

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 843 774**

51 Int. Cl.:

G01S 19/20 (2010.01)

G01S 19/42 (2010.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.08.2018** **E 18188063 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **21.10.2020** **EP 3608691**

54 Título: **Un método para operar una pluralidad de receptores GNSS para detectar deformación de señal de satélites**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
20.07.2021

73 Titular/es:

**THALES MANAGEMENT & SERVICES
DEUTSCHLAND GMBH (100.0%)
Thalesplatz 1
71254 Ditzingen, DE**

72 Inventor/es:

**BOMART, SÉBASTIEN;
SCHÜTTPELZ, ANDRÉ;
KUSARI, ARBERITA;
BECK, FRIEDER y
KÄLBERER, ULRICH**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 843 774 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

Un método para operar una pluralidad de receptores GNSS para detectar deformación de señal de satélites

La invención se refiere a un método para operar una pluralidad de receptores GNSS (= Sistema Global de Navegación por Satélite),

- 5 en donde para la determinación de la posición, los receptores GNSS reciben señales de código GNSS pertenecientes a señales enviadas desde una multitud de satélites,

y en donde cada señal de código GNSS recibida se correlaciona con una señal de código de referencia generada por el receptor GNSS que la recibe para obtener una función de autocorrelación, en donde una multitud de valores de función de la función de autocorrelación en diferentes separaciones entre chips discretas se analizan y se utilizan para
10 obtener una métrica de prueba,

en donde, utilizando la métrica de prueba, se toma una decisión en cuanto a si las señales de código GNSS recibidas son apropiadas para determinación de la posición o inapropiadas para determinación de la posición debido a deformación de la señal de los satélites, y en donde las señales de código GNSS que se encuentra que son inapropiadas para la determinación de la posición se excluyen de la determinación de la posición.

- 15 Un aparato para monitorización de la calidad de la señal de satélites de navegación se conoce del documento EP 1 332 378 B1, indicado también como [AD09].

Los receptores GNSS (= Sistema Global de Navegación por Satélite) se utilizan para determinar la posición de, por ejemplo, vehículos en movimiento tales como un avión o un barco. Varios satélites orbitando en el espacio envían de manera regular señales de código GNSS, y en un receptor GNSS las señales recibidas son correlacionadas con
20 señales de referencia (también llamadas señales de réplica) para determinar un retraso temporal entre la transmisión en el respectivo satélite y la llegada al receptor GNSS. Estos retrasos temporales se pueden utilizar para determinar distancias a los respectivos satélites, los cuales se mueven en trayectorias conocidas, de modo que se puede calcular información de posición (como longitud, latitud y altura geográficas).

- 25 En ocasiones, un satélite puede volverse defectuoso, de tal manera que la señal de código GNSS enviada por el satélite está deformada (corrupta), es decir, no tiene las propiedades necesarias para una determinación precisa de la posición. Los tipos más importantes de deformaciones de señal son un retraso de la señal en comparación con la sincronización correcta (caracterizada normalmente por un retraso temporal Δ), y un *ringing* (señales de alta frecuencia) analógico superpuesto sobre la señal (caracterizado normalmente por un coeficiente de disminución σ), o combinaciones de ambos. Si las señales deformadas recibidas en un receptor GNSS se utilizan para determinación
30 de la posición, se pueden producir como resultado errores de posición.

La deformación de la señal se mide normalmente utilizando una función de autocorrelación, aplicando una convolución con una señal de réplica. Cabría señalar que cierta pequeña deformación de la señal está presente también en el caso libre de fallos, por razones inherentes al hardware aplicado (funcionando de manera correcta) y a la metodología de medida.

- 35 Si la determinación de la posición es crítica para la seguridad, como por ejemplo en aplicaciones aeronáuticas o ferroviarias, las señales deformadas tienen que ser identificadas rápidamente, y tienen que ser excluidas de la determinación de la posición.

La monitorización de la deformación de la señal es exigida por ejemplo por la ICAO (organización de aviación civil internacional) en GBAS (sistema de aumentación basado en tierra) y SBAS (sistema de aumentación basado en
40 satélites) para sistemas de navegación diferencial críticos para la seguridad basados en satélites utilizados en aviación [AD01]. Hasta la fecha, se han sugerido dos métodos de monitorización, compárese [AD02 – AD06].

- El documento EP 1 332 378 B1 describe un aparato para monitorización de la calidad de la señal de navegación. Para una señal de código GNSS recibida, se determinan valores de la función de autocorrelación I_i para diferentes separaciones entre chips. A continuación se calculan valores de diferencia $d_k = I_k - I_{k-1} - E d_k$ dando como resultado un
45 vector $\underline{d}$, siendo E un valor esperado, y se calcula una matriz de covarianza $P = E[(\underline{d} - \underline{m})(\underline{d} - \underline{m})^T]$, y siendo $\underline{m}$ el vector medio de $\underline{d}$. A continuación se calcula la matriz diagonal D para P , utilizando factorización de Cholesky, para obtener las varianzas $\hat{\sigma}_i^2$. Se calcula a continuación un valor de fallo $d[\chi^2] = \sum_{i=1}^n \frac{d_i^2}{\hat{\sigma}_i^2}$, el cual se puede comparar con un umbral para determinar la existencia de un fallo.

- 50 La dificultad en la monitorización de señales de código GNSS para detectar deformación de la señal de satélites es, por un lado, identificar de forma fiable fallos del satélite ("integridad") y, por otro lado, no excluir de manera innecesaria un satélite que esté funcionando correctamente ("continuidad"). Además, el procedimiento de monitorización debería tener un tiempo hasta la alerta lo suficientemente corto para excluir satélites defectuosos antes de que se pueda producir una situación peligrosa.

La referencia [AD07] trata del análisis de componentes principales (PCA) como una metodología de detección para radar de penetración en el suelo. La referencia [RD01] proporciona una descripción general del PCA recursivo. La referencia [AD08] describe el uso de pre-umbrales en el estadístico monitor.

Objeto de la invención

- 5 Es el objeto de la presente invención proporcionar un método para operar receptores GNSS, que permita la monitorización de señales de código GNSS con una integridad y continuidad mejoradas.

Breve descripción de la invención

Este objeto se logra, según la invención, mediante un método como el presentado al comienzo,

- 10 en donde, para cada satélite i , siendo i un índice del satélite, la utilización de la métrica de prueba incluye los siguientes pasos:

- a) para cada época temporal t_k en la cual los receptores GNSS reciben señales de código GNSS pertenecientes a la señal de la misma frecuencia portadora enviadas desde el satélite i , formando un vector $\vec{X}_{i,k}$ de valores de medida $X_{m,i,k}$, siendo m un índice de separación entre chips, y siendo k un índice de época temporal de medida, y derivándose el respectivo valor de medida $X_{m,i,k}$ de valores de función normalizados y con sesgo eliminado de las funciones de autocorrelación de las señales de código GNSS recibidas en los receptores GNSS, combinados para una multitud de los receptores GNSS;

- b) obtener la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$ en la época temporal t_n a partir de los vectores $\vec{X}_{i,k}$ de valores de medida por épocas obtenidos a lo largo de una pluralidad de n épocas temporales t_k con $k = 1, \dots, n$, siendo n un índice de época temporal de monitorización, lo cual produce como resultado una matriz $\mathbf{X}_{i,n} = \begin{bmatrix} \vec{X}_{i,1} \\ \vdots \\ \vec{X}_{i,n} \end{bmatrix}$, en particular con $\mathbf{R}_{i,n} \sim \mathbf{X}_{i,n}^T \mathbf{X}_{i,n}$,

- 20 siendo $\mathbf{X}_{i,n}^T$ la matriz traspuesta de $\mathbf{X}_{i,n}$,

- c) realizar un análisis de componentes principales sobre la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$, obteniendo de esta forma una descomposición propia de la matriz $\mathbf{R}_{i,n}$ en una multitud de autoparejas, a saber, parejas de autovector y autovalor,

- d) calcular para la época temporal t_n una métrica de prueba del monitor de la calidad de la señal $\text{SQM}_{i,n}$ transformando el vector $\vec{X}_{i,n}$ en el vector $\vec{T}_{i,n}$ por medio de multiplicación por la matriz de componentes principales $\mathbf{PC}_{i,n}$ y formando la suma de cuadrados de las entradas del vector $\vec{T}_{i,n}$, en donde $\mathbf{PC}_{i,n}$ contiene al menos dos autovectores de $\mathbf{R}_{i,n}$, teniendo los autovectores elegidos los mayores autovalores de todas las autoparejas,

- e) comparar $\text{SQM}_{i,n}$ con un valor umbral THR predefinido y, si $\text{SQM}_{i,n}$ supera a THR, la totalidad de las señales de código GNSS recibidas en todos los receptores GNSS pertenecientes a la señal de la misma frecuencia portadora enviada por el satélite i en la época temporal t_n se consideran inapropiadas para determinación de la posición debido a deformación de la señal del satélite,

en donde para épocas temporales consecutivas que han pasado, se determina de nuevo la métrica de prueba del monitor de la calidad de la señal $\text{SQM}_{i,n}$, incrementando n en 1 para cada época temporal que ha pasado.

- la presente invención propone basar una métrica de prueba en un análisis de componentes principales (PCA), véase el paso c), aplicado sobre una matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$, véase el paso b), obtenida a partir de valores de función con sesgo eliminado y normalizados de la función de autocorrelación de las señales de código GNSS recibidas en los receptores GNSS procedentes del mismo satélite i en la misma frecuencia portadora, compárese con el paso a).

- En el paso a), para incrementar la fiabilidad del método, cada uno de los valores de medida $X_{m,i,k}$ contiene información procedente de una multitud (normalmente todos) de los receptores GNSS (o de sus respectivas señales de código GNSS recibidas) para un valor de índice de separación entre chips m particular; los valores de función respectivos procedentes de los receptores GNSS se utilizan en una combinación (por ejemplo promediados). De este modo, cualquier efecto de error específico del receptor como ruido no correlacionado u observaciones de señal potencialmente corrupta producidas como resultado de un defecto de un único receptor se atenúan, y deformaciones de señal producidas por un defecto en el satélite se mantienen pronunciadas.

- El análisis de componentes principales puede incrementar la respuesta a la deformación de la señal, es decir, la facilidad de reconocimiento de las deformaciones se incrementa, en particular para deformaciones que tienen su origen en defectos del satélite. Con este objetivo, según la invención, la matriz de componentes principales $\mathbf{PC}_{i,n}$ incluye los autovectores de al menos los dos mayores autovalores (y probablemente más) de todos las autoparejas. En el paso d), en la matriz de componentes principales $\mathbf{PC}_{i,n}$, los autovectores se clasifican normalmente en orden de mayor a menor en base al tamaño de sus correspondientes autovalores. La clasificación puede ayudar a identificar los mayores autovalores y los autovectores correspondientes en caso de que no todos los autovectores se deban tener en cuenta.

El análisis de componentes principales se utiliza para la construcción de la métrica de prueba de calidad de la señal $SQM_{i,n}$, véase el paso d), la cual se utiliza para comparación con un valor umbral THR para decidir sobre una exclusión del satélite i , compárese el paso e). La métrica de prueba de calidad de la señal $SQM_{i,n}$ se basa no sólo en información de la época temporal (de monitorización) más reciente t_n , sino que también incluye información de épocas temporales previas, lo que ayuda a identificar defectos en el satélite. Los defectos en el satélite normalmente producen distorsiones de señal para todas las señales de código GNSS enviadas por el respectivo satélite después de que se haya manifestado el defecto, mientras que distorsiones que se producen sólo en una época temporal (de medida) t_k aislada normalmente no tienen su origen en un defecto del satélite (si no, p. ej., en ruido térmico). Obsérvese que el índice n se refiere a la época temporal más reciente, es decir, a la época temporal de monitorización, mientras que el índice k se refiere a las épocas temporales de observación en general (y a menudo a épocas temporales previas/pasadas).

