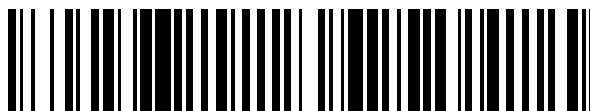


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 401 734**

51 Int. Cl.:

G01S 19/44 (2010.01)

G01S 19/07 (2010.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.09.2009 E 09815671 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.12.2012 EP 2335085**

54 Título: **Tratamiento de señales de radionavegación utilizando una combinación widelane**

30 Prioridad:

23.09.2008 FR 0856378

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

24.04.2013

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES
(100.0%)**

**2, Place Maurice Quentin
75039 Paris Cedex 01 , FR**

72 Inventor/es:

**MERCIER, FLAVIEN y
LAURICHESSE, DENIS**

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 401 734 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Tratamiento de señales de radionavegación utilizando una combinación *widelane*.

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere al campo de los sistemas de radionavegación o de posicionamiento por satélite, en particular a un procedimiento de tratamiento de las señales de radionavegación emitidas por satélites de un sistema de este tipo.

10

Estado de la técnica

Los sistemas de posicionamiento por satélite como GPS (Global Positioning System), Galileo, GLONASS, QZSS, Compass, IRNSS y otros utilizan señales de radionavegación moduladas denominadas "de espectro ensanchado". Estas señales transportan esencialmente unos códigos pseudoaleatorios formados por secuencias numéricas que se repiten periódicamente, cuya función principal es permitir un acceso múltiple por división de código (CDMA) y el suministro de una medición del tiempo de propagación de la señal emitida por el satélite. De manera accesoria, las señales de radionavegación pueden transportar asimismo una carga útil.

15

20

Las señales de radionavegación están formadas por modulación de las frecuencias centrales (portadoras). En el caso de GPS, las señales de radionavegación se transmiten en las bandas de frecuencias L1, centrada en 1575,42 MHz y L2, centrada en 1227,6 MHz. Durante la modernización de GPS, se añadirá la banda L5, centrada en 1176,45 MHz. Los satélites de la constelación Galileo transmitirán en las bandas E2-L1-E1 (siendo la parte de banda media L1 la misma que la del GPS), E5a (que, según la nomenclatura Galileo, representa la banda L5 prevista para el GPS), E5b (centrada en 1207,14 MHz) y E6 (centrada en 1278,75 MHz).

25

Las mediciones elementales que puede efectuar un receptor comprenden las mediciones de código y las mediciones de fase de portadora. Estas mediciones elementales se pueden combinar evidentemente entre sí. Las mediciones de código normalmente son de una precisión métrica mientras que las mediciones de fase son de una precisión de algunos mm. Ahora bien, las mediciones de fase adolecen de la desventaja de que sólo entregan la parte fraccionaria de la diferencia de fase de la portadora entre la emisión por el satélite y el receptor. Por tanto, las mediciones de fase son ambiguas en el sentido de que el número de ciclos enteros entre el satélite y el receptor se desconoce al principio. Con el fin de poder beneficiarse de la precisión de las mediciones de fase, un receptor debe resolver las ambigüedades por las que están afectadas.

30

35

La resolución de las ambigüedades de fase se efectúa normalmente por diferenciación de las mediciones de fase (diferenciación simple o doble) entre satélites y/o entre receptores. Esta técnica de diferenciación permite eliminar causas de error (no modelizadas) comunes a varias mediciones, y permite por tanto hacer aparecer una información entera, cuya consideración mejora adicionalmente los rendimientos. Sin embargo, esta información entera consiste en diferencias de una o varias ambigüedades de fase elementales y no permite, en general, remitirse a las ambigüedades de fase elementales.

40

D. Laurichesse *et al.*, "Real Time Zero-Différence Ambiguities Fijng and Absolute RTK", Proc. del National Meeting of the ION de 2008, describe un procedimiento de resolución de las ambigüedades de fase de portadora GPS con respecto a las mediciones no diferenciadas de código y de fase de las señales.

45

Objetivo de la invención

La presente invención tiene como objetivo proponer un procedimiento de tratamiento de señales de radionavegación, con ayuda del cual un receptor GNSS (de "Global Navigation Satellite System" - abreviatura utilizada en este caso para designar un sistema de navegación por satélite que proporciona una cobertura global de geoposicionamiento) puede aumentar la precisión de la solución de posicionamiento.

50

Descripción general de la invención

55

En la continuación de la descripción, se presupone un conjunto de satélites (por ejemplo, los satélites de una constelación de satélites de radionavegación que son "visibles" desde el lugar geográfico en el que se encuentra el receptor o una parte de éstos), cuyos satélites emiten cada uno por lo menos dos señales de radionavegación en bandas de frecuencia distintas. Por tanto, cada satélite emite por lo menos una primera señal de radionavegación a una primera frecuencia y una segunda señal de radionavegación a una segunda frecuencia distinta de la primera. El receptor que debe fijar su posición geográfica recibe las primera y segunda señales para cada satélite del conjunto considerado y efectúa, también para cada satélite del conjunto, unas mediciones no diferenciadas de código y de fase de estas señales. Se observa en este caso que el término "medición no diferenciada" se utiliza en este contexto para designar una medición elemental, que no está diferenciada ni entre satélites ni entre receptores. Es conocido perfectamente que las mediciones de fase presentan, cada una, una ambigüedad entera desconocida *a priori*. Resulta de esto que para cada satélite, la combinación "widelane" de las mediciones de fase de la primera y

60

65

segunda señales presenta también una ambigüedad entera desconocida *a priori*. Esta ambigüedad se puede expresar en ciclos de la frecuencia de diferencia de las primera y segunda frecuencias y se denominará en adelante primera ambigüedad widelane (para distinguirla de una o de varias eventuales otras ambigüedades widelane que sobrevienen cuando hay más de dos bandas de frecuencias en las que los satélites emiten señales de radionavegación). Se debe observar asimismo que para cada satélite del conjunto considerado se obtiene una primera ambigüedad widelane asociada a este satélite.

