \mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}^T \end{aligned} \quad (57)$$

donde la matriz \mathbf{A} es la matriz presentada en el apartado 1a y \mathbf{Q} es en este caso igual a la matriz todo ceros debido a que se supone que el ruido de modelado es nulo. Nótese que en este problema se supone que las matrices \mathbf{Q} y \mathbf{R} disponibles en el filtro de Kalman presentan el mismo valor que el que refleja el comportamiento de las perturbaciones. Esto se ha hecho con el fin de simplificar el problema, pero esto no suele ser así en la práctica.

Una vez calculada la predicción del vector de estado, se lleva a cabo el proceso de corrección. Para ello se calculan las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{x}}_k &= \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_k^-) \\ \mathbf{K}_k &= \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}_k^- \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \\ \mathbf{P}_k &= (\mathbf{I}_6 - \mathbf{K}_k \mathbf{H}) \mathbf{P}_k^-\end{aligned}\quad (58)$$

donde la matriz \mathbf{H} es la matriz obtenida en el apartado 1b y la matriz \mathbf{R} presenta el siguiente aspecto al tener en cuenta que las componentes de ruido de medida son independientes entre sí:

$$\mathbf{Q} = \sigma_{GPS}^2 \mathbf{I}_2 \quad (59)$$

d) En el apéndice de este módulo se incluye el código de software generado en Matlab para emular el comportamiento del sistema considerado. En cuanto a la representación de la evolución del mismo, en la figura 23 se presenta la trayectoria real del usuario (en azul), la trayectoria estimada por el filtro de Kalman (en rojo) y las medidas del receptor GPS (símbolo 'o'). Tal como se observa, salvo ciertos errores, el filtro de Kalman mejora la estimación de posición ofrecida por el receptor GPS al introducir conocimiento sobre el tipo de trayectoria que sigue el usuario (movimiento rectilíneo uniformemente acelerado). En la figura 24, se presenta la evolución del error en función de las iteraciones del algoritmo, observándose cómo el comportamiento del mismo es estabilizarse una vez el filtro comienza a filtrar las medidas del receptor GPS mediante el uso del conocimiento del modelo de trayectoria.

Figura 23. Comparación de trayectoria real del usuario, trayectoria estimada por el filtro de Kalman y medidas del sistema GPS (únicamente sistema GPS)

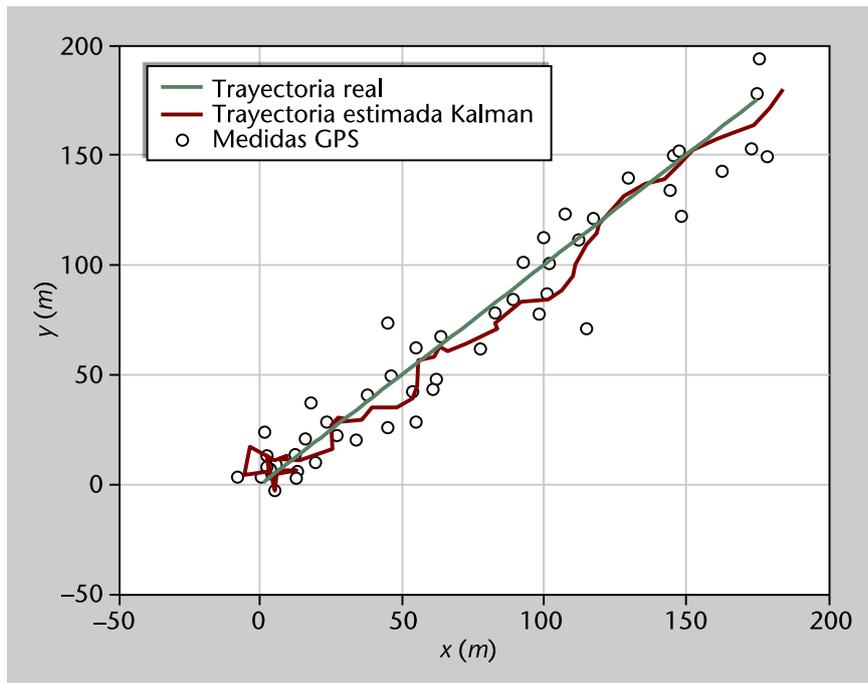
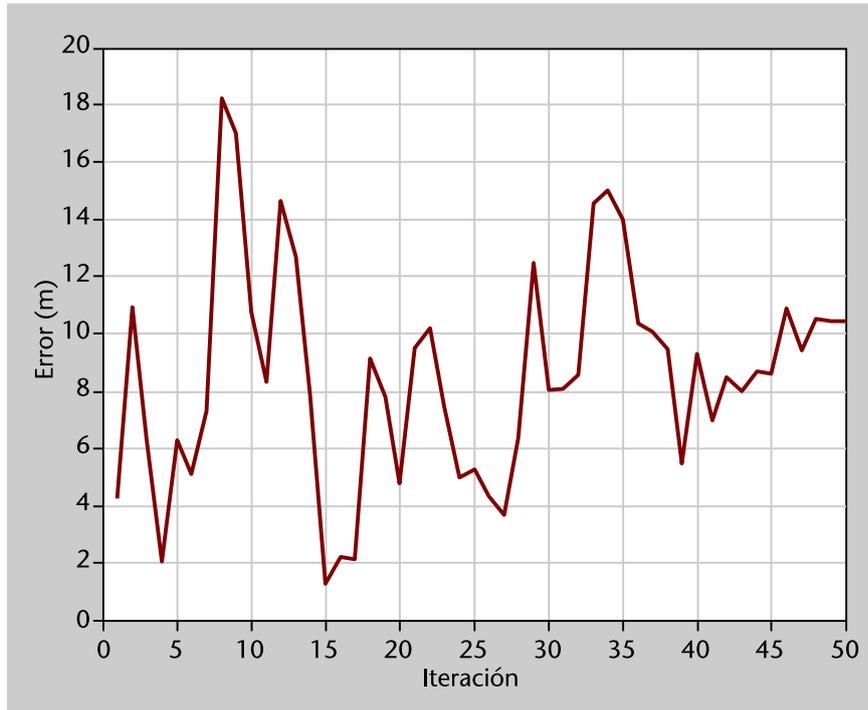