El método innovador se puede realizar “en tiempo real”, es decir, de forma continua durante el funcionamiento de los receptores GNSS, por lo que se proporciona una respuesta particularmente rápida a defectos recién aparecidos en el satélite. La aplicación en tiempo real incluye normalmente un cálculo recursivo de la descomposición propia de $R_{i,n}$. El método es particularmente apropiado para cálculo recursivo, dado que de todas formas utiliza de nuevo información de épocas temporales previas.

El método utiliza normalmente al menos 2 receptores GNSS, preferiblemente al menos 5 receptores GNSS, lo más preferiblemente al menos 7 receptores GNSS. Además, el método se puede utilizar para comprobar la existencia de deformación de señal del satélite de sólo 1 satélite, pero normalmente se utiliza para comprobar si existe deformación de señal del satélite de al menos 3 satélites, preferiblemente al menos 5 satélites, lo más preferiblemente al menos 10 satélites en paralelo; normalmente todos los satélites concebidos para ser utilizados en determinación de posición por los receptores GNSS se comprueban con el método innovador. El método se puede aplicar para hacer más segura la determinación de la posición en particular en aplicaciones ferroviarias; a tal efecto, uno o una pluralidad de receptores GNSS se pueden colocar en un tren, en particular en un tren en circulación. Sin embargo, también son posibles numerosas aplicaciones adicionales, tales como la determinación de la posición para barcos y aviones. La invención se puede aplicar por ejemplo con señales GPS L1 C/A o con señales GLONASS L1 CSA.

En resumen, el método innovador propone una única métrica de prueba, la cual permite una asignación de prestaciones de integridad y continuidad distintas y una valoración probabilística de las prestaciones. Todas las transformaciones aplicadas son lineales, por lo que la conexión original a la distribución subyacente de valores de entrada en bruto (valores de la función de autocorrelación) se mantiene. La invención proporciona una mayor susceptibilidad de deformaciones de señal, en comparación con las métricas conocidas. De forma adicional se puede utilizar una separación de correlador específica (en particular una distribución no simétrica) de los puntos de medida del correlador (posiciones de separación entre chips utilizadas), en particular con más puntos de correlador “tardíos” configurados, para incrementar las prestaciones de detección. La transformación a componentes principales maximiza el tamaño de la métrica de prueba en caso de señales con fallos (por desviaciones normales). Una ventaja significativa es la rápida convergencia del algoritmo: los estimadores de covarianza convencionales y los esquemas de determinación de autovalores requieren una gran cantidad de datos para incrementar la confianza en la resolución de los autovalores. Cuando se aplica un esquema recursivo, según la invención, se evitan estas desventajas y se proporciona una rápida aplicabilidad del discriminador de monitor con un periodo de espera relativamente breve. Con poco ruido en condiciones nominales, lo cual ocurre normalmente para instalaciones de subsistemas en tierra GBAS, el rango de funcionamiento del monitor se extiende, es decir, deja más margen que otros monitores para el compromiso entre integridad y continuidad. Un comportamiento paso alto minimizado y una posibilidad de calibración estadística proporcionan capacidad de detección también para cambios (deformaciones de la señal) en forma de rampa o lentos, además de para cambios repentinos. Obsérvese que la métrica de prueba se puede calibrar; dependiendo de la aplicación, esto puede ser ventajoso, dado que no se producirán violaciones de integridad con una calibración de sesgo mal configurada del monitor.

Variantes preferidas de la invención

En una variante preferida del método innovador, en el paso a), se deriva un valor de medida $X_{m,i,k}$ respectivo a partir de un valor de función en una separación entre chips particular, combinado para dicha multitud de receptores GNSS. En este caso, el índice de separación entre chips puede describir directamente dicha separación entre chips particular. Esto es particularmente sencillo de calcular, y puede ser particularmente útil en deformaciones de señal que ensanchan o estrechan la curva de función de autocorrelación en el tiempo. En esta variante, para cada receptor GNSS (o para la respectiva señal de código GNSS recibida) de la multitud de receptores GNSS, se determina el único valor funcional para la separación entre chips particular (véase m), y la totalidad de estos valores funcionales procedentes de la multitud de receptores se utilizan para derivar el valor de medida combinando estos valores funcionales (p. ej. mediante cálculo del promedio) o aplicando una función de ponderación).

En una variante alternativa, en el paso a), se deriva un valor de medida $X_{m,i,k}$ respectivo a partir de una combinación de valores de función de diferentes separaciones entre chips, en particular a partir de una diferencia de valores de función de dos separaciones entre chips vecinos, combinados para dicha multitud de receptores GNSS. En este caso, el índice de separación entre chips m describe (o contiene) la combinación (particular) (p. ej., la pareja) de separaciones entre chips correspondientes. El método de combinación típico es calcular una diferencia de dos valores funcionales, que corresponde preferiblemente a separaciones entre chips vecinos. Esto puede ser particularmente útil

para identificar deformaciones de señal que producen como resultado fuertes gradientes en la curva de la función de autocorrelación. En este caso típico, para cada receptor GNSS (o para la respectiva señal de código GNSS) de la multitud de receptores GNSS, se determina la diferencia entre dos valores funcionales en dos separaciones entre chips diferentes (particulares), y la totalidad de estas diferencias (para los dos valores funcionales en las separaciones entre chips particulares) procedentes de la multitud de receptores se utilizan para derivar el valor de medida combinando estas diferencias (p. ej., mediante cálculo del promedio o aplicando una función de ponderación). Se puede aplicar un procedimiento análogo para otros métodos de combinación diferentes al cálculo de una diferencia de valores de función.

Particularmente preferida es una variante en la que al menos para algunas épocas temporales t_n , en particular épocas temporales posteriores t_n , en el paso b) y c), la obtención de la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$ y el análisis de componentes principales se realiza de manera recursiva, teniendo en cuenta autoparejas obtenidas para una época temporal previa para el mismo satélite i . Normalmente, para esta estrategia, una matriz "siguiente" $\mathbf{R}_{i,k+1}$ se expresa como una función de la matriz "previa" $\mathbf{R}_{i,k}$, y las autoparejas obtenidas antes para $\mathbf{R}_{i,k}$ se utilizan para calcular las autoparejas de $\mathbf{R}_{i,k+1}$. Esto acelera el cálculo de la matriz "siguiente" $\mathbf{R}_{i,k+1}$ (o de sus componentes) y/o de las autoparejas de la matriz de correlación "siguiente" $\mathbf{R}_{i,k+1}$ y reduce enormemente la cantidad de información que se debe almacenar en comparación con un cálculo "habitual" (en particular para épocas temporales posteriores t_n , es decir, en las que n es grande), y puede permitir en particular un cálculo de SQM_{i,n} "en tiempo real".

En un desarrollo ventajoso adicional de esta variante, en una expresión para calcular la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$ de manera recursiva, se aplica un factor de olvido τ , de tal manera que cuanto más antigua es una época temporal t_k , menos contribuye a la expresión para el cálculo de la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$, en particular en donde el factor de olvido realiza una ponderación exponencial con respecto al tiempo. De esta manera, se puede identificar un peso apropiado de los cambios recientes en la forma de la señal, incluso si el algoritmo se ha inicializado hace mucho tiempo.

Particularmente preferida es una variante del método en la cual al menos para algunas épocas temporales t_n , en particular para épocas temporales más tempranas t_n , en el paso c), se realiza el análisis de componentes principales para la respectiva matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$ para una pluralidad de épocas temporales t_k con $k=1 \dots n$ en común,

en particular donde $\mathbf{R}_{i,n}$ se calcula con $\mathbf{R}_{i,n} = 1/(n-1) * \mathbf{X}_{i,n}^T \mathbf{X}_{i,n}$, siendo n el número de épocas de medida desde la inicialización del algoritmo y siendo $\mathbf{X}_{i,n}^T$ la matriz traspuesta de $\mathbf{X}_{i,n}$. Para épocas temporales tempranas (es decir, en las que n es pequeño), un cálculo habitual (no recursivo) es relativamente sencillo de hacer.

En una variante preferida, en el paso a), los valores de medida respectivos $X_{m,i,k}$ se derivan de valores de función normalizados y con sesgo eliminado de las funciones de autocorrelación de las señales de código GNSS recibidas en los receptores GNSS, promediados para la multitud de los receptores GNSS. El cálculo del promedio de los valores de función es una manera particularmente simple de obtener una información combinada a partir de una multitud de receptores GNSS (y normalmente de todos los receptores GNSS) en un valor de índice de separación entre chips m . Obsérvese que, de forma alternativa, se pueden aplicar cálculos ponderados, por ejemplo, promedios de los valores de función al cuadrado o combinaciones de valores de función.

En una variante particularmente preferida, en el paso a), para formar los valores de medida $X_{m,i,k}$ del vector $\vec{X}_{i,k}$, los valores de función de la función de autocorrelación son sometidos a dicha eliminación de sesgo, teniendo en cuenta valores de función correspondientes de una función de autocorrelación que se producirían como resultado de una señal de código GNSS recibida en el receptor j afectada sólo por la deformación de señal esperada, en particular provocada por hardware del satélite y/o hardware del receptor y/o procesamiento de señal, obteniendo de este modo para cada receptor GNSS j un vector $\vec{p}_{i,j,k}$ de valores de diferencia $\bar{p}_{m,i,j,k}$ para cada época temporal t_k y para cada satélite i . Esto es sencillo de establecer en la práctica, y permite tener en cuenta particularidades de cada receptor. La eliminación de sesgo se realiza en base a valores de sesgo fijados, calibrados y configurados en base a valores de sesgo determinados de manera continua durante épocas temporales anteriores de funcionamiento libre de fallos.

En un desarrollo adicional de las dos variantes anteriores utilizadas en común, en el paso a), para formar los valores de medida $X_{m,i,k}$ del vector $\vec{X}_{i,k}$, se realiza dicho cálculo del promedio sobre un conjunto de al menos 2, preferiblemente al menos 5, lo más preferiblemente al menos 7, receptores GNSS sobre los valores de diferencia $\bar{p}_{m,i,j,k}$ del vector $\vec{p}_{i,j,k}$, obteniendo de esta manera un vector $\vec{p}_{i,k}$ de valores promediados $\bar{p}_{m,i,k}$. De esta manera, se puede obtener de una manera simple una información común acerca de las señales GNSS de la multitud de receptores GNSS.

En una modificación del desarrollo adicional anterior, en el paso a), para formar los valores de medida $X_{m,i,k}$ del vector $\vec{X}_{i,k}$, se realiza dicha normalización sobre el vector $\vec{p}_{i,k}$ de valores promediados $\bar{p}_{m,i,k}$ dividiendo los valores promediados $\bar{p}_{m,i,k}$ describiendo las desviaciones estándar 1-sigma σ_m de distribuciones normales gaussianas la distribución del ruido en el caso libre de fallos, obteniendo de esta forma los valores de medida $X_{m,i,k}$ del vector $\vec{X}_{i,k}$. Debido a la normalización de los valores de medida $X_{m,i,k}$ ya se considera la correlación nominal entre los valores de la función de autocorrelación. En caso de que la normalización se realizara directamente con los valores de la función de autocorrelación y después se realizara la combinación (como la diferencia) entre los valores de función de la función

de autocorrelación, la correlación nominal entre los valores de función no sería eliminada por el proceso de normalización y por tanto la métrica de prueba mostraría una pequeña desviación en condiciones libres de fallos.

Particularmente preferida es una variante en la que la matriz de correlación $R_{i,n}$ se construye sobre valores de función suavizados, donde el suavizado se logra mediante un proceso de reducción de ruido basado en filtrado paso bajo. El suavizado reduce la influencia de eventos singulares, los cuales normalmente no son provocados por un defecto del satélite. Obsérvese que, según esta variante, el suavizado se puede realizar antes o después de la eliminación de sesgo / de la combinación (en particular del cálculo del promedio) / de la normalización.