Según la invención, el procedimiento de tratamiento de las señales de radionavegación comprende además la etapa de determinar las primeras ambigüedades widelane de manera coherente en el conjunto de satélites. El receptor que debe fijar su posición utiliza, en esta etapa, desviaciones widelane, recibidas desde un sistema de referencia, asociadas a los satélites del conjunto de satélites. El procedimiento comprende asimismo la etapa de fijar a continuación la posición del receptor con ayuda de las mediciones de código y de fase de las primeras y segundas señales recibidas, así como del juego de primeras ambigüedades widelane determinadas de manera coherente. La acción de fijar la posición del receptor comprende, para cada satélite del conjunto, la determinación de una pseudodistancia por medio de una combinación iono-free, optimizada en cuanto a ruido, de las mediciones de código y de la diferencia de las mediciones de fase de las primera y segunda señales, compensada por la ambigüedad widelane. La determinación de la pseudodistancia se basa además en unos valores de reloj de satélite, recibidos desde un sistema de referencia, asociados a la combinación iono-free. La combinación iono-free está predeterminada en el sentido de que los coeficientes de los diferentes términos de la combinación se conocen en el lado del sistema de referencia, siendo necesario el conocimiento a nivel de sistema de referencia de los coeficientes para que el sistema de referencia pueda transmitir al receptor los valores de reloj de satélite asociados a la combinación óptima, al ritmo necesario. Los coeficientes de la combinación optimizada pueden estar convenidos de antemano entre el receptor y el sistema de referencia o fijarse de una vez por todas para el conjunto de los satélites. Los valores numéricos de estos coeficientes se eligen preferentemente en función de las características de ruido de las señales de radionavegación.

Se debe apreciar que el procedimiento según la invención permite librarse de resoluciones complejas en red para identificar una parte de las ambigüedades elementales. La consecuencia del conocimiento del juego de ambigüedades widelane enteras coherentes es que se dispone directamente a nivel del receptor de una nueva variable observable no ambigua (a saber, la diferencia entre las mediciones de fase, compensada por la ambigüedad widelane) en más de las dos mediciones de código en cada frecuencia. Un análisis de las combinaciones de estas tres variables observables muestra que es posible construir entonces una combinación que proporciona una pseudodistancia corregida de los efectos ionosféricos (por tanto "iono-free") con menos ruido que las combinaciones que utilizan únicamente las mediciones de código. Además, esta combinación es menos sensible a los trayectos múltiples debido a que se basa en mediciones de fase.

Se puede generalizar el procedimiento para sistemas con más frecuencias, por ejemplo en el caso de Galileo. Para un sistema de triple frecuencia, se podrán bloquear dos combinaciones widelane, y se dispondrá entonces de cinco variables observables independientes (es decir, dos combinaciones widelane y tres mediciones de código) que presentan unas características de ruido y de contribuciones ionosféricas bastante diferentes. En el caso de triple frecuencia, cada satélite del conjunto considerado emite una tercera señal de radionavegación en una tercera frecuencia distinta de las primera y segunda frecuencias. Opcionalmente, el procedimiento comprende, por tanto, a nivel del receptor y para cada satélite del conjunto, la recepción de la tercera señal así como la acción de efectuar mediciones no diferenciadas de código y de fase de la tercera señal recibida. Como la medición de fase de la tercera señal presenta también una ambigüedad entera desconocida *a priori*, la combinación widelane de las mediciones de fase de las primera y tercera señales presenta una segunda ambigüedad widelane entera desconocida *a priori*. (Se debe observar que la combinación widelane de las mediciones de fase de las segunda y tercera señales presenta también una ambigüedad widelane entera desconocida *a priori* pero que este caso no necesita ninguna exposición separada puesto que basta invertir las denominaciones de las primeras y segundas señales.) El receptor determina entonces un juego de segundas ambigüedades widelane coherentes en el conjunto de satélites de manera que la acción de fijar la posición del receptor se basa también en las mediciones de código y de fase de las terceras señales así como de las segundas ambigüedades widelane determinadas de manera coherente en el conjunto de satélites.

Tal como se ha indicado anteriormente, la determinación de las primeras y/o segundas ambigüedades widelane de manera coherente en el conjunto de satélites comprende la recepción de unas desviaciones widelane asociadas a los satélites por parte de un sistema de referencia (por ejemplo, una red de receptores de referencia geográficamente fijos).

Ventajosamente, el receptor calcula un valor estimado de la primera ambigüedad widelane, para cada satélite del conjunto de satélites, según la ecuación:

$$\hat{N}_w = \left(\frac{P_2 - 2\gamma\hat{e}}{\lambda_2} - L_2 \right) - \left(\frac{P_1 - 2\hat{e}}{\lambda_1} - L_1 \right)$$

en la que

\hat{N}_w designa este valor estimado de la primera ambigüedad widelane,
 P_1 y P_2 las mediciones de código de las primera y segunda señales, respectivamente,
 L_1 y L_2 las mediciones de fase de las primera y segunda señales, respectivamente,
 λ_1 y λ_2 las longitudes de onda de las primera y segunda señales, respectivamente,

$$\gamma = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2},$$

y $\hat{\epsilon}$ una estimada del retardo ionosférico para la primera señal (expresado por

$$\hat{\epsilon} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma - 1};$$

Para cada satélite, el receptor utiliza preferentemente una modelización de la primera ambigüedad widelane, dada por la expresión:

$$N_w = \hat{N}_w - d + \mu_{sat} - \mu_{rec}$$

en la que

N_w designa la primera ambigüedad widelane,
 d un término de corrección geométrica,
 μ_{sat} la desviación widelane asociada al satélite respectivo, transmitida al receptor por el sistema de referencia, y
 μ_{rec} la desviación widelane asociada al receptor, común a todas las primeras ambigüedades widelane.