Figura 24. Evolución temporal del error de posicionamiento (únicamente sistema GPS)



2) En la segunda parte del problema se pretende observar cuál es la ganancia obtenida al introducir las medidas de aceleración del sistema inercial:

a) En este caso, el filtro de Kalman sigue suponiendo que el usuario presenta un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. Por tanto, la ecuación de estado presenta el mismo aspecto que el presentado en el apartado 1a.

b) En este caso, la ecuación que realmente modela el movimiento del usuario es la misma que la presentada en el apartado 2b al no variar el comportamiento del usuario en este caso. En cuanto a la ecuación de estado, se debe reescribir su expresión al tenerse que introducir las medidas de los sensores de aceleración del sistema inercial. Es decir, la ecuación:

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (60)$$

vendrá dada por los siguientes vectores y matriz:

$$\mathbf{z}_k = \begin{pmatrix} x_{GPS,k} \\ y_{GPS,k} \\ a_{INSx,k} \\ a_{INSy,k} \end{pmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{v}_k = \begin{pmatrix} n_{GPSx,k} \\ n_{GPSy,k} \\ n_{INSx,k} \\ n_{INSy,k} \end{pmatrix} \quad (61)$$

donde $a_{INSx,k}$ y $a_{INSy,k}$ son las medidas de aceleración proporcionadas por el sistema inercial. Dichas medidas presentan un ruido de medida modelado por las variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas $n_{INSx,k}$ y $n_{INSy,k}$, las cuales siguen una distribución gaussiana de media cero y varianza σ_{INS}^2 .

c) En este caso, la iteración completa del proceso de filtrado del filtro de Kalman sería idéntica a la iteración mostrada en el apartado 1c. No obstante, se debe tener en cuenta que la matriz \mathbf{Q} vendrá dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} \sigma_{GPS}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{GPS}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{INS}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{INS}^2 \end{pmatrix} \quad (62)$$

Por tanto, se pone claramente de manifiesto la gran utilidad del filtro de Kalman en cuanto a sistema que simplifica enormemente el proceso de combinación de medidas de diferentes sensores.

d) En el apéndice de este módulo se puede encontrar también el código del software asociado a la implementación del sistema considerado en este apartado. Por otro lado, en la figura 25 se presentan los resultados obtenidos con el sistema que integra las medidas GPS con las medidas INS. Tal como se observa, el comportamiento de la trayectoria estimada por el filtro de Kalman mejora considerablemente cuando se introducen las medidas de aceleración del sistema INS. Esta mejora del comportamiento se refleja también en la figura 26, donde se observa que el error que se obtiene en el momento en que el filtro empieza a converger es menor que el obtenido en el caso de utilizar las medidas del sistema GPS únicamente.

Figura 25. Comparación de trayectoria real del usuario, trayectoria estimada por el filtro de Kalman y medidas del sistema GPS (sistema GPS - INS)

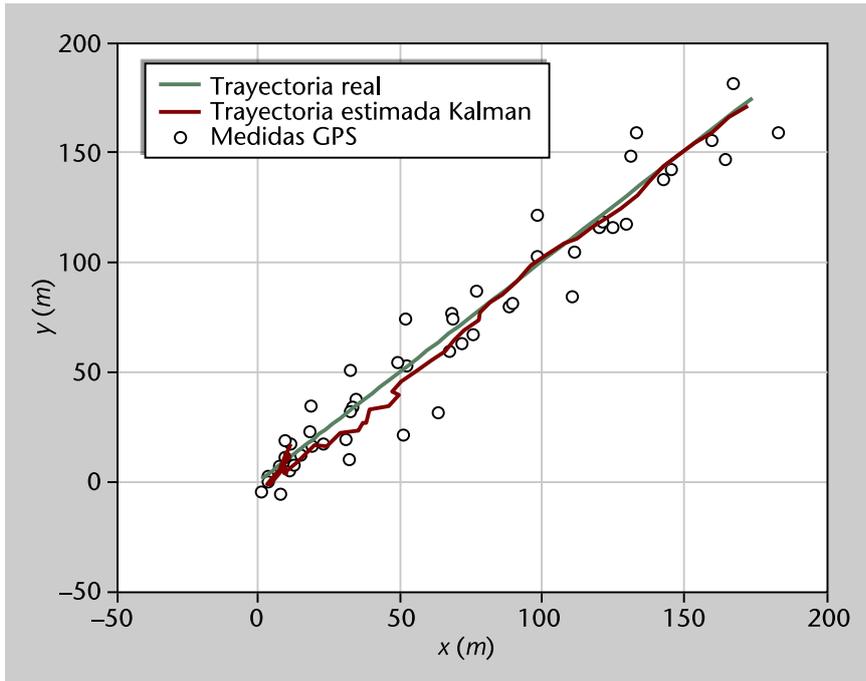
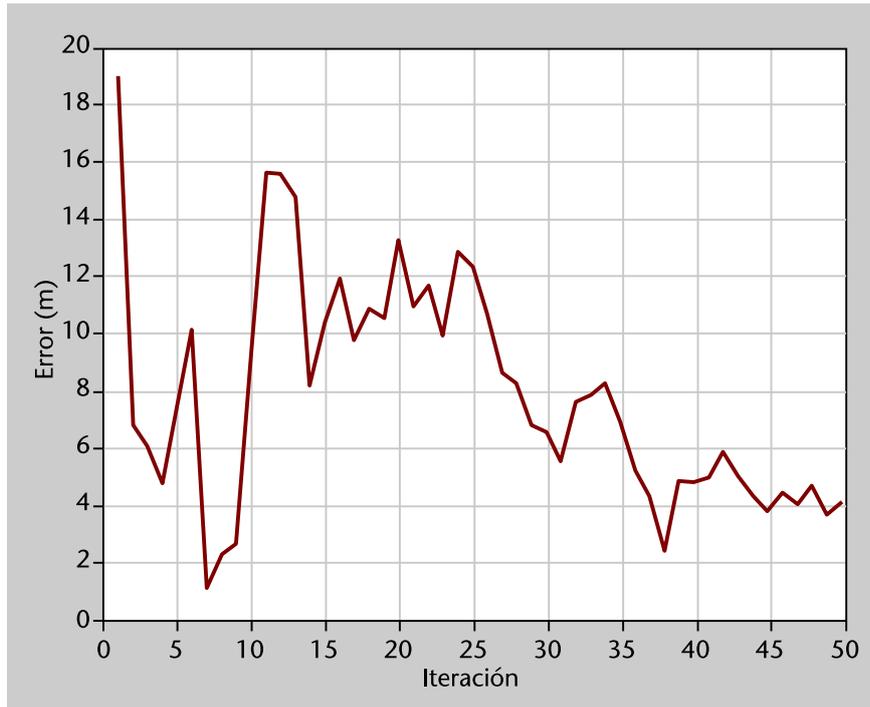