En una variante ventajosa del método, en el paso d), la matriz $PC_{i,n}$ se basa en todos los autovectores de $R_{i,n}$. De este modo, se puede lograr una integridad particularmente alta, es decir, resulta poco probable que queden sin detectar deformaciones de señal significativas. Obsérvese que, de forma alternativa, se pueden utilizar sólo una parte de los autovectores que tengan los mayores autovalores, reduciendo los esfuerzos de cálculo y acelerando de este modo el cálculo.

Más preferida es una variante en la que el índice de separación entre chips m contiene al menos 3 separaciones entre chips, preferiblemente al menos 5 separaciones entre chips. Dicho de otra manera, m va al menos de 1 a 3 o al menos de 1 a 5. Al número de separaciones entre chips ("posiciones") también se le denomina M . En general, con más separaciones entre chips, con mayor fiabilidad se puede lograr una detección de deformación de la señal (tanto con respecto a la integridad como con respecto a la continuidad).

Particularmente preferida es una variante en la que las separaciones entre chips de los valores de la función de autocorrelación utilizados para obtener la métrica de prueba se eligen de manera predominante en el lado tardío. Se ha encontrado que esto incrementa las prestaciones de detección, en comparación con una elección centrada o con una elección predominantemente en el lado temprano.

Es ventajosa una variante en la que en el paso e), si $SQM_{i,n}$ supera a THR en una época temporal t_n para el satélite i , la totalidad de señales de código GNSS recibidas en todos los receptores GNSS pertenecientes a señales de la misma frecuencia portadora enviadas por el mismo satélite i en varias épocas temporales consecutivas se consideran también inapropiadas para determinación de la posición debido a deformación de la señal del satélite. Esto incrementa la fiabilidad de la determinación de la posición y evita la inclusión en la determinación de la posición de señales de código GNSS para las cuales no se puede identificar deformación de la señal, pero el satélite desde el cual se origina la señal es todavía defectuoso y por lo tanto su señal no es digna de confianza.

También dentro del alcance de la presente invención está un conjunto de receptores GNSS, adaptados para realizar el método innovador descrito anteriormente. Este conjunto de receptores GNSS puede lograr una fiabilidad de determinación de la posición muy elevada, tanto para "integridad" como para "continuidad". Obsérvese que el conjunto de receptores GNSS tiene normalmente un dispositivo controlador común, el cual analiza los valores de función de las funciones de autocorrelación de estos receptores, y decide sobre el bloqueo de satélites particulares (o señales recibidas desde ellos) en el conjunto de receptores. Obsérvese que los receptores GNSS de un conjunto pueden pertenecer a un subsistema terrestre GBAS (sistema de aumentación basado en tierra), en particular para realizar operaciones de aproximación y aterrizaje CAT III, o a una estación terrestre SBAS (sistema de aumentación basado en satélites), en particular para Estaciones de Monitorización de Alcance e Integridad (RIMS) SBAS. Un conjunto de receptores puede incluir además un receptor o una pluralidad de receptores colocados en un tren en circulación o en múltiples trenes en circulación; se puede utilizar información de posición para identificar vías ocupadas y no ocupadas, en particular para señalización ferroviaria.

De la descripción y de los dibujos adjuntos se pueden extraer ventajas adicionales. Los rasgos mencionados anteriormente y a continuación se pueden utilizar según la invención de manera individual o colectiva en cualquier combinación. Las realizaciones mencionadas no se deben entender como enumeración exhaustiva, sino que más bien tienen carácter ejemplar para la descripción de la invención.

Dibujos

La invención se muestra en los dibujos.

La Figura 1 muestra una ilustración esquemática de un conjunto innovador de receptores y una multitud de satélites para uso en el método innovador;

la Figura 2 muestra una ilustración esquemática de una función de autocorrelación obtenida en un receptor GNSS, durante el método innovador, en una situación sin un defecto en el satélite;

la Figura 3 muestra un diagrama de flujo esquemático de una variante del método innovador.

1. Conjunto innovador de receptores GNSS

La Figura 1 ilustra en una vista esquemática un conjunto 5 de receptores GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) 1-4 que son operados según el método innovador.

En el ejemplo mostrado, dos receptores GNSS 1, 2 están situados en un primer tren 6 en circulación, a saber, en la parte delantera y en la parte final de dicho tren 6. En este caso otro receptor GNSS 3 está situado en un segundo tren 7 en circulación. Además, un receptor GNSS 4 está situado en una estación terrestre 8 inmóvil. Los receptores GNSS 1, 2, 3 se utilizan para determinación de la posición de los trenes 6, 7. Además, el receptor GNSS 4 (cuya posición es conocida y no variable) se utiliza para ayudar a la determinación de la posición en los otros receptores GNSS 1-3, en este caso proporcionando información de corrección acerca de trayectorias de satélite necesaria para la determinación de la posición en los otros receptores 1-3.

Una pluralidad de satélites 9-12, cuatro de los cuales se muestran aquí, orbitan en el espacio y envían, periódicamente, señales de código GNSS, denominadas aquí simplemente señales 13, 14. Las señales 13, 14 se reciben en los receptores GNSS 1-4, denominándose a las señales recibidas señales de código GNSS. El instante de su llegada a los respectivos receptores GNSS 1-4 se utiliza para obtener información de la posición, teniendo en cuenta las trayectorias conocidas de los satélites y los tiempos de transmisión conocidos, y aplicando una sincronización de los relojes de los receptores 1-4 y de los satélites 9-12. Obsérvese que, en general, en un receptor GNSS 1-4 son necesarias las señales 13, 14 de cuatro satélites 9-12 para obtener una información de posición completa (longitud, latitud, altitud), incluyendo un satélite a efectos de sincronización de tiempo. En aplicaciones ferroviarias, en las que los trenes sólo se pueden mover sobre vías férreas conocidas, dos satélites 9-12 pueden ser suficientes para determinación de la posición. Obsérvese que el GPS (sistema de posicionamiento global), con el cual se puede aplicar la invención, como sistema global de navegación por satélite típico, proporciona al menos veinticuatro satélites operativos en el espacio.

La señal 13, 14 es normalmente una señal portadora en forma de onda senoidal sobre la cual está modulada una señal de código binaria. El tiempo de llegada de una señal 13, 14 se determina normalmente por medio de una función de autocorrelación, la cual correlaciona la parte de código demodulada de la señal recibida 13, 14 con una señal de código de referencia (o señal de código GNSS de réplica) en separaciones entre chips discretas (o retrasos temporales discretos) diferentes en el receptor GNSS 1-4, y se puede suponer que el retraso temporal que conduce a un máximo de la función de autocorrelación indica el tiempo de llegada.

Cuando la parte de generación de señal de un satélite 9-12 está defectuosa, las señales 13, 14 enviadas pueden estar deformadas (corruptas), y las señales de código GNSS recibidas en los receptores 1-4 producen como resultado curvas de función de autocorrelación deformadas. Según la invención, los valores de la función de autocorrelación de todos los receptores 1-4 se analizan como se describe más adelante con mayor detalle, en donde informaciones acerca de señales de código GNSS del mismo satélite se combinan y se utilizan para determinar si la parte de generación de señales de código de este satélite funciona correctamente. Por medio de una métrica de prueba del monitor de calidad de la señal se decide si todas las señales de código GNSS recibidas desde este satélite en todos los receptores se incluyen en la determinación de la posición o se excluyen de la misma. A tal efecto, en este caso, los receptores de código GNSS proporcionan valores de la función de autocorrelación acerca de las señales de código GNSS recibidas a un dispositivo controlador 15 común, el cual analiza los valores de la función de autocorrelación e indica a los receptores 1-4 cuáles de los satélites 9-12 o de sus respectivas señales de código GNSS recibidas son apropiados en ese momento para determinación de la posición.

2. Función de autocorrelación

La Figura 2 muestra una curva típica de una función de autocorrelación observable ACF^{obs} (eje ascendente) para una señal de código GNSS recibida procedente de un satélite i en una época temporal (de medida) t_k particular en un receptor GNSS j en función de los chips o del retraso temporal (eje hacia la derecha). La función de autocorrelación ACF^{obs} es ondulada, y se desvía de la función de autocorrelación ideal ACF^{ideal} estrictamente triangular que se produciría como resultado si la señal de código GNSS recibida en el receptor GNSS no estuviera afectada por ninguna deformación de señal, en particular provocada por hardware del receptor, hardware del satélite y procesamiento de señal.

En la práctica, la función de autocorrelación observable ACF^{obs} se determina ("se mide") sólo en unas pocas separaciones entre chips discretas, compárese el índice de separación entre chips m . En el ejemplo mostrado, m va de 1 a 3, es decir, el número de posiciones de separación entre chips es $M=3$. Las posiciones de separación entre chips se eligen en este caso de forma predominante en el lado "tardío" (en el lado derecho del chip=0).

La función de autocorrelación observable ACF^{obs} se determina, durante la invención, en cada periodo de tiempo t_k para cada receptor GNSS j y para cada satélite i (para una frecuencia portadora particular) para una pluralidad de separaciones entre chips m , de modo que los valores de la función de autocorrelación observable se pueden indicar como $ACF^{obs}_{m,i,j,k}$. La función de autocorrelación ideal ACF^{ideal} es normalmente independiente del receptor GNSS y del periodo de tiempo t_k , pero dependiente de las características de autocorrelación de la secuencia de código de ruido pseudo-aleatorio que es emitida por el satélite i (véase [AD03]), de modo que los valores de la función de autocorrelación ideal se pueden indicar como $ACF^{ideal}_{m,i}$.

La información acerca de la deformación de la señal (y, por lo tanto, de posibles defectos del satélite) está incluida en la diferencia entre la función de autocorrelación observable y la función de autocorrelación ideal, con

$$p_{m,i,j,k} = ACF_{m,i,j,k}^{obs} - ACF_{m,i}^{ideal} \quad [E1]$$

Normalmente, un receptor GNSS proporciona dichos valores $p_{m,i,j,k}$ para un análisis más detallado, es decir, para uso como valores de la función de autocorrelación, según la invención. La resta de $ACF_{m,i}^{ideal}$ se realiza en este caso ya dentro del receptor GNSS, como un primer paso de una eliminación de sesgo. Sin embargo, obsérvese que, de forma alternativa, este primer paso de eliminación de sesgo también se puede realizar más tarde, en particular junto con las eliminaciones de sesgo adicionales.

En la Figura 2 mostrada, $ACF_{m,i,j,k}^{obs}$ sólo contiene componentes esperados, a saber, procedentes de la función de autocorrelación "ideal", $ACF_{m,i,j,k}^{ideal}$, procedentes del sesgo del receptor (véase $\mu_{m,j,k}$), procedentes del sesgo del satélite (véase $\text{satBias}_{m,i}$) y procedentes del ruido (de medida) térmico (véase $\eta_{m,i,j,k}$). Durante la invención, se pretende identificar deformaciones adicionales de la $ACF_{m,i,j,k}^{obs}$, es decir, deformaciones que van más allá de la deformación esperada según los componentes esperados, también denominadas "forma de onda maliciosa" (en inglés, "evil waveform") (véase más adelante).

3. Resumen del método innovador

El desarrollo del método innovador para operar una pluralidad de receptores GNSS se describe a modo de ejemplo a continuación y en correlación con la Figura 3.