El receptor identifica entonces un juego de valores enteros de las primeras ambigüedades widelane que son conformes a esta modelización para el conjunto de satélites. Esta identificación de los valores enteros se puede efectuar en particular con ayuda de simples diferencias entre satélites de las modelizaciones de las primeras ambigüedades widelane o por resolución simultánea de los valores enteros y del término μ_{rec} con una ley de evolución adaptada en el tiempo.

Preferentemente, la determinación eventual de las segundas ambigüedades widelane de manera coherente en el conjunto de satélites se efectúa de manera análoga a la determinación de las primeras ambigüedades widelane.

Preferentemente, las primera, segunda y, dado el caso tercera, frecuencias, se eligen de entre las frecuencias L1, L2, L5 y E6.

Ventajosamente, entre las mediciones no diferenciadas de código, por lo menos una presenta un ruido inferior a 0,5 m, preferentemente inferior a 0,25 m. En el caso en que cada una de las mediciones no diferenciadas de código presente un ruido superior a 0,5 m, la fijación de la posición se realiza preferentemente con ayuda de por lo menos tres frecuencias (con objeto de obtener por lo menos dos variables observables de fase widelane).

Un aspecto de la invención se refiere a un receptor GNSS que comprende unos medios para la puesta en práctica del procedimiento. Dichos medios comprenden ventajosamente un programa, almacenado en una memoria permanente o no permanente del receptor y configurado de tal manera que hace funcionar el receptor según el procedimiento descrito cuando se ejecuta en el receptor.

Breve descripción de los dibujos

Otras particularidades y características de la invención se desprenderán de la descripción detallada de un modo de realización ventajoso que se presenta a continuación, a modo de ilustración, con referencia al dibujo adjunto:

Figura 1: muestra un organigrama de un modo de realización preferido del procedimiento según la invención.

Descripción de una forma de realización preferida

Para cada satélite visible desde el receptor, es decir para cada satélite por encima del horizonte en el lugar geográfico del receptor, se obtiene a nivel de este último (en la etapa 10 de la figura 1) por lo menos dos mediciones de código (no ambiguas), indicadas por P_1 y P_2 , y por lo menos dos mediciones de fase (ambiguas), indicadas por L_1 y L_2 , para las frecuencias f_1 y f_2 , respectivamente.

Se utilizarán además las anotaciones siguientes:

$$\gamma = \frac{f_1^2}{f_2^2} = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2}, \quad \lambda_1 = \frac{c}{f_1}, \quad \lambda_2 = \frac{c}{f_2}$$

- 5 en las que c representa la velocidad de la luz. Para las bandas L_1 y L_2 del sistema GPS, se obtiene, por ejemplo: $f_1 = 154 f_0$ y $f_2 = 120 f_0$, en la que $f_0 = 10,23$ MHz. Se utilizará asimismo la convención según la cual las mediciones de código P_1, P_2 se expresan en unidades de longitud, mientras que las mediciones de fase L_1, L_2 se expresan en ciclos.
- 10 Las ecuaciones de modelización de las mediciones de código y de fase (sin saltos de fase, mediciones a la izquierda, modelos a la derecha) son las siguientes:

$$\begin{aligned} \lambda_1 L_1 &= (D_1 + \lambda_1 W) - e - \lambda_1 N_1 + (\Delta h + \Delta \tau_1) \\ \lambda_2 L_2 &= (D_2 + \lambda_2 W) - \gamma e - \lambda_2 N_2 + (\Delta h + \Delta \tau_{12} + \Delta \tau_2) \\ P_1 &= D_1 + e + (\Delta h) \\ P_2 &= D_2 + \gamma e + (\Delta h + \Delta \tau_{12}) \end{aligned} \quad (1)$$

15 en las que

- D_1 y D_2 representan las distancias de propagación entre centros de fase, sin efectos ionosféricos;
- W la rotación de fase en función de la orientación de la dirección de propagación con respecto al dipolo de la antena (efecto "windup");
- e el retardo ionosférico a la frecuencia f_1 ;
- $\Delta h = h_{rec} - h_{emi}$, la diferencia entre el reloj del receptor h_{rec} y el del emisor h_{emi} en cada fecha;
- $\Delta \tau_{12}$ la diferencia de las desviaciones entre códigos entre receptor y emisor en cada fecha;
- $\Delta \tau_1, \Delta \tau_2$ las desviaciones código-fase (diferencias entre el receptor y el emisor en cada fecha) para f_1 y f_2 , respectivamente; y
- N_1, N_2 las ambigüedades de fase enteras de los dos portadoras, desconocidas al principio y que se suponen invariables durante un paso dado del satélite considerado (es decir, que se contabilizan los saltos de fase que sobrevienen durante un paso del satélite en las mediciones de fase L_1 y L_2).

35 Se debe observar que las desviaciones $\Delta \tau_{12}, \Delta \tau_1, \Delta \tau_2$ pueden variar en función del tiempo.