Figura 26. Evolución temporal del error de posicionamiento (sistema GPS - INS)



Resumen

En este módulo se ha presentado la evolución de navegación por satélite basada en la aparición de sistemas complementarios y alternativos a GPS. Estos sistemas nacen con el objetivo de ofrecer mejores prestaciones que las ofrecidas por un receptor GPS convencional con el fin de poder satisfacer los altos requisitos demandados por aplicaciones *safety-of-life*, donde la seguridad es un aspecto crítico y se requieren altos niveles de precisión, integridad y una disponibilidad continua del sistema.

En primer lugar, se han presentado los sistemas de aumentación que tienen como objetivo ofrecer a los usuarios de GPS información adicional sobre las medidas de las señales de los satélites. Esta información adicional se utiliza para mejorar el cálculo de posición del receptor y puede ser desde datos sobre las fuentes de error de la señal (como el retardo ionosférico, derivas en los relojes o errores en las efemérides) hasta el estado de la propia señal.

El primer caso descrito es el basado en GPS diferencial (DGPS). Este sistema se basa en el uso de una o más estaciones de referencia terrestres, las cuales se encuentran en posiciones conocidas, equipadas con un receptor de GPS y con la capacidad de transmitir al usuario información sobre las señales de los diferentes satélites de la constelación GPS (integridad de las mismas, medidas de corrección de las pseudodistancias, del reloj del satélite y de las efemérides) aparte de las propias medidas obtenidas por la estación de referencia e información adicional sobre la propia base (localización, estado, factores meteorológicos, etc.). Esta información la utiliza el receptor del usuario para mejorar su estimación de posición. Básicamente, el principio de funcionamiento se basa en el hecho de que la estación de referencia se encuentra en una posición conocida y, por tanto, es capaz de obtener, con alta exactitud, el sesgo de las medidas obtenidas de los satélites visibles. Lógicamente, la mejora ofrecida por DGPS aumenta a medida que el usuario se encuentra más próximo a la estación de referencia, pudiéndose obtener mejoras del orden de un factor 2.

En cuanto al proceso que lleva a cabo la técnica DGPS, existen dos conceptos según la zona geográfica que cubre el sistema. Por un lado, el DGPS de área local está diseñado para cubrir áreas entre 10-100 km con una única estación de referencia. Para cubrir regiones mayores se utilizan varias estaciones de referencia y el sistema se denomina DGPS de área extensa.

El GPS diferencial es capaz de mejorar las prestaciones de un receptor GPS de forma sustancial, pero una de las principales limitaciones que presenta es su carácter regional. En algunas aplicaciones, especialmente las relacionadas con la aviación civil, es necesario proveer de un sistema de aumentación global. Con esa motivación fueron diseñados los sistemas SBAS basados en el uso

de satélites para transmitir la información de aumentación. En este módulo se han presentado los dos sistemas SBAS más importantes: WAAS y EGNOS. WAAS es la solución estadounidense de aumentación por satélite y presenta una arquitectura formada por tres segmentos: espacial, terrestre y de usuario. No obstante, el objetivo de este sistema es enviar información a los usuarios para mejorar las prestaciones de GPS, siendo este último el sistema de navegación primario. Aparte de la información de corrección y de integridad, enviada también por los sistemas DGPS terrestres, WAAS envía una señal de navegación adicional para ofrecer al usuario una medida de pseudodistancia extra. El sistema EGNOS, por otra parte, es el sistema de aumentación por satélite europeo y, en este caso, su arquitectura está formada por cuatro segmentos: segmento espacial, segmento terrestre, segmento de apoyo y segmento de usuario. El objetivo de este sistema de aumentación es el ofrecer servicio de aumentación de GPS, GLONASS y Galileo en territorio europeo, parte del mediterráneo y África. No obstante, los mejores prestaciones se concentran en Europa, pudiéndose alcanzar precisiones próximas a un metro.

Después de presentar los sistemas de aumentación, se ha pasado a describir el sistema Galileo. Galileo es el sistema de radionavegación por satélite europeo, el cual nació con el objetivo de proveer una solución de radionavegación propia. Aparte, este fue diseñado con el objetivo de cumplir los altos requisitos demandados por las aplicaciones *safety-of-life* entrando, junto al bloque III de GPS, en lo que se conoce como segunda generación de sistemas de radionavegación por satélite.

El sistema aún está en fase de desarrollo y, a diferencia de GPS, Galileo está diseñado para ofrecer principalmente servicios de uso civil. Concretamente los servicios ofrecidos son los que se conocen como *Open Service* (servicio abierto orientado al usuario general), *commercial service* (orientado a las aplicaciones profesionales), *safety of life service* (servicio orientado a aplicaciones donde la seguridad de los usuarios es crítica), *public regulated service* (servicios de altas prestaciones únicamente ofrecidos a usuarios autorizados) y *search and rescue service* (servicio orientado a la detección de balizas de mensajes de socorro). Todos estos servicios se transmiten utilizando un total de 10 señales de navegación distribuidos en 5 bandas (E5a, E5b, E6, L6 y E1).