Para una época temporal (de monitorización) t_n dada, compárese 100, los valores de la función de autocorrelación $p_{m,i,j,n}$ para un satélite i particular o para sus señales de código GNSS recibidas correspondientes, respectivamente, se determinan 110 en cada receptor $j=1, \dots, J$ (con J : cantidad de receptores GNSS que participan) para todas las separaciones entre chips $m=1, \dots, M$ consideradas (con M : número de separaciones entre chips consideradas). En el ejemplo mostrado, a los valores de la función de autocorrelación $p_{m,i,j,n}$ determinados ya se les ha eliminado el sesgo con respecto a la autocorrelación (triangular) ideal, como se describe en [E1], pero todavía contienen las deformaciones de señal debidas a hardware del receptor, hardware del satélite y procesamiento de señal.

Como un siguiente paso 120, los valores de la función de autocorrelación $p_{m,i,j,n}$ se preparan con mayor detalle, a saber, eliminando sesgos que queden debidos a hardware del receptor (compárese $\mu_{m,j,k}$ anterior), hardware del satélite (compárese $\text{satBias}_{m,i}$ anterior) y procesamiento de señal. A continuación, aparte de variaciones estadísticas como el ruido térmico, la única contribución remanente a la señal de autocorrelación con sesgo eliminado debería estar basada en la forma de onda maliciosa potencialmente presente. Además, se realiza un cálculo del promedio de los valores de la función de autocorrelación con sesgo eliminado para los J receptores que participan. Por último, se realiza una normalización, compensando los niveles de ruido térmico de varianza no unitaria de particularmente el componente $\eta_{m,i,j,k}$ de $ACF_{m,i,j,k}^{obs}$. Los valores de medida promediados y normalizados, con sesgo eliminado, resultantes, $X_{m,i,n}$, con varianza unidad, se pueden reescribir como el vector $\vec{X}_{i,n}$, yendo las entradas del vector desde $m=1$ hasta M .

A continuación en el paso 130, se determina una matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$, lo que implica p. ej. multiplicación matricial

de $\mathbf{X}_{i,n}^T$ y $\mathbf{X}_{i,n}$, en donde $\mathbf{X}_{i,n} = \begin{bmatrix} \vec{X}_{i,1} \\ \vdots \\ \vec{X}_{i,n} \end{bmatrix}$.

Aquí, los vectores $\vec{X}_{i,k}$ previos para $k < n$ se pueden obtener a partir de una lectura de un almacenamiento 140. El almacenamiento también proporciona $\mathbf{R}_{i,k}$ previos para $k < n$ que se pueden utilizar para calcular $\mathbf{R}_{i,n}$. Además, el almacenamiento almacena autovectores y autovalores de matrices de correlación $\mathbf{R}_{i,k}$ previas con $k < n$.

Como un siguiente paso 150, la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$ es sometida a un análisis de componentes principales (PCA) para obtener una matriz $\mathbf{P}_{i,n}$ de autovectores y una matriz $\mathbf{\Lambda}_{i,n}$ de autovalores, aplicando aquí una técnica recursiva utilizando matrices de correlación $\mathbf{R}_{i,k}$ previas, matrices de autovectores $\mathbf{P}_{i,k}$ previas y matrices de autovalores $\mathbf{\Lambda}_{i,n}$ previas.

Cabría destacar que $\vec{X}_{i,n}$, $\mathbf{R}_{i,n}$, $\mathbf{P}_{i,k}$ y $\mathbf{\Lambda}_{i,k}$ se almacenan para preparar la siguiente época temporal, compárense las líneas de puntos que conducen al almacenamiento 140.

Introduciendo al menos los dos autovectores con los mayores autovalores en una matriz de componentes principales $\mathbf{PC}_{i,n}$, se determina un vector $\vec{T}_{i,n} = \mathbf{PC}_{i,n}^T \cdot \vec{X}_{i,n}$, véase el paso 160.

A continuación se calcula una métrica de prueba del monitor de la calidad de la señal $\text{SQM}_{i,n}$, sumando los cuadrados de las entradas del vector de $\vec{T}_{i,n}$, compárese el paso 170.

A continuación se compara $\text{SQM}_{i,n}$ con un valor umbral THR predefinido, véase el paso 180. THR se elige de tal manera que se logre una integridad deseada, p. ej. de tal manera que la detección de una distorsión de señal que conduce a un error de determinación de la posición de más de 0,75 m falle con una probabilidad de 10^{-9} o menor. Como una característica del método innovador, gracias al análisis de componentes principales, la continuidad seguirá

siendo alta al mismo tiempo, es decir, la probabilidad de detectar falsamente una distorsión de la señal a pesar de que la señal sea correcta es baja, por ejemplo 10^{-9} o menor.

Si $SQM_{i,n} > THR$, el satélite i comprobado en ese momento se excluye de la determinación de la posición en los receptores GNSS al menos para la época temporal t_n presente, y preferiblemente también para varias épocas temporales futuras (o hasta que noticias externas difundan que el satélite i está funcionando bien de nuevo, p. ej. para GPS a través de NANUs (Aviso de Advertencia para los Usuarios de Navstar)), compárese el paso 190.

Si $SQM_{i,n} \leq THR$, el satélite i comprobado en ese momento se habilita (o permanece) para determinación de la posición en los receptores GNSS para la presente época temporal t_n , compárese el paso 200.

La rutina descrita se repite para todos los satélites que participan en el método, compárese el paso 210. Normalmente todos los satélites que están configurados para determinación de la posición de los receptores GNSS deberían ser comprobados en general.

Una vez que es evidente qué satélites pueden contribuir a la determinación de la posición de los receptores GNSS en la época temporal t_n , se puede realizar la determinación de la posición basada en las señales de código GNSS recibidas que se reciben en la época temporal t_n actual, véase el paso 220, utilizando señales de código GNSS recibidas procedentes de satélites permitidos, y no utilizando señales de código GNSS recibidas procedentes de satélites excluidos.

El método se repite a continuación para la siguiente época temporal con valor de índice $n+1$, compárese el paso 230.

4. Descripción del método innovador en su modo preferido

En lo que sigue, se proporciona una descripción más detallada para el desarrollo del método innovador a modo de ejemplo, en su modo preferido.

Caracterización de valores de la Función de Autocorrelación (ACF) medidos

El módulo funcional para las medidas del correlador de la Función de Autocorrelación (ACF) en bruto se puede describir mediante (compárese también de nuevo la Figura 2):

$$p_{m,i,j,k} = \mu_{m,j,k} + \text{satBias}_{m,i} + \eta_{m,i,j,k} (+ \text{EWF}_{m,i,j,k}) \quad [E2]$$

donde:

$p_{m,i,j,k}$ = valor de la función de autocorrelación, medido en el índice m de punto de separación entre chips de código PRN (ruido pseudo-aleatorio) discreto (con $m \in \{1, \dots, M \text{ y } M \geq 3\}$, donde M es el número de separaciones entre chips a lo largo de la función de autocorrelación (ACF)) para el satélite GNSS i en el receptor GNSS j para la época t_k ,

$\mu_{m,j,k}$ = estimación del sesgo del receptor en el índice m de punto de separación entre chips discreto en el receptor j para la época t_k ,

$\text{satBias}_{m,j}$ = sesgo del satélite relacionado con código PRN del satélite i en la m -ésima separación entre chips; determinado normalmente fuera de línea a partir de campañas de medida largas y configurado o determinado a continuación de manera continua en línea durante épocas de medida libres de fallos de deformación de la señal. El sesgo del satélite relacionado con código PRN también depende del hardware específico del Vehículo Satelital (SV). Los cambios de PRN a un Número de Vehículo Satelital (SVN) diferente se suelen producir cuando se reemplaza un satélite.

$\eta_{m,i,j,k}$ = ruido de medida en el índice m de separación entre chips para el satélite i en el receptor j para la época t_k ,

$\text{EWF}_{m,i,j,k}$ = error opcional de deformación de señal ("Forma de Onda Maliciosa") en el punto m para el satélite i en el receptor j para la época t_k . Una contribución de "Forma de Onda Maliciosa" se produce en caso de un defecto en un satélite, y esta contribución a los valores de la función de autocorrelación deberá ser detectada durante la invención, para evitar el uso de señales de código GNSS corruptas en la determinación de la posición.

La función de distribución de cada valor $p_{m,i,j,k}$ de la ACF del punto de separación entre chips a lo largo del tiempo se puede describir mediante funciones de distribución normal Gaussianas:

$$p_{m,i,j,k} \rightarrow N(\mu_{acf_{m,i,j,k}}, \sigma_{m,i,j,k}^2) \quad [E3]$$

donde:

m = índice del punto de medida de la ACF (con $m \in \{1, \dots, M\}$),

i = índice del satélite,

j = índice del receptor,

k = índice de la época temporal de medida,

5 $\mu_{acf,m,i,j,k}$ = valor medio de los valores de la ACF en el punto m de separación entre chips para el satélite i en el receptor j hasta la época temporal t_k ,

$\sigma_{m,i,j,k}$ = desviación estándar de los valores de la ACF en el punto m de separación entre chips para el satélite i en el receptor j hasta la época t_k ; virtualmente idéntica a la desviación estándar del ruido de medida $\eta_{m,i,j,k}$.

10 *Valores de entrada de caracterización deseados para el Análisis de Componentes Principales*

Para optimizar las propiedades estadísticas de la entrada al Análisis de Componentes Principales (PCA) descrito continuación, se lleva a cabo una eliminación de sesgo y normalización de los valores $p_{m,i,j,k}$ de la ACF para obtener conjuntamente datos de entrada distribuidos según una distribución normal estándar con media cero y varianza unidad:

$$X_{m,i,k}(p_{m,i,j,k}) \rightarrow N(0,1) \quad [E4]$$

15 donde:

$X_{m,i,k}(p_{m,i,j,k})$ = métrica normalizada, libre de sesgo, para el punto m de separación entre chips para el satélite i en la época t_k promediada para todos los receptores GNSS; función de $p_{m,i,j,k}$.

Preparación del valor de entrada: Eliminación de sesgo del satélite a partir de datos de medida de la ACF y suavizado con una constante de tiempo de filtro corta para reducción de ruido

20 En primer lugar, se elimina cualquier sesgo del satélite de las medidas de la ACF y el resultado libre de sesgo del satélite se suaviza (p. ej., a 30 segundos) para mitigar efectos relacionados con el multitrayecto. El suavizado (p. ej., a 30 segundos) representa un filtro paso bajo de primer orden y se realiza para reducir el ruido en las medidas de la ACF en bruto:

$$\bar{p}_{m,i,j,k} = \frac{k_{30}-1}{k_{30}} \cdot p_{m,i,j,k-1} + \frac{1}{k_{30}} \cdot (p_{m,i,j,k} - \text{satBias}_{m,i}) \quad [E5]$$

25 donde:

$\bar{p}_{m,i,j,k}$ = valor de la ACF suavizada en un punto m (con $m \in \{1, \dots, M\}$ y $M \geq 3$) para el satélite i en el receptor j para la época t_k ,

k_{30} = constante de tiempo de filtro de ejemplo de 30, que aumenta de 1 a 30 para las 30 épocas iniciales y que a continuación permanece constante,

30 $\text{satBias}_{m,i}$ = sesgo del satélite relacionado con código PRN del satélite i en el m-ésimo punto de separación entre chips; determinado fuera de línea a partir de campañas de medidas largas y configurado a continuación.