Se debe observar en este caso que, en caso de recepción de triple frecuencia, se obtienen además, para cada satélite, la medición de código P_3 y la medición de fase L_3 en la tercera frecuencia f_3 así como las ecuaciones de modelización siguientes:

$$\begin{aligned} \lambda_3 L_3 &= (D_3 + \lambda_3 W) - \gamma' e - \lambda_3 N_3 + (\Delta h + \Delta \tau_{13} + \Delta \tau_3) \\ P_3 &= D_3 + \gamma' e + (\Delta h + \Delta \tau_{13}) \end{aligned}$$

en las que

$$\gamma' = \frac{f_1^2}{f_3^2} = \frac{\lambda_3^2}{\lambda_1^2}, \quad \lambda_3 = \frac{c}{f_3}$$

- N_3 representa la ambigüedad de fase entera de la tercera portadora, desconocida al principio y que se supone invariable durante un paso dado del satélite considerado;
- D_3 la distancia de propagación entre centros de fase, sin efectos ionosféricos; y
- $\Delta \tau_{13}$ la diferencia de las desviaciones entre códigos entre receptor y emisor en cada fecha para las frecuencias f_1 y f_3

- $\Delta\tau_3$ la desviación código-fase para f_3 .

Como las ecuaciones para el par de frecuencias (f_1, f_3) se obtienen directamente de las ecuaciones para el par (f_1, f_2) intercambiando el índice "2" por el índice "3", la descripción siguiente se limitará al par de frecuencias (f_1, f_2) con el fin de evitar repeticiones inútiles.

La ambigüedad widelane (entera) se define mediante $N_W=N_2-N_1$. Se puede construir el estimador widelane para N_W (etapa 12) mediante las ecuaciones siguientes:

$$\hat{e} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma - 1}$$

(estimación del retardo ionosférico, sin desviaciones sistemáticas)

$$\hat{N}_1 = \frac{P_1 - 2\hat{e}}{\lambda_1} - L_1 \quad \text{y} \quad \hat{N}_2 = \frac{P_2 - 2\gamma\hat{e}}{\lambda_2} - L_2$$

(estimación de las ambigüedades)

$$\hat{N}_W = \hat{N}_1 - \hat{N}_2$$

(estimación de la ambigüedad widelane)

Se pueden construir las ecuaciones de medición de este estimador a partir de las ecuaciones (1), y se obtiene una ecuación de la forma:

$$\hat{N}_W = N_2 - N_1 + d + \Delta\mu \tag{2}$$

en la que d es una corrección geométrica asociada a la diferencia entre D_1 y D_2 que sigue siendo pequeña frente a un ciclo para las antenas normales y se puede calcular con una buena precisión si es necesario con ayuda de las efemérides radiodifundidas. W ya no contribuye en esta ecuación. $\Delta\mu$ es una combinación lineal de las diferencias receptor-emisor $\Delta\tau_{12}, \Delta\tau_1, \Delta\tau_2$ y por tanto es asimismo una diferencia entre un valor que sólo depende del receptor (indicado por μ_{rec}) y un valor que sólo depende del emisor (indicado por μ_{emi}). Se anota:

$$\Delta\mu(t) = \mu_{rec}(t) - \mu_{emi}(t) \tag{3}$$

en la que la dependencia del tiempo se indica explícitamente.

El valor de $\Delta\mu$ es común a todas las mediciones efectuadas en una misma fecha en los diferentes canales del receptor.

El valor de $N_W=N_2-N_1$ se puede identificar por resolución de la ecuación (2) en una determinada duración durante la cual se dispone por lo menos de dos pasos simultáneos de satélites (etapa 14). Anotando K_k el entero que se debe hallar, se puede reformular la ecuación (2) de la manera siguiente:

$$R_k(t) + \mu_{emi,k}(t) = K_k + \mu_{rec}(t) \tag{4}$$

en la que

$R_k(t)$ representa el residuo asociado a cada medición del paso k , sabiendo que, a partir de (2), se obtiene $R_k(t) = \hat{N}_W(t) - d(t)$,

$\mu_{emi,k}(t)$ la desviación widelane del satélite del paso k que se debe proporcionar al receptor para determinar la posición (etapa 13), y

$\mu_{rec}(t)$ la desviación widelane del receptor (desconocida, que por tanto se debe determinar durante la búsqueda de K_k).

Se debe observar que la ecuación (4) representa de hecho un sistema de ecuaciones, que se puede resolver, por ejemplo, mediante la técnica de los mínimos cuadrados. Este método de resolución no se detalla en este caso. Es importante observar que la solución del sistema (4) no es única, sino que hay una familia de soluciones que se deducen unas de otras por la transformación entera $[\mu_{rec}(t), K_k] \leftrightarrow [\mu_{rec}(t)+n, K_k-n]$, para cualquier n entero.

Otra posibilidad sencilla de resolución del sistema (4), y que se presta bien a la ilustración del concepto, es la construcción de diferencias simples entre mediciones asociadas a diferentes pasos, lo cual permite eliminar directamente la contribución de $\mu_{rec}(t)$ y obtener unas ecuaciones de la forma:

5

$$(R_b(t) + \mu_{emi,b}(t)) - (R_a(t) + \mu_{emi,a}(t)) = K_b(t) - K_a(t)$$

para unos pasos a y b. Mediante el cálculo de la media en el intervalo de tiempo común a los pasos a y b, se obtiene $K_b - K_a$. Se procede entonces iterativamente, eligiendo otros pares de pasos que se solapen adecuadamente en el tiempo, lo cual proporciona otros valores $K_b - K_a$. Este método funciona bien cuando hay un buen solapamiento en el tiempo de los pasos considerados. De esta manera, se han determinado finalmente las ambigüedades widelane asociadas a los pasos de satélite de manera coherente en el conjunto de los satélites, con una tolerancia de un entero común. En efecto, en todos los pasos, una ambigüedad widelane sigue siendo desconocida, pero las demás ambigüedades widelane se derivan directa o indirectamente en cuanto se fija, de donde se desprende la denominación de determinación coherente en el conjunto de satélites. Se debe observar que en presencia de ruidos importantes en las mediciones, es preferible resolver el sistema (4) directamente (sin la diferenciación entre pasos), por ejemplo con ayuda de la técnica de los mínimos cuadrados, puesto que el ruido es más elevado (del orden de 1,4 veces más elevado) en las ecuaciones de simples diferencias.