En cuanto a la arquitectura de Galileo, esta se divide en tres segmentos: espacial, terrestre y de usuario. El segmento espacial está formado por una constelación de 30 satélites en tres planos orbitales, habiendo únicamente 9 satélites operativos en cada órbita, ya que el restante se deja como satélite redundante. Actualmente, hay únicamente dos satélites de experimentación en órbita (GIOVE-A y GIOVE-B), los cuales envían señales de pruebas que presentan unas características representativas de las señales Galileo. Se prevé, no obstante, que a lo largo del año 2011 se empiecen a lanzar los satélites IOV, los cuales presentan unas características muy próximas a los diseños finales de los satélites Galileo para, una vez desplegada la fase de experimentación IOV, dar paso al lanzamiento de los primeros satélites FUC destinados a cubrir la

constelación necesaria para declarar el sistema Galileo operativo. El segmento terrestre de Galileo tiene como función el control de la constelación de satélites y el control de la misión. Está formado a su vez por dos segmentos, el GCS y el GMS. El segmento GCS lleva a cabo todas las tareas de control de la constelación de satélites Galileo y para ello utiliza 5 estaciones terrestres TTC, las cuales se encargan de enviar las órdenes de control a los diferentes satélites. El segmento GMS controla el sistema de navegación y provee los principales servicios Galileo. Para ello utiliza una configuración basada en una red de entre 30 y 40 estaciones GSS (llevando a cabo la monitorización de las señales de navegación), un centro de control GCC (encargado de procesar la información de las GCC y generar los mensajes de navegación) y 9 estaciones ULS (llevando a cabo la tarea de enviar a los satélites los mensajes generados por la GCC). En cuanto al segmento de usuario de Galileo, está principalmente orientado a los servicios del sistema. No obstante, se encuentra aún en fase de definición existiendo únicamente los primeros receptores de prueba, los cuales forman lo que se conoce como *test user segment*.

Galileo transmite señales en tres bandas frecuenciales: E1, E5 y E6. En todas las bandas se multiplexan diferentes señales para cubrir los diferentes servicios del sistema y se incluyen componentes de datos y componentes piloto. El objetivo de transmitir estas últimas es permitir utilizar en el receptor tiempos de integración más largos para aumentar la sensibilidad y extender el uso de Galileo a entornos donde la recepción está más degradada.

La señal E1 transmite una componente de datos y una componente piloto en el canal en fase y una señal PRS en el canal en cuadratura. Las dos primeras componentes, de uso abierto, utilizan la modulación CBOC, que combina una señal BOC(1,1) con una señal BOC(6,1) con una potencia 10 veces menor. La potencia de la señal BOC(1,1) se concentra en las frecuencias próximas a la portadora, mientras que la señal BOC(6,1) hace aumentar la densidad espectral de potencia en una zona alejada aproximadamente ± 6 MHz de la portadora. De esta manera, la señal CBOC aporta ventajas tanto a receptores de gama baja como de gama alta. Los primeros tienen un ancho de banda reducido por lo que reciben básicamente una señal BOC(1,1), cuyo procesado es relativamente sencillo y solo pierden la pequeña parte de energía asignada a la componente BOC(6,1). Esta componente es justamente la recibida por los receptores de mayor ancho de banda (normalmente, son los de gama alta), que de esta manera tienen acceso a una señal con componentes espectrales alejadas de la portadora, lo que les permite tener una mayor precisión en la medida del pseudorango. Si la señal E1 constara únicamente de las tres componentes mencionadas al principio del párrafo, no tendría envolvente constante, que es una característica deseable para que los amplificadores de potencia a bordo del satélite puedan trabajar de forma eficiente sin distorsionar la señal. Se utiliza una forma ingeniosa de conseguir que la señal global tenga envolvente constante, denominada Coherent Adaptive Subcarrier Modulation (CASM) e Interplex Modulation. Se añade una cuarta componente en el canal en cuadratura,

que es función de las tres otras componentes. Dedicando menos del 8% de la potencia (lo que supone una pérdida de potencia inferior a 0,4 dB) a esta nueva componente se consigue que la señal total tenga envolvente constante.

Los datos de la señal E1, así como del resto de señales, utiliza una codificación de canal sencilla, pero que ya supone un avance con respecto al mensaje de navegación de GPS C/A, que no está codificado de ninguna manera. Concretamente, se utiliza un código convolucional con tasa 1/2. Otro aspecto distintivo de las señales Galileo es que utiliza códigos pseudoaleatorios mucho más largos que los 1.023 chips habituales del código C/A. Esto aporta ventajas en cuanto a la reducción de la interferencia intra e intersistema. No obstante, si el uso de códigos más largos implicara que más hipótesis se tienen que testear en la fase de adquisición, esta fase se haría más larga y más complicada. Es por esto por lo que estos códigos largos no se diseñan de forma que no tengan ninguna estructura sino que se construyen de forma jerárquica (se suelen denominar *tiered codes*), encadenando varios códigos más cortos, llamados primarios, cuyo signo se va alternando de acuerdo a un código secundario. Dependiendo de la señal, los códigos primarios pueden ser códigos de memoria (por ejemplo, simplemente una secuencia binaria determinada obtenida a partir de un procedimiento de optimización de las características de la señal) o bien pueden generarse mediante un registro de desplazamiento.

La señal E6 se parece a la señal E1 en el número y tipo de componentes que incluye así como en el mecanismo para tener envolvente constante. La principal diferencia radica en que no se utilizan pulsos BOC en las dos componentes del canal en fase sino que se utilizan simplemente pulsos rectangulares. No obstante, la frecuencia de chip de dichas componentes es 5×1.023 Mchips/s, que es un factor 5 superior a la de la señal GPS C/A, lo que la convierte en una señal con un ancho de banda bastante amplio y, por tanto, con la capacidad de proporcionar medidas de pseudorango con gran precisión. No obstante, muchos otros aspectos de la señal E6 permanecen indefinidos puesto que estaba dedicada al Servicio Comercial de Galileo, que actualmente no es prioritario.

La banda E5 comprende realmente dos subbandas contiguas de frecuencia, denominadas E5a y E5b. Aprovechando este hecho, se ha diseñado una señal muy interesante porque se puede interpretar (y, claro está, también recibir) como si fuera una única señal que ocupa toda la banda E5, o bien como dos señales diferentes: una en la subbanda E5a y otra en la subbanda E5b. Procesar la señal E5 completa solo está al alcance de los receptores con gran ancho de banda (o sea, receptores más caros y de más altas prestaciones), pero el hecho de tener una señal de más de 50 MHz de ancho de banda permitirá obtener medidas de retardo de muy alta precisión (recuérdese que la señal GPS C/A tiene un ancho de banda de unos pocos MHz). No obstante, para no impedir el acceso a esta banda a los usuarios con receptores más modestos, la señal es tal que si un usuario se queda únicamente con una de las dos subbandas y elimina la señal en la otra subbanda (filtrando, por ejemplo), la señal resultante es aproximadamente una señal BPSK(10) con datos en el canal en fase y una señal

BPSK(10) piloto en el canal en cuadratura. Podemos observar que de cualquier modo, aun quedándose únicamente con una subbanda, se obtiene una señal con una tasa de chip 10 veces superior a la señal GPS C/A; es decir, con la misma tasa de bit que la señal militar GPS P. Además de las 4 componentes útiles que forman la señal E5 (por ejemplo, la componente de datos y el piloto en cada una de las dos subbandas), se añaden unos términos a los que se dedica el 15% aproximadamente de la potencia y que, gracias a ellos, se consigue que la señal tenga envolvente constante.