Preparación del valor de entrada: determinación del sesgo de medida de la ACF específico del receptor GNSS por medio de suavizado de estimaciones del sesgo del receptor libre de sesgo del satélite con una constante de tiempo del filtro larga

35

Las medidas de la ACF libres de sesgo pero no suavizadas del satélite también se utilizan para determinar estimaciones del sesgo del receptor GNSS, las cuales se suavizan con una constante de tiempo del filtro larga (de aproximadamente por ejemplo 1000 s) para evitar variaciones a corto plazo como el ruido al mismo tiempo que se preservan variaciones a largo plazo como las derivas:

$$\mu_{m,j,k} = \frac{k_{1000}-1}{k_{1000}} \cdot \mu_{m,j,k-1} + \frac{1}{k_{1000}} \cdot \frac{1}{N_{\text{sat}}} \cdot \sum_{i=1}^{N_{\text{sat}}} (p_{m,i,j,k} - \text{satBias}_{m,i}) \quad [E6]$$

40

donde:

$\mu_{m,j,k}$ = estimación del sesgo del receptor en el punto m de separación entre chips en el receptor j para la época t_k ,

$\rho_{m,i,j,k}$ = valor de la medida de la ACF en bruto en el punto m para el satélite i en el receptor j para la época t_k ,

k_{1000} = constante de tiempo del filtro de ejemplo de 1000, que aumenta de 1 a 1000 para las 1000 épocas iniciales y que a continuación permanece constante,

5 N_{sat} = número de satélites, que cumplen las siguientes condiciones:

1. El satélite es visible, con elevación por encima de 5° y está “sano” en este receptor en la época temporal t_k ,
2. En la época temporal previa t_{k-1} el satélite no fue objeto de una detección de deformación de la señal.

10 El número de satélites que cumplen estas condiciones debe ser al menos 1, pero debería ser preferiblemente ≥ 5 , en caso contrario el sesgo del receptor no se actualiza en este ejemplo. La condición 2) se utiliza para evitar cualquier falsificación relacionada con forma de onda maliciosa (EWF) de las estimaciones del sesgo del receptor.

15 En caso de que el conjunto de satélites disponibles sea suficientemente grande, el satélite i que deberá ser monitorizado en busca de una presencia de deformaciones de la señal se puede excluir opcionalmente del cálculo de $\mu_{m,j,k}$.

Preparación del valor de entrada: Cálculo de diferencias de la estimación del sesgo del receptor GNSS entre épocas de medida t_k consecutivas

El algoritmo PCA utilizado en este ejemplo no necesita las estimaciones del sesgo del receptor reales sino sus diferencias entre épocas temporales consecutivas:

$$20 \quad \Delta\mu_{m,j,k} = \mu_{m,j,k} - \mu_{m,j,k-1} \quad [E7]$$

Las razones para esto se explicarán más adelante. Si las estimaciones del sesgo del receptor no se actualizan debido a que $N_{sat} < 4$ en [E6], entonces las diferencias de sesgo se convierten en cero.

Preparación del valor de entrada: eliminación de sesgo del receptor GNSS a partir de datos de medida de la ACF suavizados, libres de sesgo, del satélite

25 Los datos de medida libres de sesgos del satélite, suavizados (p. ej., a 30 segundos) de [E5] se convierten en datos de medida libres de sesgo del receptor restando las correspondientes estimaciones de [E6]:

$$\bar{p}_{m,i,j,k} = \bar{p}_{m,i,j,k} - \mu_{m,j,k} \quad [E8]$$

Se supone ahora que los datos de medida están libres de sesgo y centrados en cero.

30 *Preparación del valor de entrada: Cálculo del promedio de los datos de medida de la ACF libre de sesgo y diferencias de sesgo del receptor para todos los receptores GNSS*

A continuación, se promedian las diferencias de sesgo del receptor y los datos de medida libres de sesgo suavizados para todos los receptores válidos:

$$\Delta\mu_{m,i,k} = \frac{1}{N_{Rx,i}} \cdot \sum_{j=1}^{N_{Rx,i}} \Delta\mu_{m,j,k} \quad [E9]$$

$$\bar{p}_{m,i,k} = \frac{1}{N_{Rx,i}} \cdot \sum_{j=1}^{N_{Rx,i}} \bar{p}_{m,i,j,k} \quad [E10]$$

35 donde:

$N_{Rx,i}$ = número de receptores, para los cuales están disponibles datos de medida de la ACF libres de sesgos y suavizados $\bar{p}_{m,i,j,k}$ válidos para el satélite i.

El número mínimo de receptores es 2; de lo contrario no se lleva a cabo ningún análisis de componentes principales para este satélite.

40 *PASO OPCIONAL – Preparación del valor de entrada: Combinación de valores de la ACF procedentes de puntos de separación entre chips diferentes*

Las métricas promediadas de [E9] y [E10] se pueden utilizar a continuación para combinar diferentes puntos de separación entre chips unos con otros, p. ej. formando diferencias entre dos puntos de separación entre chips vecinos:

$$\Delta\mu_{m,i,k} = \Delta\mu_{m+1,i,k} - \Delta\mu_{m,i,k} \quad [E11]$$

$$\bar{\bar{p}}_{m,i,k} = \bar{\bar{p}}_{m+1,i,k} - \bar{\bar{p}}_{m,i,k} \quad [E12]$$

- 5 Nota: Se adopta aquí una notación *in-place* de los parámetros (lo que significa que la misma variable aparece a ambos lados del signo de igualdad) como la utilizada en lenguajes de programación, de modo que ignorando esta sección todo el algoritmo sigue siendo válido para el caso en que no se utiliza este paso.

Preparación del valor de entrada: Normalización de datos de medida libres de sesgo

- 10 Para garantizar varianza unidad de los datos de medida libres de sesgo y centrados en cero, los datos se normalizan mediante la desviación estándar de una distribución Gaussiana que caracteriza el ruido de los datos de medida:

$$X_{m,i,k} = \frac{\bar{\bar{p}}_{m,i,k}}{\sigma_m(el_{i,k})} \quad [E13]$$

donde:

$el_{i,k}$ = ángulo de elevación del satélite i en la época t_k ,

- 15 $\sigma_m(el)$ = desviación estándar dependiente de la elevación de las medidas suavizadas y libres de sesgo del m -ésimo punto de separación entre chips de la ACF (u OPCIONALMENTE de la pareja de punto de separación entre chips); determinada fuera de línea a partir de campañas de medida largas y configurada a continuación.

Se supone ahora que los datos $X_{m,i,k}$ se comportan como variables aleatorias Gaussianas que siguen una distribución normal estándar $N(0,1)$ en ausencia de un fallo de deformación de señal en el satélite i .

- 20 Teniendo en cuenta [E8], [E13] se puede expresar en notación vectorial como

$$\begin{aligned} \vec{X}_{i,k} = \{X_{m,i,k}\} &= \begin{bmatrix} \frac{\bar{\bar{p}}_{1,i,k}}{\sigma_1(el_{i,k})} & \dots & \frac{\bar{\bar{p}}_{M,i,k}}{\sigma_M(el_{i,k})} \end{bmatrix} \\ &= [\bar{p}_{1,i,k} - \mu_{1,i,k} \quad \dots \quad \bar{p}_{M,i,k} - \mu_{M,i,k}] \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1(el_{i,k})} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_M(el_{i,k})} \end{bmatrix} \\ &= [\bar{p}_{1,i,k} - \mu_{1,i,k} \quad \dots \quad \bar{p}_{M,i,k} - \mu_{M,i,k}] \cdot \Sigma^{-1} \\ &= [\vec{\bar{p}}_{i,k} - \vec{\mu}_{i,k}] \cdot \Sigma^{-1} \end{aligned} \quad [E14]$$

Algoritmo PCA – técnica explícita

- 25 En la técnica explícita (no recursiva), el PCA funciona por lotes lo que significa que todos los datos normalizados desde el inicio del proceso se utilizan para determinar los componentes principales por medio de la matriz de correlación o covarianza $\mathbf{R}_{i,n}$ de todo el conjunto de datos (es decir, el PCA de la matriz $\mathbf{R}_{i,n}$ se realiza para una pluralidad de épocas temporales t_k con $k=1 \dots n$ en común). La técnica explícita se utiliza normalmente para una etapa temprana del método innovador, es decir, para n bajo. La descomposición propia de esta matriz $\mathbf{R}_{i,n}$ se puede utilizar a continuación para un análisis de componentes principales:

$$\mathbf{R}_{i,n} = \frac{1}{n-1} \cdot \mathbf{X}_{i,n}^T \cdot \mathbf{X}_{i,n} = \frac{1}{n-1} \cdot \mathbf{X}_{i,n}^T \cdot \begin{bmatrix} \vec{X}_{i,1} \\ \vdots \\ \vec{X}_{i,n} \end{bmatrix} = \mathbf{P}_{i,n} \cdot \mathbf{\Lambda}_{i,n} \cdot \mathbf{P}_{i,n}^T \quad [E15]$$

- 30 donde:

n = número de épocas de medida desde la inicialización del algoritmo,

- $\mathbf{X}_{i,n}$ = datos normalizados para el punto m de la ACF y el satélite i en la época temporal de medida t_k con $k = 1, \dots, n$,
- $\mathbf{P}_{i,n}$ = matriz octogonal que contiene los autovectores de $\mathbf{R}_{i,n}$ de modo que se cumple $\mathbf{P}^T = \mathbf{P}^{-1}$,
- $\mathbf{\Delta}_{i,n}$ = matriz diagonal que contiene los autovalores de $\mathbf{R}_{i,n}$. Cada autovector en $\mathbf{P}_{i,n}$ forma una autopareja con el autovalor de la misma columna en $\mathbf{\Delta}_{i,n}$.

Dado que en el presente caso los datos están escalados a varianza unidad, se utiliza la matriz de correlación.

Algoritmo PCA – derivación de la técnica recursiva

En un entorno en tiempo real esta técnica por lotes es desventajosa ya que se tendría que almacenar una enorme cantidad de datos de muestra, al menos para n mayor. Por consiguiente, en etapas posteriores del método innovador, es decir, para n grande, se aplica un PCA recursivo. Una actualización de la matriz de correlación recursiva apropiada para la invención se describe más adelante. Obsérvese que un PCA recursivo se describe en [RD01] y en [RD02].

En una consideración por lotes, para la matriz de correlación es necesario tener en cuenta la serie temporal completa desde el inicio del proceso desde t_1 hasta t_{k+1} (con $n = k+1$):

$$\begin{aligned}
 \mathbf{X}_{i,n} = \mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k+1} &= \begin{bmatrix} \vec{x}_{i,1} \\ \vdots \\ \vec{x}_{i,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{p}_{i,1} & -\vec{\mu}_{i,k+1} \\ \vdots & \vdots \\ \vec{p}_{i,k+1} & -\vec{\mu}_{i,k+1} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{\Sigma}^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} \vec{p}_{i,1} \\ \vdots \\ \vec{p}_{i,k} \\ \vec{p}_{i,k+1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \vec{\mu}_{i,k+1} \\ \vdots \\ \vec{\mu}_{i,k+1} \\ \vec{\mu}_{i,k+1} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{\Sigma}^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} \vec{p}_{i,1} - \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \vec{\mu}_{i,k+1} \\ \vec{p}_{i,k+1} - \vec{\mu}_{i,k+1} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{\Sigma}^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} \vec{p}_{i,1} - \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \vec{\mu}_{i,k} - \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \\ \vec{p}_{i,k+1} - \vec{\mu}_{i,k+1} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{\Sigma}^{-1} \\
 &= \begin{bmatrix} \left(\vec{p}_{i,1} - \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \vec{\mu}_{i,k} \right) \cdot \mathbf{\Sigma}^{-1} - \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \cdot \mathbf{\Sigma}^{-1} \\ \left(\vec{p}_{i,k+1} - \vec{\mu}_{i,k+1} \right) \cdot \mathbf{\Sigma}^{-1} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k} - \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \cdot \mathbf{\Sigma}^{-1} \\ \vec{x}_{i,k+1} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

[E16]

donde:

- $n = k+1$ = número de conjuntos de muestra (es decir, épocas temporales de medida) desde la época temporal t_1 hasta t_{k+1} ,
- $\vec{\mu}_{i,k+1} = \vec{\mu}_{i,k} + \Delta \vec{\mu}_{i,k+1}$ = vector $1 \times M$ de estimaciones del sesgo del receptor determinado para la serie temporal completa,

Σ^{-1} = matriz diagonal MxM de desviaciones estándar inversas determinada para la serie temporal completa.