10

15

20

25

30

Los valores μ_{emi} merecen una explicación, puesto que sin conocer estos valores, el receptor no sabrá acceder a la solución coherente de las ambigüedades widelane. Los valores μ_{emi} se determinan preferentemente a nivel de una red de receptores de referencia. Se utiliza la propiedad de que, en la práctica, los μ_{emi} son unas funciones lentamente variables del tiempo. La técnica de determinación de los μ_{emi} a nivel de una red de referencia es objeto de la solicitud de patente registrada con el número FR 0754139. Este método utiliza asimismo las ecuaciones del sistema (4). Preferentemente, el proceso de determinación de los μ_{emi} comienza con la elección de una primera estación de la red de referencia cuyos valores de μ_{rec} (indicados en adelante por $\mu_{rec,ref}$) son estables en el tiempo. Para esta estación, se fija $\mu_{rec,ref}$ de manera arbitraria, por ejemplo se hace $\mu_{rec,ref} = 0$. Se recorren a continuación los pasos de los satélites en visibilidad para esta estación. Para cada paso, se tiene $R_k = K_k - \mu_{emi}$, por definición de la primera estación. Se descompone entonces R_k en una cantidad entera arbitraria (por ejemplo, el entero más próximo), que da K_k , y una cantidad no necesariamente entera correspondiente a la diferencia $R_k - K_k$ que da μ_{emi} . Esto proporciona los μ_{emi} de los satélites en visibilidad para la primera estación.

35

Para los satélites de los que se conocen ahora los retardos internos μ_{emi} se estiman los retardos $\mu_{rec,ref}$ de las otras estaciones. Esta vez, en la ecuación $R_k(t) = K_k + \mu_{rec,ref}(t) - \mu_{emi,k}(t)$, se conoce el valor de $\mu_{emi,k}$. Se descompone entonces $R_k(t) + \mu_{emi,k}(t)$ en un número entero arbitrario (de la nueva estación) y el retardo de estación $\mu_{rec,ref}$ correspondiente. Se repiten estas etapas para todos los satélites de la constelación y todas las estaciones de la red de referencia. Se obtienen finalmente valores μ_{emi} coherentes en toda la red de referencia, que se pueden considerar como constantes en por lo menos un día.

40

Los μ_{emi} pueden ser comunicados al receptor que debe determinar su posición mediante cualquier medio conveniente, por ejemplo en el mensaje de navegación de la constelación de satélites considerada, por difusión terrestre o a partir de un satélite SBAS, por Internet, por radiotelefonía móvil, etc. Dada la pequeña tasa de cambio de los μ_{emi} , se necesita poca anchura de banda para encaminar sus valores al receptor que debe fijar su posición.

45

Cuando se conoce el valor de la ambigüedad widelane, se puede construir a partir de las ecuaciones de fase en (1), una nueva ecuación, homogénea a una pseudodistancia:

$$L_2 - L_1 + N_w = \left(\frac{D_2}{\lambda_2} - \frac{D_1}{\lambda_1} \right) - \left(\frac{\gamma}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) e + \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) (\Delta h + \Delta \tau_w) \quad (5)$$

50

en la que $\Delta \tau_w$ es una magnitud similar a un TGD (de "time group delay"), puesto que es una combinación lineal de $\Delta \tau_{12}$, $\Delta \tau_1$, $\Delta \tau_2$. Esta nueva combinación presenta un ruido de medición muy interesante que equivale a algo menos de dos veces el ruido de fase (por tanto, normalmente 5 mm), en comparación con el ruido de código (normalmente de varias decenas de centímetros).

55

Se dispone de las mediciones no ambiguas siguientes (tras el bloqueo de la combinación widelane, en anotación clásica Rinex, juego de mediciones en una fecha):

$$\begin{aligned}
 L_2 - L_1 + N_w &= D \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) - e \left(\frac{\gamma}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) + (k + \Delta h + \Delta \tau_w) \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \\
 P_1 &= D + e + (\Delta h + \Delta \tau) \\
 P_2 &= D + \gamma e + (\Delta h + \gamma \Delta \tau)
 \end{aligned} \tag{6}$$

en la que D y e son respectivamente la pseudodistancia modelizable (incluido el retardo troposférico), y el retardo ionosférico con respecto a la primera frecuencia. Δh es en este caso la diferencia entre reloj receptor y reloj emisor, referenciada a la combinación de pseudodistancias "iono-free" (sin contribución ionosférica) $(\gamma P_1 - P_2)/(\gamma - 1)$; $\Delta \tau$ corresponde en este caso al 'TGD' entre receptor y emisor, puesto que las ecuaciones están referenciadas a la combinación iono-free, contrariamente a las ecuaciones (1). Esto no cambia la generalidad, aunque referencia las ecuaciones (6) con respecto a lo que se utiliza habitualmente en el sistema GPS.

La ecuación de la variable observable widelane es particular porque el conjunto de las ambigüedades widelane se determina con una tolerancia de un entero (indicado por n).

Se han despreciado las contribuciones de correcciones tales como la diferencia de los centros de fase, sabiendo que el objetivo en este caso es analizar los ruidos de combinaciones ideales. De cualquier manera, se puede suponer siempre que estas correcciones se han aplicado antes de la generación de las ecuaciones anteriores, puesto que estas correcciones se pueden calcular a nivel de receptor con una precisión suficiente. El efecto windup (que requeriría el conocimiento o la modelización de la actitud de los satélites) no se ha tenido en cuenta, puesto que se elimina en la combinación widelane (véase la ecuación (5)).