La estructura de un receptor Galileo no difiere de la estructura de un receptor GPS. Las diferencias son más cuantitativas que cualitativas, ya que al poder procesar muchas componentes en cada banda, el receptor puede necesitar más canales y hay más combinaciones sobre qué componentes elegir. No obstante, la forma de extraer las medidas de retardo, fase y, si corresponde, los datos de la señal es esencialmente la misma en cualquier señal DS-SS. Por lo tanto, el procesado de las señales Galileo sigue las mismas fase de adquisición y seguimiento; y el seguimiento se realiza con los lazos de código y de fase, tal y como se explicó para GPS. Sin embargo, sí que existe un efecto a tener en cuenta cuando se procesan señales BOC, que no ocurría con las señales BPSK. Esto afecta a Galileo en la medida en que algunas de sus componentes utilizan el formato BOC y a cualquier otro sistema (como el GPS modernizado) que pueda utilizar también modulaciones BOC. El efecto se debe a que la correlación de las señales BOC presenta máximos locales, y cada máximo local es susceptible de convertirse en un punto de enganche estable del DLL. Si el DLL se queda enganchado en uno de estos puntos, proporciona medidas de retardo con un sesgo muy importante. En los últimos años se han dedicado muchos esfuerzos a investigar técnicas para mitigar este efecto. Se ha presentado una clasificación de las diferentes técnicas. A pesar de que existe una gran variedad, básicamente para identificar si se está siguiendo el máximo correcto (o sea, central) de la correlación, se utilizan alguna de las dos ideas básicas siguientes: una es el hecho de que la envolvente de la correlación de las señales BOC es un triángulo y que por lo tanto proporciona una medida no ambigua aunque de menos precisión, y la otra se basa en que la amplitud de los máximos adyacentes al que se están siguiendo proporciona información sobre si se está en el máximo absoluto o en uno local.

Finalmente, se han presentado dos estrategias para mejorar el comportamiento de los receptores GNSS. Por un lado, se ha descrito la técnica basada en incluir capacidad multi-frecuencial/multi-constelación en el propio receptor. Es decir, el permitir trabajar con señales procedentes de diferentes bandas frecuenciales y de diferentes constelaciones de satélites (GPS, Galileo y GLO-NASS). Tal como se ha comentado, se pueden mejorar notablemente las características del sistema, ya que, por un lado, se pueden cancelar efectos adversos mediante la utilización de señales de diferentes bandas (como el caso del efecto ionosférico) y, por otro lado, se puede aumentar el número de satélites visibles al incorporar satélites de diferentes constelaciones. No obstante, la complejidad del sistema se incrementa de forma considerable salvo en casos

excepcionales como lo son los casos basados en utilizar señales de los sistemas Galileo y GPS, que comparten banda frecuencial y presentan características similares (como las señales en las bandas L1/E1 y L5/E5a).

Después de esto, se ha presentado otro método de mejora de las prestaciones de los receptores GNSS que se basa en la hibridación de las medidas de los mismos con medidas de sistemas inerciales INS, lo cual se conoce como hibridación GNSS-INS. Los sistemas INS ofrecen unas precisiones muy buenas a corto plazo, pero, a medida que avanza el tiempo, el error del sistema va creciendo. Por otro lado, los sistemas de posicionamiento por satélite presentan un error acotado y con una evolución prácticamente constante en el tiempo. Por tanto, las medidas de ambos sistemas presentan un buen nivel de complementariedad para explotar la combinación de los mismos. La forma comúnmente empleada para combinar ambos sistemas es mediante la utilización de un filtro de Kalman y por ese motivo se ha presentado el principio de funcionamiento del mismo. Hecho esto, se han presentado los esquemas de hibridación más utilizados que son el esquema desacoplado, el esquema *loosely coupled* y el esquema *tightly coupled*, siendo el último de ellos el más utilizado al presentar los mejores resultados.

Ejercicios de autoevaluación

1. El sistema de aumentación GPS diferencial...

- a) se basa en el uso de una constelación de satélites propia.
- b) ofrece mejores resultados a medida que el usuario se encuentra más alejado de las estaciones de referencia del sistema.
- c) se ciñe en enviar al usuario GPS las medidas de pseudodistancia obtenidas en las estaciones de referencia para que este mejore su estimación de posición.
- d) puede enviar la información de corrección mediante Internet.

2. Indicad cuál de las siguientes aseveraciones es falsa:

- a) Los errores en la estimación de las pseudodistancia debidos a efectos troposféricos dependen del ángulo de la línea de visión directa existente entre el receptor GPS y el satélite.
- b) La diferencia existente entre el error de pseudodistancia debido a efectos troposféricos obtenido en el receptor GPS de un usuario y el obtenido en el receptor de una estación de referencia DGPS aumenta a medida que la diferencia de altitud de ambos receptores disminuye.
- c) La diferencia existente entre el error de pseudodistancia debido a efectos ionosféricos obtenido en el receptor GPS de un usuario y el obtenido en el receptor de una estación de referencia DGPS aumenta a medida que la ionosfera se encuentra más cargada.
- d) Los errores en la estimación de las pseudodistancia debidos a efectos ionosféricos dependen del ángulo de la línea de visión directa existente entre el receptor GPS y el satélite.

3. Indicad qué afirmación es correcta:

- a) El sistema DGPS de área extendida puede ofrecer cobertura de área global.
- b) El sistema DGPS de área local se basa en el despliegue de una red de estaciones de referencia para cubrir una zona determinada.
- c) El sistema DGPS de área extendida está diseñado para cubrir áreas entre 10 y 100 Km.
- d) El sistema DGPS de área local se basa en el uso de una única estación de referencia para cubrir una zona determinada.