Según [E15], la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,k+1}$ de la serie temporal $\mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k+1}$ se proporciona entonces como:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{i,k+1} &= \frac{1}{n_{k+1} - 1} \cdot \mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k+1}^T \cdot \mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k+1} \\ &= \frac{1}{n_{k+1} - 1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k} - \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \cdot \Sigma^{-1} \\ \vec{X}_{i,k+1} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k} - \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \cdot \Sigma^{-1} \\ \vec{X}_{i,k+1} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{n_{k+1} - 1} \cdot \left[\mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k}^T \cdot \mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k} + \Sigma^{-1} \xrightarrow{\Delta \mu_{i,k+1}} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \Sigma^{-1} \right. \\ &\quad \left. - \Sigma^{-1} \xrightarrow{\Delta \mu_{i,k+1}} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}^T \mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k} - \mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k}^T \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\Delta \mu_{i,k+1}} \Sigma^{-1} + \vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1} \right] \end{aligned} \quad [E17]$$

5 donde:

n_{k+1} = $k+1$ = número de conjuntos de muestras (es decir, épocas temporales de medida) desde la época temporal t_1 hasta t_{k+1} .

Esta ecuación se puede simplificar debido a la siguiente condición secundaria:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}^T \mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k} &= \sum_{n=1}^k \left(\begin{matrix} \rightarrow \\ \vec{p}_{i,n} \end{matrix} \begin{matrix} \rightarrow \\ \mu_{i,k} \end{matrix} \right) \cdot \Sigma^{-1} \\ &= \left(\sum_{n=1}^k \begin{matrix} \rightarrow \\ \vec{p}_{i,n} \end{matrix} - k \cdot \begin{matrix} \rightarrow \\ \mu_{i,k} \end{matrix} \right) \cdot \Sigma^{-1} \\ &= \left(\sum_{n=1}^k \begin{matrix} \rightarrow \\ \vec{p}_{i,n} \end{matrix} - k \cdot \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k \begin{matrix} \rightarrow \\ \vec{p}_{i,n} \end{matrix} \right) \cdot \Sigma^{-1} = \vec{0} \end{aligned} \quad [E18]$$

10 Utilizando esta condición, [E17] se simplifica a

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{i,k+1} &= \frac{1}{n_{k+1} - 1} \cdot [\mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k}^T \cdot \mathbf{X}_{i,1 \rightarrow k}] + \frac{1}{n_{k+1} - 1} \\ &\quad \cdot \left[\Sigma^{-1} \Delta \vec{\mu}_{i,k+1}^T \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \Sigma^{-1} \right] + \frac{1}{n_{k+1} - 1} \\ &\quad \cdot [\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1}] \end{aligned} \quad [E19]$$

La utilización de una notación recursiva introduciendo $\mathbf{R}_{i,k}$ conduce a:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{i,k+1} &= \frac{n_k - 1}{n_{k+1} - 1} \cdot \mathbf{R}_{i,k} + \frac{n_k}{n_{k+1} - 1} \cdot [\Sigma^{-1} \Delta \vec{\mu}_{i,k+1}^T \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \Sigma^{-1}] \\ &\quad + \frac{1}{n_{k+1} - 1} \cdot [\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1}] \end{aligned} \quad [E20]$$

Utilizando el hecho de que en el caso de uso presente se cumple $n_{k+1} = n_k + 1$ (dado que $n_{k+1} = k+1$ y $n_k = k$), se obtiene:

$$\mathbf{R}_{i,k+1} = \frac{n_k - 1}{n_k} \cdot \mathbf{R}_{i,k} + \left[\mathbf{\Sigma}^{-1} \Delta \vec{\mu}_{i,k+1}^T \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \mathbf{\Sigma}^{-1} \right] + \frac{1}{n_k} \cdot \left[\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1} \right] \quad [\text{E21}]$$

La inserción de la sustitución

$$\tau = \frac{1}{n_k} \quad [\text{E22}]$$

en [E21] produce:

$$\mathbf{R}_{i,k+1} = (1 - \tau) \cdot \mathbf{R}_{i,k} + \left[\mathbf{\Sigma}^{-1} \Delta \vec{\mu}_{i,k+1}^T \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \mathbf{\Sigma}^{-1} \right] + \tau \cdot \left[\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1} \right] \quad [\text{E23}]$$

Permitir ahora que el valor de τ se desvíe de su definición original de [E22] configurándolo a un valor fijo introduce un denominador factor de olvido. Esto significa que datos más antiguos resultan ignorados exponencialmente. τ se puede elegir por ejemplo para que sea 1/60, es decir, en línea con la constante temporal de suavizado en [E5]. Debido al factor de olvido introducido, el periodo de tiempo para el cual los datos de medida tienen un impacto sobre la matriz de correlación está limitado y se puede suponer que las desviaciones estándar (que se configuran) son constantes a lo largo de este periodo de tiempo ya que el ángulo de elevación no cambia mucho en este periodo de tiempo.

Suponiendo que a partir de la época t_k previa los componentes principales de la matriz de correlación simétrica $\mathbf{R}_{i,k}$ son conocidos:

$$\mathbf{R}_{i,k} = \mathbf{P}_{i,k} \mathbf{\Lambda}_{i,k} \mathbf{P}_{i,k}^T = [\vec{v}_{1,i,k} \quad \dots \quad \vec{v}_{M,i,k}] \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{1,i,k} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_{M,i,k} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}_{i,n}^T \quad [\text{E24}]$$

donde:

$\mathbf{P}_{i,k}$ = matriz octogonal que contiene por columnas los autovectores $\vec{v}_{m,i,k}$ de $\mathbf{R}_{i,k}$ de modo que se cumple $\mathbf{P}_{i,k}^T = \mathbf{P}_{i,k}^{-1}$,

$\mathbf{\Lambda}_{i,k}$ = matriz diagonal que contiene los autovalores $\lambda_{m,i,k}$ de $\mathbf{R}_{i,k}$.

En t_{k+1} la situación se puede expresar mediante:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{i,k+1} &= \mathbf{P}_{i,k+1} \cdot \mathbf{\Lambda}_{i,k+1} \cdot \mathbf{P}_{i,k+1}^T \quad [\text{E25}] \\ &= (1 - \tau) \cdot \mathbf{R}_{i,k} + \left[\mathbf{\Sigma}^{-1} \Delta \vec{\mu}_{i,k+1}^T \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \mathbf{\Sigma}^{-1} \right] + \tau \cdot \left[\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1} \right] \\ &= (1 - \tau) \cdot \mathbf{P}_{i,k} \cdot \mathbf{\Lambda}_{i,k} \cdot \mathbf{P}_{i,k}^T + \left[\mathbf{\Sigma}^{-1} \Delta \vec{\mu}_{i,k+1}^T \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \mathbf{\Sigma}^{-1} \right] + \tau \cdot \left[\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1} \right] \\ &= \mathbf{P}_{i,k} \cdot \left[(1 - \tau) \cdot \mathbf{\Lambda}_{i,k} + \mathbf{P}_{i,k}^T \left[\mathbf{\Sigma}^{-1} \Delta \vec{\mu}_{i,k+1}^T \Delta \vec{\mu}_{i,k+1} \mathbf{\Sigma}^{-1} \right] \mathbf{P}_{i,k} \right] \cdot \mathbf{P}_{i,k}^T + \tau \cdot \left[\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1} \right] \\ &= \mathbf{P}_{i,k} \cdot \left[(1 - \tau) \cdot \mathbf{\Lambda}_{i,k} + \vec{\mu}_{i,k} \cdot \vec{\mu}_{i,k}^T \right] \cdot \mathbf{P}_{i,k}^T + \tau \cdot \left[\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1} \right] \end{aligned}$$

donde:

$$\vec{\mu}_{i,k} = \mathbf{P}_{i,k}^T \cdot \Sigma^{-1} \cdot \Delta \vec{\mu}_{i,k+1}^T \quad [\text{E26}]$$

Para el término $(1 - \tau) \cdot \Lambda_{i,k} + \vec{\mu}_{i,k} \cdot \vec{\mu}_{i,k}^T$ en [E25] se puede llevar a cabo una descomposición propia obteniendo la matriz de autovectores $\mathbf{P}'_{i,k}$ y la matriz de autovalores $\Lambda'_{i,k}$ como se describe en [RD02] y [RD03]:

$$(1 - \tau) \cdot \Lambda_{i,k} + \frac{\vec{\mu}_{i,k} \cdot \vec{\mu}_{i,k}^T}{|\vec{\mu}_{i,k}|^2} = \mathbf{P}'_{i,k} \cdot \Lambda'_{i,k} \cdot \mathbf{P}'_{i,k}{}^T \quad [\text{E27}]$$

5 La inserción de esta descomposición en [E25] produce:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{i,k+1} &= \mathbf{P}_{i,k} \cdot \left[\mathbf{P}'_{i,k} \cdot \Lambda'_{i,k} \cdot \mathbf{P}'_{i,k}{}^T \right] \cdot \mathbf{P}_{i,k}^T + \tau \cdot \left[\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1} \right] \\ &= \mathbf{P}_{i,k} \cdot \left[\mathbf{P}'_{i,k} \cdot \Lambda'_{i,k} \cdot \mathbf{P}'_{i,k}{}^T + \tau \cdot \mathbf{P}_{i,k}^T \left[\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1} \right] \mathbf{P}_{i,k} \right] \cdot \mathbf{P}_{i,k}^T \\ &= \mathbf{P}_{i,k} \cdot \mathbf{P}'_{i,k} \cdot \left[\Lambda'_{i,k} + \tau \cdot \mathbf{P}'_{i,k}{}^T \cdot \mathbf{P}_{i,k}^T \left[\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1} \right] \mathbf{P}_{i,k} \cdot \mathbf{P}'_{i,k} \right] \cdot \mathbf{P}'_{i,k}{}^T \\ &\quad \cdot \mathbf{P}_{i,k}^T \\ &= \mathbf{P}_{i,k}'' \cdot \left[\Lambda'_{i,k} + \tau \cdot \mathbf{P}_{i,k}''{}^T \left[\vec{X}_{i,k+1}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1} \right] \mathbf{P}_{i,k}'' \right] \cdot \mathbf{P}_{i,k}''{}^T \\ &= \mathbf{P}_{i,k}'' \cdot \left[\Lambda'_{i,k} + \tau \cdot \vec{Z}_{i,k} \cdot \vec{Z}_{i,k}^T \right] \cdot \mathbf{P}_{i,k}''{}^T \end{aligned} \quad [\text{E28}]$$

donde:

$$\mathbf{P}_{i,k}'' = \mathbf{P}_{i,k} \cdot \mathbf{P}'_{i,k} \quad [\text{E29}]$$

10 y

$$\vec{Z}_{i,k} = \mathbf{P}_{i,k+1}''{}^T \cdot \vec{X}_{i,k+1}^T \quad [\text{E30}]$$

Para el término $\Lambda'_{i,k} + \tau \cdot \vec{Z}_{i,k} \cdot \vec{Z}_{i,k}^T$ en [E28] se puede llevar a cabo una descomposición propia obteniendo la matriz de autovectores $\mathbf{P}'''_{i,k}$ y en la matriz de autovalores $\Lambda_{i,k+1}$ como se describe en [RD02] y [RD03]:

$$\Lambda'_{i,k} + \tau \cdot \frac{\vec{Z}_{i,k} \cdot \vec{Z}_{i,k}^T}{|\vec{Z}_{i,k}|^2} = \mathbf{P}'''_{i,k} \cdot \Lambda_{i,k+1} \cdot \mathbf{P}'''_{i,k}{}^T \quad [\text{E31}]$$

15 La inserción de esta descomposición en [E28] produce:

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{i,k+1} &= \mathbf{P}_{i,k}'' \cdot \left[\mathbf{P}'''_{i,k} \cdot \Lambda_{i,k+1} \cdot \mathbf{P}'''_{i,k}{}^T \right] \cdot \mathbf{P}_{i,k}''{}^T \\ &= \mathbf{P}_{i,k}'' \cdot \mathbf{P}'''_{i,k} \cdot \Lambda_{i,k+1} \cdot \mathbf{P}'''_{i,k}{}^T \cdot \mathbf{P}_{i,k}''{}^T \\ &= \mathbf{P}_{i,k+1} \cdot \Lambda_{i,k+1} \cdot \mathbf{P}_{i,k+1}^T \end{aligned} \quad [\text{E32}]$$

donde:

$$\mathbf{P}_{i,k+1} = \mathbf{P}_{i,k}'' \cdot \mathbf{P}'''_{i,k} \quad [\text{E33}]$$

20 Este último paso completa la transición del proceso de descomposición propia inicialmente explícito de la matriz de correlación $\mathbf{R}$ a un proceso recursivo.