En el caso de tres variables observables, se dispone por tanto de tres coeficientes para construir una combinación de las ecuaciones (6) eliminando el término ionosférico (etapa 16). Indicando por P_{opt} la combinación óptima de las variables observables de las ecuaciones (6) y por a_w , a_1 y a_2 los coeficientes de esta combinación, se obtiene:

$$P_{opt} = a_w(L_2 - L_1 + N_w) + a_1 P_1 + a_2 P_2. \tag{7}$$

Se requiere que el coeficiente de D sea 1 y que el de e desaparezca. Se obtienen las limitaciones:

$$\begin{aligned}
 \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) a_w + a_1 + a_2 &= 1 \\
 - \left(\frac{\gamma}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) a_w + a_1 + \gamma a_2 &= 0
 \end{aligned} \tag{8}$$

Hay dos ecuaciones de limitación, por tanto queda una infinidad de combinaciones posibles, entre las que se puede elegir con un criterio adicional tal como la minimización del ruido o la robustez de los resultados.

Todos los términos de reloj así como los términos $\Delta \tau$ y $\Delta \tau_w$ de las ecuaciones (6) se agrupan en un término que se puede denominar "reloj asociado a la combinación" en el marco de la utilización de una combinación dada de estas variables observables. Este término de reloj se indica como Δh_{opt} y se tiene entonces $P_{opt} = D + \Delta h_{opt}$. Se debe observar que la parte de reloj de receptor del término Δh_{opt} es ambigua (a causa del entero desconocido n), pero esto no limita la resolución de un problema de posicionamiento, puesto que en este caso, el reloj de receptor se supone desconocido y se resuelve en cada fecha. Para deducir la pseudodistancia D de la combinación P_{opt} (etapa 16), el receptor necesita conocer la parte de reloj de emisor del término Δh_{opt} , que se indicará como $h_{opt,emi}$. Los valores de los $h_{opt,emi}$ se calculan preferentemente a nivel de un sistema de referencia y se transmiten al receptor (etapa 15). La determinación de la posición geográfica del receptor (etapa 18) se realiza finalmente gracias a los juegos de pseudodistancias calculadas. Se debe observar que la combinación que se utiliza en el receptor se debe fijar de antemano (por ejemplo por convención, o por definición de un protocolo) para que los valores $h_{opt,emi}$ sean consistentes con la combinación. La determinación de los $h_{opt,emi}$ se puede realizar de manera clásica a nivel de red de referencia gracias al sistema de ecuaciones (6). Se debe observar que a nivel de red de referencia, al conocerse las posiciones de los receptores de referencia (por tanto, también las pseudodistancias), el sistema (6) se resuelve entonces para las incógnitas $h_{opt,emi}$, $h_{opt,rec}$, etc.

La formulación teórica del problema de la construcción de las combinaciones lineales de varias variables observables eliminando el efecto ionosférico se detalla a continuación. Se generaliza directamente a un número cualquiera de variables observables.

Se indica como x el vector de los coeficientes de la combinación de las tres variables observables (widelane, código 1 y código 2), siendo A y B las matrices de los coeficientes de las ecuaciones (6), de manera que se obtiene:

$$B \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} D \\ e \end{bmatrix}, y \tag{9}$$

$$x' A = [1 \quad 0] \tag{10}$$

Se obtiene D mediante:

$$D = x' B \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \tag{11}$$

Indicando como P la matriz de correlación de los ruidos de las cuatro mediciones brutas de código y fase, el ruido correspondiente a esta solución viene dado por

$$\sqrt{x' B P B' x}.$$

Para cada definición de los ruidos P, se pueden hallar en este caso los coeficientes de la combinación óptima x y el ruido respecto a la solución (es decir, con respecto al valor de D) asociado. En adelante, se ilustrará el orden de magnitud de los ruidos óptimos para diferentes casos de ruidos de medición.

Ejemplo 1: caso de GPS (de doble frecuencia)

La tabla siguiente muestra el orden de magnitud de los ruidos óptimos en el caso de GPS en modo de doble frecuencia (unidades en metros, frecuencias 1 y 2 respectivamente de 1575,42 MHz y 1227,60 MHz):

Ruidos de fase 1, 2 (m)	Ruidos de código 1, 2 (m)	Ruido resultante (m)
Inf; Inf	1,0; 1,0	2,97
0,01; 0,01	1,0; 1,0	2,78
0,01; 0,01	1,0; 0,1	0,36
0,01; 0,01	0,1; 1,0	0,45
0,01; 0,01	0,1; 0,1	0,28

La primera línea de esta tabla (ruidos de fase que se suponen infinitos) corresponde al caso clásico de la combinación iono-free de código. Se observa que la utilización de la combinación de fase widelane sólo es interesante si por lo menos una de las mediciones de código presenta un ruido débil. Ahora bien, las tres últimas líneas de la tabla son casos hipotéticos, puesto que el ruido de las mediciones de código de las señales GPS es del orden del metro. Asimismo se aprecia que si se supone que las dos mediciones de código presentan un ruido de 10 cm, se llega a un ruido de 30 cm en la combinación iono-free de código, lo cual muestra que la aportación de la combinación de fase widelane no es significativa si las dos mediciones de código son buenas (última línea de la tabla). A modo indicativo, si se efectuara una resolución completa de las ambigüedades, el ruido resultante sería de 3 cm, con las hipótesis contempladas.