4. El sistema WAAS...

- a) envía, entre otras cosas, información al usuario sobre el estado de los satélites GPS y de la integridad de los satélites geoestacionarios del sistema WAAS.
- b) puede alcanzar precisiones entre los 0,5 y 2 m en territorio europeo.
- c) ofrece una señal de navegación adicional de forma que un usuario puede posicionarse sin la necesidad de recibir señales de los satélites GPS.
- d) ofrece una señal de navegación adicional que utiliza una modulación similar a la de GPS con una velocidad de transmisión de datos igual a 50 bps.

5. Indicad qué afirmación es correcta:

- a) El sistema EGNOS es la solución europea a la navegación por satélite.
- b) El sistema EGNOS envía únicamente información de corrección mediante Internet a través de SISNET.
- c) El sistema EGNOS ofrece una señal de navegación adicional que utiliza una modulación similar a la de GPS.
- d) El sistema EGNOS ofrece servicio de aumentación en Europa y África, ofreciendo un nivel de precisión homogéneo en todo el territorio.

6. Indicad cuál de las siguientes aseveraciones es falsa:

- a) El sistema EGNOS está formado por una arquitectura de tres segmentos: espacial, terrestre y de usuario.
- b) El sistema EGNOS empezó a funcionar de forma operacional en el año 2005.
- c) El sistema EGNOS es la solución SBAS europea fruto de la actividad conjunta de la Comisión Europea, la Agencia Espacial Europea y Eurocontrol.
- d) El sistema EGNOS tiene como objetivo principal ofrecer un servicio de aumentación a GPS, GLONASS y Galileo.

7. Los servicios del sistema Galileo...

- a) están principalmente enfocados al usuario civil, utilizando un conjunto de señales carentes de mecanismos de cifrado.

- b) de carácter civil se transmiten en la misma banda frecuencial, dejando el resto de bandas para la transmisión de servicios regulados por entidades gubernamentales.
- c) conocidos con el nombre de PRS se transmiten mediante señales en las bandas E1 y E6 utilizando un espectro más ensanchado para mejorar el nivel de protección.
- d) PRS y SOL utilizan cifrado para asegurar la autenticación de las señales utilizadas.

8. Indicad cuál de las siguientes aseveraciones es falsa:

- a) La constelación de satélites Galileo está basada en la utilización de tres planos orbitales, estando cada uno de estos planos formado por 10 satélites operativos.
- b) La constelación Galileo está diseñada para poder tener un mínimo de 4 satélites visibles en cualquier posición del mundo en cualquier instante de tiempo con una probabilidad mayor al 90%.
- c) El reloj de hidrógeno embarcado en el satélite GIOVE-B es el reloj más estable de los puestos en órbita de forma permanente.
- d) Los satélites Galileo están diseñados para venir también equipados con un transpondedor SAR.

9. El segmento terrestre de Galileo...

- a) está a su vez dividido por dos segmentos, siendo el segmento GCS el encargado de controlar el sistema de navegación y de proveer los principales servicios Galileo.
- b) está a su vez dividido por dos segmentos, siendo el segmento GMS el encargado de llevar a cabo todas las tareas de control de la constelación de satélites Galileo.
- c) está formado por 5 estaciones TTC, entre 30 y 40 estaciones GSS, un centro de control GCC (más uno redundante) y 9 estaciones ULS.
- d) está a su vez dividido por dos segmentos, siendo el segmento GCC el encargado de controlar el sistema de navegación y de proveer los principales servicios Galileo.

10. El hecho de introducir los productos de intermodulación en la señal AltBOC para que tenga envolvente constante causa una pérdida de potencia en las componentes útiles. El valor de esta pérdida es...

- a) 15 dB.
- b) 85 dB.
- c) 0,7 dB.
- d) 8,2 dB.

11. Imaginemos que tenemos un receptor que va a procesar únicamente la parte BOC(1,1) del piloto de la señal Galileo E1. ¿Qué porcentaje de la potencia total de la señal Galileo E1 es útil para este receptor?

- a) 23,07%.
- b) 20,97%.
- c) 46,14%.
- d) 2,09%.

12. Continuamos con la suposición de que el receptor está interesado únicamente en la parte BOC(1,1) del piloto de la señal Galileo E1. En el año 2004, el formato de señal propuesto para Galileo era simplemente BOC (no CBOC), lo que equivale a suponer que $\alpha = 1$ y $\beta = 0$ en el modelo de señal CBOC. En este caso, ocurren dos efectos contrapuestos. Por un lado, toda la potencia del piloto corresponde a la modulación BOC(1,1), sin dedicar 1/11 para la BOC(6,1). Pero por otro lado, se ve intuitivamente que se necesita más potencia en la componente de intermodulación porque la componente en fase de la señal se anula cuando $e_{E1-B}(t)$ y $e_{E1-C}(t)$ tienen el mismo signo (lo que no ocurre cuando se utilizan realmente señales CBOC). Teniendo en cuenta ambos efectos (por ejemplo, la desaparición de los términos BOC(6,1) y el aumento de la componente de intermodulación), ¿qué porcentaje de la potencia total es ahora útil para el receptor?

- a) 22,2%.
- b) 15%.
- c) 23,07%.
- d) 20,97%.

13. ¿Por qué se utilizan los *tiered codes* en lugar de códigos con la misma longitud total pero completamente aleatorios?

- a) Porque no se pueden generar códigos de memoria tan largos.
- b) Porque así se pueden generar mediante registros de desplazamiento.

- c) Porque de esta manera los códigos primarios se pueden utilizar en varios satélites.
- d) Porque es una forma práctica de conseguir códigos largos sin complicar en exceso el proceso de adquisición.

14. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es cierta? Al aumentar la frecuencia de la subportadora de las señales BOC...

- a) se alarga el código.
- b) se reduce la interferencia intrasistema.
- c) aumenta el número de oscilaciones de la curva de correlación.
- d) se reduce la precisión de las medidas de retardo.

15. ¿Cuál de los siguientes tipos de señales tiene un ancho de banda mayor?

- a) BOC(1,1)
- b) BOC(5,1)
- c) CBOC(5,1,1/11,+)
- d) BPSK(5)

16. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es falsa?