Algoritmo PCA: Técnica recursiva

La transformación PCA se implementa como un algoritmo recursivo y se realiza de tal manera que:

- Variables de entrada potencialmente correlacionadas se transforman en variables de salida ortogonales, no correlacionadas.
- 5 • Las variables de salida se ordenan según su varianza de tal manera que el primer componente principal tenga la mayor varianza posible.

Utilizando las fórmulas del paso previo expuesto anteriormente, las autoparejas – contenidas en la combinación de matriz de autovectores ortogonal $\mathbf{P}_{i,k+1}$ y matriz de autovalores diagonal $\mathbf{\Lambda}_{i,k+1}$ – se pueden actualizar de una manera interactiva utilizando las autoparejas de la época t_k previa (es decir, $\mathbf{P}_{i,k}$ y $\mathbf{\Lambda}_{i,k}$) y las métricas $\bar{\mathbf{X}}_{i,k+1}$ y $\Delta\bar{\mu}_{i,k+1}$ de la época t_{k+1} actual.

Algoritmo PCA: Descomposición propia inicial para la técnica recursiva

Para que el algoritmo recursivo funcione es necesaria una descomposición propia ortogonal inicial de la matriz de correlación $\mathbf{R}$ en la época t_1 :

$$\mathbf{R}_{i,1} = \mathbf{P}_{i,1} \cdot \mathbf{\Lambda}_{i,1} \cdot \mathbf{P}_{i,1}^T \quad [\text{E34}]$$

Esta descomposición propia inicial se puede hacer por lotes para una pluralidad de épocas temporales iniciales o fuera de línea a partir de un conjunto largo de medidas libres de fallos de deformación de la señal y configurado a continuación.

Algoritmo PCA: Determinación de métrica de prueba del monitor de deformación de la señal SQM (Monitor de Calidad de la Señal) a partir de componentes principales

Utilizando la matriz de componentes principales $\mathbf{PC}$ (también llamada matriz de carga) en forma de los M autovectores $\bar{\mathbf{v}}_{m,i,k+1}$ (con $m = 1, \dots, M$) de $\mathbf{P}_{i,k+1}$, clasificados de grande a pequeño en base a sus autovalores $\lambda_{m,i,k+1}$ correspondientes, el vector de medida normalizado y con sesgo eliminado en la época t_{k+1} , es decir, $\bar{\mathbf{X}}_{i,k+1}$ se puede transformar del espacio original de variables a un nuevo espacio de variables, que no están correlacionadas sobre el conjunto de datos en el caso libre de fallos de deformación de la señal:

$$\bar{\mathbf{T}}_{i,k+1} = \mathbf{PC}_{i,k+1}^T \cdot \bar{\mathbf{X}}_{i,k+1}^T = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{v}}_{largest,i,k+1}^T \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{v}}_{smallest,i,k+1}^T \end{bmatrix} \cdot \bar{\mathbf{X}}_{i,k+1}^T \quad [\text{E35}]$$

Sin embargo, no es necesario mantener necesariamente todos los componentes principales. Es posible realizar una reducción de dimensionalidad manteniendo sólo unos pocos de los primeros componentes principales mayores.

La métrica de prueba del monitor de deformación de la señal SQM en la época t_{k+1} se determina finalmente como suma de cuadrados de las entradas del vector $\bar{\mathbf{T}}_{i,k+1}$, donde $\bar{\mathbf{T}}_{i,k+1}$ se ha determinado utilizando todos los M componentes principales o al menos aquellos con los dos mayores autovalores:

$$\text{SQM}_{i,k+1} = \bar{\mathbf{T}}_{i,k+1}^T \cdot \bar{\mathbf{T}}_{i,k+1} = \bar{\mathbf{X}}_{i,k+1}^T \cdot \mathbf{PC}_{i,k+1} \cdot \mathbf{PC}_{i,k+1}^T \cdot \bar{\mathbf{X}}_{i,k+1} \quad [\text{E36}]$$

La métrica de prueba $\text{SQM}_{i,k+1}$ sigue una distribución χ^2 e indica la desviación absoluta de las nuevas muestras con respecto a la condición nominal.

Decisión de prueba del Monitor de Calidad de la Señal (SQM)

Dado que el estadístico de prueba SQM sigue una distribución χ^2 , la prueba del monitor de deformación de la señal es una prueba unilateral.

Si el estado del satélite antes de la monitorización de la deformación de la señal es OK y se cumple la siguiente desigualdad

$$\text{SQM}_{i,n} > \text{THR} \quad [\text{E37}]$$

donde:

$\text{SQM}_{i,n}$ = métrica de prueba del monitor de calidad de la señal para el satélite i en la época temporal de medida t_n ,

THR = el umbral del monitor predefinido.

se determina que las señales de código del satélite i recibidas en todos los receptores GNSS son inapropiadas para determinación de la posición y se excluyen.

5. Conclusión

5 En conclusión, la presente invención propone una métrica de prueba para señales de código GNSS recibidas en receptores GNSS, en donde, para cada satélite i , una señal enviada por el satélite i es recibida en los diferentes receptores GNSS, y su sesgo eliminado, promediada para los receptores, y valores de medida normalizados se derivan de valores de la función de autocorrelación a partir de las señales de código GNSS recibidas, en donde una matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$ se construye a partir de una matriz $\mathbf{X}_{i,n}$ que contiene los valores de medida en la forma de vectores $\vec{X}_{i,k+1}$ de valores de medida de la época temporal presente t_n y de épocas temporales t_k previas con $k=1, \dots, n-1$, en donde se realiza un análisis de componentes principales de la matriz $\mathbf{R}_{i,n}$, en donde se calcula un vector transformado $\vec{X}_{i,n} = \mathbf{PC}_{i,n}^T \cdot \vec{X}_{i,n}$, conteniendo $\mathbf{PC}_{i,n}$ al menos dos autovectores pertenecientes a la autoparejas que tienen los mayores autovalores de todas las autoparejas, en donde una métrica de prueba del monitor de calidad de la señal $\text{SQM}_{i,n}$ se construye a partir de la suma de cuadrados de las entradas del vector transformado $\vec{T}_{i,n}$, y en donde si $\text{SQM}_{i,n}$ supera a un umbral THR, las señales del satélite i se deshabilitan para determinación de la posición en todos los receptores GNSS. La invención permite monitorizar señales de código GNSS con respecto a deformación de la señal del satélite con una integridad y continuidad mejoradas.

6. Referencias

- 20 [AD01] ICAO Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation – Aeronautical Telecommunications, Volume I, Radio Navigation Aids, (incluido el Amendment 89) . 999 University Street, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7, Noviembre de 2012
- [AD02] Akos, D. M. Phelts, R. E., Mitelman, A., Pullen, S., y Enge, P., “GPS-SPS Signal Quality Monitoring (SQM),” Position, Location and Navigation Symposium, Conference Proceedings Addendum, 2000 IEEE, San Diego, CA, Marzo de 2000.
- 25 [AD03] Mitelman, A. M., Phelts, R. E., Akos, D. M., Pullen, S. P., y Enge, P. K., “Signal Deformations on Nominally Healthy GPS Satellites,” Proceedings of the 2004 National Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, Enero de 2004, págs. 0-0
- [AD04] R. E. Phelts, D. Akos, P. Enge, “Robust Signal Quality Monitoring and Detection of Evil Waveforms,” Proceedings of ION GPS 2000, Salt Lake City, UT., 19-22 de Septiembre de 2000, págs. 1180-1190
- 30 [AD05] Phelts, R. Eric, “Toward Real-Time SQM for WAAS: Improved Detection Techniques”, Proc. ION GPS/GNSS 2003, 9-12 de Septiembre de 2003, Portland, OR, págs. 2739 – 2749
- [AD06] F. Liu, M. Brenner, C.Y. Tang, “Signal Deformation Monitoring Scheme Implemented in a Prototype Local Area Augmentation System Ground Installation,” Proc. ION GNSS 2006, Fort Worth, TX, 26-29 de Septiembre de 2006, págs. 367-380
- 35 [AD07] G. B. Kaplan, O. İçoglu, A. B. Yoldemir, y M. Sezgin, “Real-time object detection using dynamic principal componente analysis,” en Proc. XIII Int. Conf. Ground Penetrating Radar, Lecce, Italy, Junio de 2010, págs. 369-374
- [AD08] J. Rife, Pratap Misra: “Impact of Time-Correlation of Monitor Statistic on Continuity of Safety-Critical Operations” Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland, OR, 19-23 de Septiembre de 2011, págs. 303-315
- 40 [AD09] EP 1 332 378 B1
- [RD01] S. J. Quin, W. Li, y H. Yue, “Recursive PCA for adaptive process monitoring”, en World Congress of the International Federation of Automatic Control, págs. 85-90, 1999
- 45 [RD02] Bunch, J. R., Nielsen, C. P., Sorensen, D. C.: “Rank one modification of the symmetric eigenproblem”, en Numerische Mathematik, Volumen 31, págs. 31-48 (1978)
- [RD03] Gu, M. y Eisenstat, S., “A stable and efficient algorithm for the rank-one modification of the symmetric eigenproblem”. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 1994, Vol. 15, No. 4, págs. 1266-1276

REIVINDICACIONES

1. Un método para operar una pluralidad de receptores GNSS (= Sistema Global de Navegación por Satélite) (1-4), en donde para la determinación de la posición (220), los receptores GNSS (1-4) reciben señales de código GNSS pertenecientes a señales (13-14) enviadas desde una multitud de satélites (9-12),

y en donde cada señal de código GNSS recibida se correlaciona con una señal de código de referencia generada por el receptor GNSS (1-4) que la recibe para obtener una función de autocorrelación (ACF^{obs}), en donde una multitud de valores de función de la función de autocorrelación (ACF^{obs}) en diferentes separaciones entre chips discretas se analizan y se utilizan en la obtención de una métrica de prueba, en donde utilizando la métrica de prueba, se toma una decisión en cuanto a si las señales de código GNSS recibidas son apropiadas para la determinación de la posición o inapropiadas para la determinación de la posición debido a deformación de la señal de los satélites, y en donde las señales de código GNSS que se encuentra que son inapropiadas para la determinación de la posición se excluyen de la determinación de la posición,

en donde para cada satélite (9-12) i, siendo i un índice del satélite, la utilización de la métrica de prueba incluye los siguientes pasos:

a) para cada época temporal t_k en la cual los receptores GNSS (1-4) reciben señales de código GNSS pertenecientes a la señal (13-14) de la misma frecuencia portadora enviadas desde el satélite (9-12) i, formando un vector $\vec{X}_{i,k}$ (120) de valores de medida $X_{m,i,k}$, siendo m un índice de separación entre chips, y siendo k un índice de época temporal de medida, y derivándose el respectivo valor de medida $X_{m,i,k}$ de valores de función normalizados y con sesgo eliminado de las funciones de autocorrelación (ACF^{obs}) de las señales de código GNSS recibidas en los receptores GNSS (1-4), combinados para una multitud de los receptores GNSS (1-4);

b) obtener la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$ (130) en la época temporal t_n a partir de los vectores $\vec{X}_{i,k}$ de valores de medida por épocas obtenidos a lo largo de una pluralidad de n épocas temporales t_k con $k = 1, \dots, n$, siendo n un índice de