Ejemplo 2: caso de GPS (de triple frecuencia)

Para el caso de GPS de triple frecuencia, se dispondrá de las frecuencias L1, L2 y L5. Se pueden adaptar entonces los sistemas de ecuaciones (6)-(11) y se llega a la tabla de ruidos siguiente (unidades de nuevo en metros, frecuencias 1, 2 y 3 de 1575,42 MHz, 1227,60 MHz y 1176,45 MHz, respectivamente):

Ruidos de fase 1, 2, 3 (m)	Ruidos de código 1, 2, 3 (m)	Ruido resultante (m)
Inf; Inf; Inf	1,0; 1,0; 1,0	2,54
0,01; 0,01; 0,01	Inf; Inf; Inf	0,27
0,01; 0,01; 0,01	1,0; 1,0; 1,0	0,27
0,01; 0,01; 0,01	1,0; 1,0; 0,1	0,20
0,01; 0,01; 0,01	1,0; 0,1; 0,1	0,18
0,01; 0,01; 0,01	0,1; 0,1; 0,1	0,16

El comportamiento es coherente con respecto al del ejemplo 1: son las dos combinaciones con menos ruido que contribuyen esencialmente al rendimiento. La primera línea de la tabla muestra que la adición de la tercera

frecuencia no aporta gran cosa al ruido resultante obtenido por la combinación iono-free de código (lo cual no disminuye el interés de tres frecuencias, por motivos de robustez, trayectos múltiples, etc.).

5 En cambio, se obtiene directamente un rendimiento de 27 cm si se utilizan únicamente las mediciones de fase en combinaciones widelane (segunda línea de la tabla). A continuación, una medición de código de muy buena calidad permitirá algún beneficio en cuanto a ruido resultante. A continuación, una reducción del ruido en las otras mediciones de código sólo aportará una mejora marginal al ruido resultante.

10 Con respecto al caso convencional (combinación iono-free de código) se obtiene por tanto un beneficio de factor 10 en ruido utilizando las combinaciones de fase widelane, y un reducido beneficio adicional al añadir una medición de código con mejor rendimiento. El interés de las combinaciones de fase widelane viene del hecho de que los datos sólo dependen de la fase y por tanto están menos sujetos a problemas de trayectos múltiples que las mediciones de código.

15 **Ejemplo 3: caso de Galileo (de triple frecuencia)**

Se repite el análisis de los rendimientos para el caso del futuro sistema Galileo. Las frecuencias 1, 2 y 3 utilizadas en la tabla siguiente son por tanto ahora 1575,42 MHz, 1176,45 MHz y 1278,75 MHz, respectivamente.

Ruidos de fase 1, 2, 3 (m)	Ruidos de código 1, 2, 3 (m)	Ruido resultante (m)
Inf; Inf; Inf	1,0; 1,0; 1,0	2,66
0,01; 0,01; 0,01	Inf; Inf; Inf	0,19
0,01; 0,01; 0,01	1,0; 1,0; 1,0	0,19
0,01; 0,01; 0,01	1,0; 1,0; 0,1	0,16
0,01; 0,01; 0,01	1,0; 0,1; 0,1	0,15
0,01; 0,01; 0,01	0,1; 0,1; 0,1	0,14

20 Como para GPS de triple frecuencia, la aportación significativa procede de las dos combinaciones de fase widelane. Se obtiene en este caso un beneficio de más de un factor 10 en el ruido resultante.

25 Los ejemplos anteriores muestran que, gracias a la utilización de las ambigüedades widelane coherentes en un receptor de triple frecuencia, es posible construir una pseudodistancia iono-free cuyo ruido se mejora en un factor de 10 con respecto a la pseudodistancia iono-free obtenida por combinaciones de mediciones de código únicamente.

30 La utilización de esta capacidad se basa en la disponibilidad, a nivel del receptor, de diferentes datos, a saber las desviaciones widelane de los satélites (los valores de los $\mu_{emi}(t)$) así como datos de relojes de satélites asociados a la combinación óptima utilizada a nivel del receptor. Las desviaciones widelane μ_{emi} se calculan para la o las combinaciones widelane utilizadas y para todos los satélites de la constelación a nivel de un sistema de referencia. Por otro lado, el sistema de referencia determina los relojes $h_{opt,emi}$ para la combinación óptima elegida y para las efemérides de las que dispone el receptor que debe fijar su posición. Preferentemente, los datos que necesita el receptor se comunican de forma regular desde el sistema de referencia según un protocolo predefinido. En principio, se podrían utilizar todas las vías de comunicación, con la condición de que su anchura de banda sea conveniente. El receptor presenta preferentemente una memoria para almacenar en la misma los datos comunicados por el sistema de referencia entre las diferentes actualizaciones.

40 En teoría no es necesario disponer de nuevas efemérides para utilizar el procedimiento según la invención, es decir, que se podrían utilizar las efemérides convencionales difundidas por los satélites en el mensaje de navegación. Sin embargo, se observa por un lado que su rendimiento va a limitar el interés del método, y por otro lado que los relojes asociados a la combinación óptima se deberán calcular entonces a partir de estas efemérides. Para que el usuario se pueda beneficiar plenamente del rendimiento del procedimiento (normalmente para tener una precisión mejor de 10 centímetros en la medición), se prevé por tanto preferentemente una actualización de las efemérides más precisa.