- a) La señal en la banda inferior de una señal AltBOC(15,10) es aproximadamente una señal BOC(15,10).
- b) La señal en la banda inferior de una señal AltBOC(15,10) es aproximadamente una señal BPSK(10) o QPSK(10).
- c) Una señal AltBOC(15,10) permite multiplexar 4 componentes útiles.
- d) Una señal AltBOC(20,1) tiene menor ancho de banda que una señal AltBOC(15,10).

17. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones sobre la ambigüedad asociada de la correlación de las señales BOC es cierta?

- a) Se alivia trabajando con códigos más cortos.
- b) Se agrava al reducir el orden de la modulación BOC.
- c) No es preocupante si se trabaja con un DLL no coherente.
- d) Se puede combatir procesando cada una de las subbandas de la señal BOC por separado y combinándolas de forma no coherente.

18. Indicad cuál de las siguientes aseveraciones es falsa:

- a) Habilitar la capacidad frecuencial en un receptor permite reducir errores debidos a efectos ionosféricos.
- b) Actualmente, la mejora ofrecida por un receptor GPS/GLONASS frente a un receptor GPS convencional es bastante modesta.
- c) La posición de un usuario con un receptor multi-constelación se puede calcular combinando directamente las medidas de pseudodistancia de señales GPS y Galileo de la banda L1/E1.
- d) El sistema Galileo transmite información sobre el desfase entre el sistema de tiempos GST y el sistema GPST.

19. Indicad qué afirmación es correcta:

- a) La hibridación GNSS-INS basada en el esquema *loosely coupled* utiliza dos filtros de Kalman, estando uno de ellos integrado en el receptor GNSS.
- b) Los sistemas INS presentan un error acotado y con una evolución prácticamente constante en el tiempo.
- c) Los receptores GNSS ofrecen unas precisiones muy buenas a corto plazo, pero, a medida que avanza el tiempo, el error del sistema va creciendo debido al error acumulativo introducido por el efecto Doppler.
- d) La hibridación GNSS-INS se suele llevar a cabo mediante el esquema *loosely coupled* debido a la baja complejidad que presenta la implementación de dicho esquema.

Solucionario

Ejercicios de autoevaluación

1. d

2. b

3. d

4. a

5. c

6. a

7. c

8. a

9. c

10. c

11. b

12. a

13. d

14. c

15. b

16. a

17. d

18. d

19. a

Abreviaturas

- 3G** Tercera Generación o 3rd Generation
- ACK** ACKnowledgment
- AltBOC** Alternative Binary Offset Carrier
- ASQF** Application Specific Qualification Facility
- AWGN** Additive White Gaussian Noise
- BOC** Binary Offset Carrier
- BPSK** Binary Phase Shift Keying
- CASM** Coherent Adaptive Subcarrier Modulation
- CBOC** Composite Binary Offset Carrier
- CS** Commercial Service
- DGPS** Differential GPS
- EGNOS** European Geostationary Navigation Overlay Service
- FUC** Full Operational Capability
- GCS** Ground Control Segment
- GMS** Ground Mission Segment
- GNSS** Global Navigation Satellite System
- GPST** GPS Time
- GSS** Galileo Sensor Station
- GST** Galileo System Time
- GUS** Ground Uplink Stations
- GPS** Global Positioning System
- GTRF** Galileo Terrestrial Reference Frame
- IMU** Inertial Measurement Unit
- INS** Inertial Navigation System
- IOV** In-Orbit Validation
- MCC** Mission Control Centers
- NLES** Navigation Land Earth Stations
- OS** Open Service
- OTAN** Organización del Tratado del Atlántico Norte
- PACF** Performance Assessment and System Checkout Facility
- PRS** Public Regulated Service
- PZ-90** Parametry Zemli 1990
- QPSK** Quadrature Phase Shift Keying
- RIMS** Ranging and Integrity Monitoring Stations

S/A Selective Availability

SAR Search And Rescue

SBAS Satellite-Based Augmentation Systems

SIR Signal-to-Interference power Ratio

SISNET Signal In Space through the InterNET

SNR Signal to Noise Ratio

SOL Safety of Life

TEC Total Electron Content

TTC Telemetry, Tracking and Control

ULS Up-Link Stations

UTC (SU) Universal Time Coordinated (Soviet Union)

WAAS Wide Area Augmentation System

WGS84 World Geodetic System 1984

WMS Wide-area Master Stations

WRS Wide-area Reference Stations

Bibliografía

Butman, S.; Timor, U. (abril, 1971). "Interplex Modulation". *JPL Quaterly Technical Review*.

Butman, S.; Timor, U. (junio, 1972). "Interplex - An Efficient Multichannel PSK/PM Telemetry System". *IEEE Transactions on Communications*.

Dafesh, P. A.; Lazar, S.; Nguyen, T. (enero, 1999). *Coherent Adaptive Sub-carrier Modulation (CASM) for GPS Modernization*. Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation, ION-NTM 1999. San Diego, California, EE.UU.

Dafesh, P. A. (marzo, 1999). *Quadrature Product Sub-carrier Modulation (QPSM)*. IEEE Aerospace Conference Record.

Dafesh, P. A. (agosto, 2002). *Coherent Adaptive Sub-carrier Modulation Method*. Patent US 6,430,213, Granted 6.

European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document (OS SIS ICD) (núm. 1, febr., 2010). European Union.

Grewal, M. S.; Weill, L. R.; Andrews, A. P. (2001). *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*. John Wiley & Sons.

Kaplan, E. D.; Hegarty, C. J. (2006). *Understanding GPS Principles and Applications*. Artech House.

Misra, P.; Enge, P. (2006). *Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance*. Ganga-Jamuna Press.

Prasad, R.; Ruggieri, M. (2005). *Applied Satellite Navigation: Using GPS, Galileo and Augmentation Systems*. Artech House.

Anexo

En este anexo se presenta el código de software generado en Matlab para emular el comportamiento del sistema considerado en el ejemplo presentado en la sección 4.3.

1) Caso GPS (apartado 1d)

```
x0=0;
vx=1;
ax=0.1;
y0=0;
vy=1;
ay=0.1;

sigma_w=0;
sigma_GPS=10;
Ts=1;
Nmuestras=50;

A=[1, Ts, Ts^2/2, 0, 0, 0;...
   0, 1, Ts, 0, 0, 0;...
   0, 0, 1, 0, 0, 0;...
   0, 0, 0, 1, Ts, Ts^2/2;...
   0, 0, 0, 0, 1, Ts;...
   0, 0, 0, 0, 0, 1];

H=[1, 0, 0, 0, 0, 0;...
   0, 0, 0, 1, 0, 0];

M=6;
L=2;

x_k_menos_1=[x0, vx, ax, y0, vy, ay].';

Q=sigma_w^2*eye(M);
R=sigma_GPS^2*eye(L);

x_est_post_k_menos_1=zeros(M,1);
P_k_menos_1=1e5*eye(M);

for k=1:Nmuestras
```

```

%%%% ACTUALIZACIÓN VECTOR ESTADO REAL
w_k= sigma_w*randn(M,1);
x_k= A*x_k_menos_1 + w_k;

%%%% MEDIDAS GPS
v_k= sigma_GPS*randn(2,1);
z_k= H*x_k + v_k;

%%%% PREDICCIÓN KALMAN
x_est_prior_k= A*x_est_post_k_menos_1;
P_prior_k= A*P_k_menos_1*A.' + Q;

%%%% CORRECCIÓN KALMAN
K_k= P_prior_k*H.'*inv(H*P_prior_k*H.' + R);
x_est_post_k= x_est_prior_k + K_k*(z_k - H*x_est_prior_k);
P_k= (eye(M)-K_k*H)*P_prior_k;

%%%% ACTUALIZACIÓN PARA PRÓXIMA ITERACIÓN
x_est_post_k_menos_1= x_est_post_k;
P_k_menos_1= P_k;
x_k_menos_1= x_k;

%%%% DATOS GRÁFICAS
pos_x_real(k)= x_k(1);
pos_y_real(k)= x_k(4);

pos_x_est(k)= x_est_post_k(1);
pos_y_est(k)= x_est_post_k(4);

pos_x_med(k)= z_k(1);
pos_y_med(k)= z_k(2);

error_pos(k)=norm([pos_x_real(k),pos_y_real(k)]-
[pos_x_est(k),pos_y_est(k)]);

end

figure(1);
plot(pos_x_real,pos_y_real,'b-', 'LineWidth',2);
hold on;
grid on;
plot(pos_x_est,pos_y_est,'r-', 'LineWidth',2);
hold on;
plot(pos_x_med,pos_y_med,'ko', 'Markersize',9);
legend('Trayectoria Real','Trayectoria Estimada Kalman','Medidas GPS');
xlabel('x (m)');
ylabel('y (m)');

```

```

figure(2);
plot(error_pos);
grid on;
xlabel('Iteracion');
ylabel('Error (m)');

```

2) Caso GPS-INS (apartado 2d)

```

x0=0;
vx=1;
ax=0.1;
y0=0;
vy=1;
ay=0.1;

sigma_w=0;
sigma_GPS=10;
sigma_INS=0.01;
Ts=1;
Nmuestras=50;

M=6;
L=4;

A=[1, Ts, Ts^2/2, 0, 0, 0;...
   0, 1, Ts, 0, 0, 0;...
   0, 0, 1, 0, 0, 0;...
   0, 0, 0, 1, Ts, Ts^2/2;...
   0, 0, 0, 0, 1, Ts;...
   0, 0, 0, 0, 0, 1];

H=[1, 0, 0, 0, 0, 0;...
   0, 0, 0, 1, 0, 0;...
   0, 0, 1, 0, 0, 0;...
   0, 0, 0, 0, 0, 1];

x_k_menos_1=[x0, vx, ax, y0, vy, ay].';

Q=sigma_w^2*eye(M);
R_parte1=sigma_GPS^2*eye(2);
R_parte2=sigma_INS^2*eye(2);
R=zeros(L, L);
R(1:2, 1:2)=R_parte1;

```

```
R(3:4,3:4)=R_parte2;

x_est_post_k_menos_1=zeros(M,1);
P_k_menos_1=1e5*eye(M);

for k=1:Nmuestras

    %%% ACTUALIZACIÓN VECTOR ESTADO REAL
    w_k= sigma_w*randn(M,1);
    x_k= A*x_k_menos_1 + w_k;

    %%% MEDIDAS GPS + INS
    v_k_parte1= sigma_GPS*randn(2,1);
    v_k_parte2= sigma_INS*randn(2,1);
    v_k=[v_k_parte1;v_k_parte2];

    z_k= H*x_k + v_k;

    %%% PREDICCIÓN KALMAN
    x_est_prior_k= A*x_est_post_k_menos_1;
    P_prior_k= A*P_k_menos_1*A.' + Q;

    %%% CORRECCIÓN KALMAN
    K_k= P_prior_k*H.'*inv(H*P_prior_k*H.' + R);
    x_est_post_k= x_est_prior_k + K_k*(z_k - H*x_est_prior_k);
    P_k= (eye(M)-K_k*H)*P_prior_k;

    %%% ACTUALIZACIÓN PARA PRÓXIMA ITERACIÓN
    x_est_post_k_menos_1= x_est_post_k;
    P_k_menos_1= P_k;
    x_k_menos_1= x_k;

    %%% DATOS GRÁFICAS
    pos_x_real(k)= x_k(1);
    pos_y_real(k)= x_k(4);

    pos_x_est(k)= x_est_post_k(1);
    pos_y_est(k)= x_est_post_k(4);

    pos_x_med(k)= z_k(1);
    pos_y_med(k)= z_k(2);
```

```
    error_pos(k)=norm([pos_x_real(k),pos_y_real(k)]-
    [pos_x_est(k),pos_y_est(k)]);

end

figure(1);
plot(pos_x_real,pos_y_real,'b-','LineWidth',2);
hold on;
grid on;
plot(pos_x_est,pos_y_est,'r-','LineWidth',2);
hold on;
plot(pos_x_med,pos_y_med,'ko','Markersize',9);
legend('Trayectoria Real','Trayectoria Estimada Kalman','Medidas GPS');
xlabel('x (m)');
ylabel('y (m)');

figure(2);
plot(error_pos);
grid on;
xlabel('Iteracion');
ylabel('Error (m)');
```