45 Por otro lado, una difusión de los relojes correspondientes a la combinación utilizada es necesaria en el caso general. Sin embargo, estos relojes también se podrían obtener mediante una corrección con respecto a los relojes de referencia (de manera similar a las desviaciones entre frecuencias ('TGD') de GPS, que permite obtener unos relojes adaptados a la primera frecuencia a partir de los relojes de referencia procedentes de la combinación iono-free). En la mayoría de los casos, estas correcciones serán constantes o lentamente variables. El método es por tanto compatible con relojes más precisos, obtenidos por ejemplo por bloqueo completo de las ambigüedades enteras a nivel de sistema.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de tratamiento de señales de radionavegación procedentes de un conjunto de satélites, del que cada satélite difunde por lo menos una primera señal de radionavegación a una primera frecuencia y una segunda señal de radionavegación a una segunda frecuencia distinta de la primera, comprendiendo el procedimiento, a nivel de receptor, las acciones de:

- 5 a) recibir, para cada satélite de dicho conjunto, dichas primera y segunda señales;
- b) efectuar, para cada satélite de dicho conjunto, unas mediciones no diferenciadas de código y de fase de dichas primeras y segundas señales recibidas (10), presentando dicha medición de fase de la primera señal y dicha medición de fase de la segunda señal, cada una, una ambigüedad entera desconocida *a priori*, de manera que la combinación widelane de las mediciones de fase de las primera y segunda señales presenta también una primera ambigüedad widelane entera desconocida *a priori*;
- 10 c) determinar las primeras ambigüedades widelane de manera coherente en el conjunto de satélites utilizando unas desviaciones widelane, recibidas desde un sistema de referencia, asociadas a los satélites de dicho conjunto de satélites (12, 13, 14), y
- 15 d) fijar la posición del receptor (18) con ayuda de dichas mediciones de código y de fase de las primeras y segundas señales recibidas así como de las primeras ambigüedades widelane determinadas de manera coherente en el conjunto de satélites,
- 20

caracterizado porque la acción de fijar la posición del receptor comprende, para cada satélite de dicho conjunto de satélites, la determinación (16) de una pseudodistancia por medio de una combinación iono-free de dichas mediciones de código y de la diferencia de las mediciones de fase de las primera y segunda señales, compensada por la ambigüedad widelane, siendo dicha combinación iono-free optimizada en términos de ruido, basándose la determinación de la pseudodistancia además en unos valores de reloj de satélite, recibidos desde un sistema de referencia, asociados a dicha combinación iono-free.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la determinación de las primeras ambigüedades widelane de manera coherente en el conjunto de satélites comprende:

la recepción de desviaciones widelane asociadas a los satélites de dicho conjunto de satélites por parte de un sistema de referencia (13);

para cada satélite de dicho conjunto de satélites, el cálculo de un valor estimado de la primera ambigüedad widelane (12) según la ecuación:

$$\hat{N}_w = \left(\frac{P_2 - 2\gamma\hat{e}}{\lambda_2} - L_2 \right) - \left(\frac{P_1 - 2\hat{e}}{\lambda_1} - L_1 \right)$$

40 en la que

\hat{N}_w designa dicho valor estimado de la primera ambigüedad widelane,
 P_1 y P_2 designan las mediciones de código de las primera y segunda señales, respectivamente,
 L_1 y L_2 designan las mediciones de fase de las primera y segunda señales, respectivamente,
 λ_1 y λ_2 designan las longitudes de onda de las primera y segunda señales, respectivamente,

$$\gamma = \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2},$$

50 y \hat{e} es una estimada del retardo ionosférico que se debe tener en cuenta para la primera señal;
 para cada satélite de dicho conjunto de satélites, modelización de la primera ambigüedad widelane mediante

$$N_w = \hat{N}_w - d + \mu_{sat} - \mu_{rec}$$

55 en la que N_w designa la primera ambigüedad widelane,
 d designa un término de corrección geométrica,

μ_{sat} designa la desviación widelane asociada al satélite respectivo,

μ_{rec} designa la desviación widelane asociada al receptor, común a todas las primeras ambigüedades widelane;

5 e identificar un juego de valores enteros de las primeras ambigüedades widelane que son conformes a dicha modelización para el conjunto de satélites (14).

10 3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que la identificación de dichos valores enteros (14) se realiza con ayuda de simples diferencias, entre satélites, de las modelizaciones de las primeras ambigüedades widelane.

4. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que dichas primera y segunda frecuencias se eligen de entre las frecuencias L1, L2, L5 y E6.

15 5. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que cada satélite de dicho conjunto difunde una tercera señal de radionavegación a una tercera frecuencia distinta de las primera y segunda frecuencias, en el que,

20 para cada satélite de dicho conjunto, también se recibe dicha tercera señal;

se efectúan para cada satélite de dicho conjunto unas mediciones no diferenciadas de código y de fase de dicha tercera señal recibida, presentando dicha medición de fase de la tercera señal una ambigüedad entera desconocida *a priori*, de manera que la combinación widelane de las mediciones de fase de las primera y tercera señales presenta una segunda ambigüedad widelane entera desconocida *a priori*;

25 las segundas ambigüedades widelane se determinan de manera coherente en el conjunto de satélites; y

30 la acción de fijar la posición del receptor se realiza también con ayuda de las mediciones de código y de fase de las terceras señales así como de las segundas ambigüedades widelane determinadas de manera coherente en el conjunto de satélites.

35 6. Procedimiento según la reivindicación 5, en el que la determinación de las segundas ambigüedades widelane de manera coherente en el conjunto de satélites se efectúa de manera análoga a la determinación de las primeras ambigüedades widelane de manera coherente en el conjunto de satélites.

7. Procedimiento según la reivindicación 5 o 6, en el que dicha tercera frecuencia se elige de entre las frecuencias L1, L2, L5 y E6.

40 8. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que entre dichas mediciones no diferenciadas de código por lo menos una presenta un ruido inferior a 0,5 m, preferentemente inferior a 0,25 m.

45 9. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, en el que cada una de dichas mediciones no diferenciadas de código presenta un ruido superior a 0,5 m.

10. Receptor GNSS, caracterizado porque comprende unos medios configurados para la realización del procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.

50 11. Receptor GNSS según la reivindicación 10, comprendiendo los medios para la realización del procedimiento un programa, almacenado en una memoria del receptor, configurado de manera que haga funcionar al receptor según el procedimiento cuando el programa se ejecuta en el receptor.

Fig. 1