época temporal de monitorización, lo cual produce como resultado la matriz, $\mathbf{X}_{i,n} = \begin{bmatrix} \vec{X}_{i,1} \\ \vdots \\ \vec{X}_{i,n} \end{bmatrix}$, en particular con $\mathbf{R}_{i,n} \sim \mathbf{X}_{i,n}^T \mathbf{X}_{i,n}$

$\mathbf{X}_{i,n}$, siendo $\mathbf{X}_{i,n}^T$ la matriz traspuesta de $\mathbf{X}_{i,n}$,

c) realizar un análisis de componentes principales (150) sobre la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$, obteniendo de esta forma una descomposición propia de la matriz $\mathbf{R}_{i,n}$ en una multitud de autoparejas, a saber, parejas de autovector y autovalor,

d) calcular para la época temporal t_n una métrica de prueba del monitor de la calidad de la señal $SQM_{i,n}$ (170) transformando el vector $\vec{X}_{i,n}$ en el vector $\vec{T}_{i,n}$ por medio de multiplicación con la matriz de componentes principales $\mathbf{PC}_{i,n}$ (160) y formando la suma de cuadrados de las entradas del vector $\vec{T}_{i,n}$, en donde $\mathbf{PC}_{i,n}$ contiene al menos dos autovectores de $\mathbf{R}_{i,n}$, teniendo los autovectores elegidos los mayores autovalores de todas las autoparejas,

e) comparar $SQM_{i,n}$ con un valor umbral THR (180) predefinido, y si $SQM_{i,n}$ supera a THR, la totalidad de señales de código GNSS recibidas en todos los receptores GNSS (1-4) pertenecientes a la señal (13, 14) de la misma frecuencia portadora enviada por el satélite (9-12) i en la época temporal t_n se consideran inapropiadas para la determinación de la posición debido a la deformación de la señal del satélite (190),

en donde para épocas temporales consecutivas que han pasado, se determina de nuevo la métrica de prueba del monitor de calidad de la señal $SQM_{i,n}$, aumentando n en 1 para cada época temporal que ha pasado (230).

2. Un método según la reivindicación 1, caracterizado por que en el paso a), un valor de medida respectivo $X_{m,i,k}$ se deriva de un valor de función en una separación entre chips particular, combinado para dicha multitud de receptores GNSS (1-4).

3. Un método según la reivindicación 1, caracterizado por que en el paso a), un valor de medida respectivo $X_{m,i,k}$ se deriva de una combinación de valores de función de diferentes separaciones entre chips, en particular de una diferencia de valores de función de dos separaciones entre chips vecinas, combinados para dicha multitud de receptores GNSS (1-4).

4. Un método según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que al menos para algunas épocas temporales t_n , en particular épocas temporales t_n posteriores, en el paso b) y c), la obtención de la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$ (130) y el análisis de componentes principales (150) se realiza de forma recursiva, teniendo en cuenta autoparejas obtenidas para una época temporal previa para el mismo satélite i (140).

5. Un método según la reivindicación 4, caracterizado por que en una expresión para calcular la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$ de forma recursiva, se aplica un factor de olvido τ , de tal manera que cuanto más antigua es una época temporal t_k , menos contribuye ésta a la expresión para calcular la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$, en particular en donde el factor de olvido realiza una ponderación exponencial con respecto al tiempo.

6. Un método según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que al menos para algunas épocas temporales t_n , en particular épocas temporales t_n más tempranas, en el paso c), el análisis de componentes principales (150) se realiza para la respectiva matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$ para una pluralidad de épocas temporales t_k con $k=1 \dots n$ en común,
- 5 en particular donde $\mathbf{R}_{i,n}$ se calcula con $\mathbf{R}_{i,n} = 1/(n-1) * \mathbf{X}_{i,n}^T \mathbf{X}_{i,n}$, siendo n el número de épocas de medida desde la inicialización del algoritmo y siendo $\mathbf{X}_{i,n}^T$ la matriz traspuesta de $\mathbf{X}_{i,n}$.
7. Un método según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que en el paso a), los valores de medida respectivos $X_{m,i,k}$ se derivan de valores de función normalizados y con sesgo eliminado de las funciones de autocorrelación (ACF^{obs}) de las señales de código GNSS en los receptores GNSS (1-4), promediados para la multitud de los receptores GNSS (1-4).
- 10 8. Un método según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que en el paso a), para formar los valores de medida $X_{m,i,k}$ del vector $\vec{X}_{i,k}$ (120), los valores de función de la función de autocorrelación (ACF^{obs}) son sometidos a dicha eliminación de sesgo, teniendo en cuenta valores de función correspondientes que se producirían como resultado de una señal de código GNSS recibida en el receptor (1-4) j afectada sólo por deformación de señal esperada, en particular provocada por hardware del satélite ($\text{satBias}_{m,i}$) y/o hardware del receptor ($\mu_{m,j,k}$) y/o procesamiento de señal, obteniendo de esta manera por cada receptor GNSS (1-4) j un vector $\vec{p}_{i,j,k}$ de valores de diferencia $\bar{p}_{m,i,j,k}$ para cada época temporal t_k y para cada satélite i .
- 15 9. Un método según la reivindicación 7 y 8, caracterizado por que en el paso a), para formar los valores de medida $X_{m,i,k}$ del vector $\vec{X}_{i,k}$ (120), dicho cálculo del promedio se realiza para un conjunto (5) de al menos 2, preferiblemente al menos 5, lo más preferiblemente al menos 7, receptores GNSS (1-4) sobre los valores de diferencia $\bar{p}_{m,i,j,k}$ del vector $\vec{p}_{i,j,k}$, obteniendo de esta forma un vector $\vec{p}_{i,k}$ de valores promediados $\bar{p}_{m,i,k}$.
- 20 10. Un método según la reivindicación 9, caracterizado por que en el paso a), para formar los valores de medida $X_{m,i,k}$ del vector $\vec{X}_{i,k}$ (120), dicha normalización se realiza sobre el vector $\vec{p}_{i,k}$ de valores promediados $\bar{p}_{m,i,k}$ dividiendo los valores promediados $\bar{p}_{m,i,k}$ describiendo las desviaciones estándar 1-sigma σ_m de distribuciones normales Gaussianas la distribución del ruido en el caso libre de fallos, obteniendo de esta forma los valores de medida $X_{m,i,k}$ del vector $\vec{X}_{i,k}$.
- 25 11. Método según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la matriz de correlación $\mathbf{R}_{i,n}$ se construye sobre valores de función suavizados donde el suavizado se logra mediante un proceso de reducción de ruido basado en filtrado paso bajo.
- 30 12. Método según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que en el paso d), la matriz $\mathbf{PC}_{i,n}$ está basada en todos los autovectores de $\mathbf{R}_{i,n}$.
13. Método según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el índice m de separación entre chips contiene al menos 3 separaciones entre chips, preferiblemente al menos 5 separaciones entre chips.
14. Método según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que las separaciones entre chips de los valores de la función de autocorrelación utilizados en la obtención de la métrica de prueba se eligen de forma predominante en el lado tardío.
- 35 15. Método según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que en el paso e), si $SQM_{i,n}$ supera a THR en una época temporal t_n para el satélite (9-12) i , la totalidad de señales de código GNSS recibidas en todos los receptores GNSS (1-4) pertenecientes a señales (13-14) de la misma frecuencia portadora enviadas por el mismo satélite (9-12) i en varias épocas temporales consecutivas se consideran también inapropiadas (190) para la determinación de la posición debido a la deformación de la señal del satélite.
- 40 16. Un conjunto (5) de receptores GNSS (1-4), adaptados para realizar un método según una de las reivindicaciones 1 a 15.

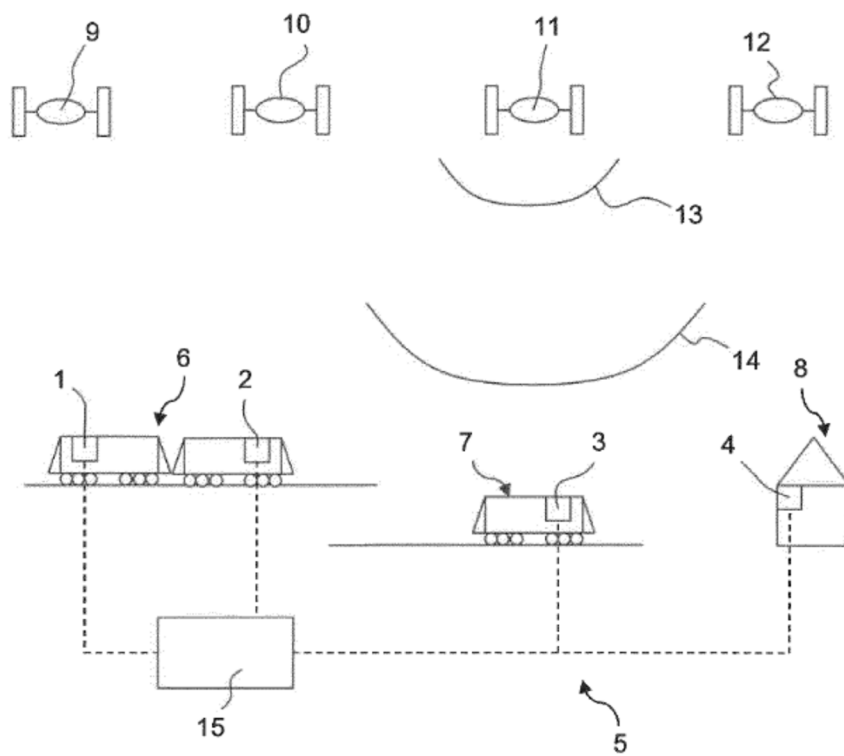


Fig. 1

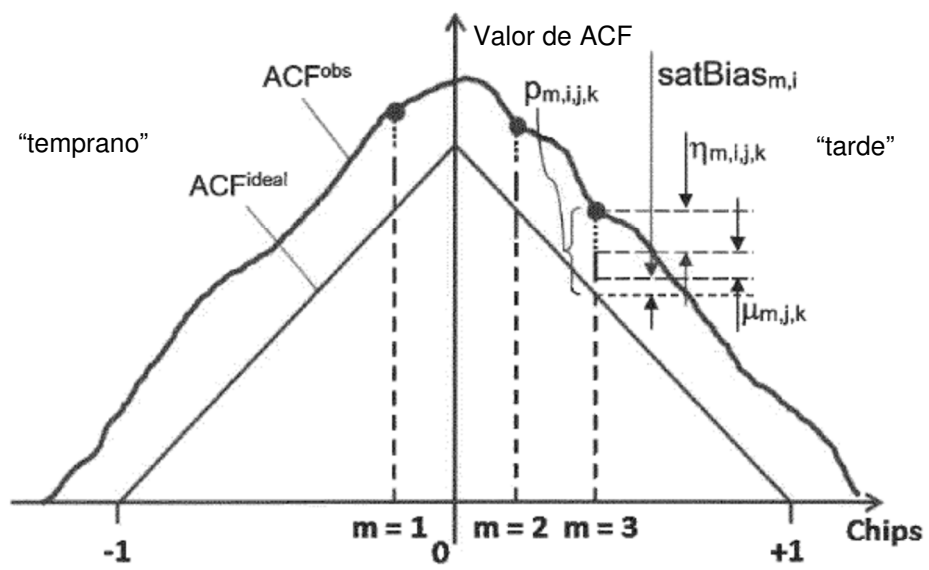


Fig. 2

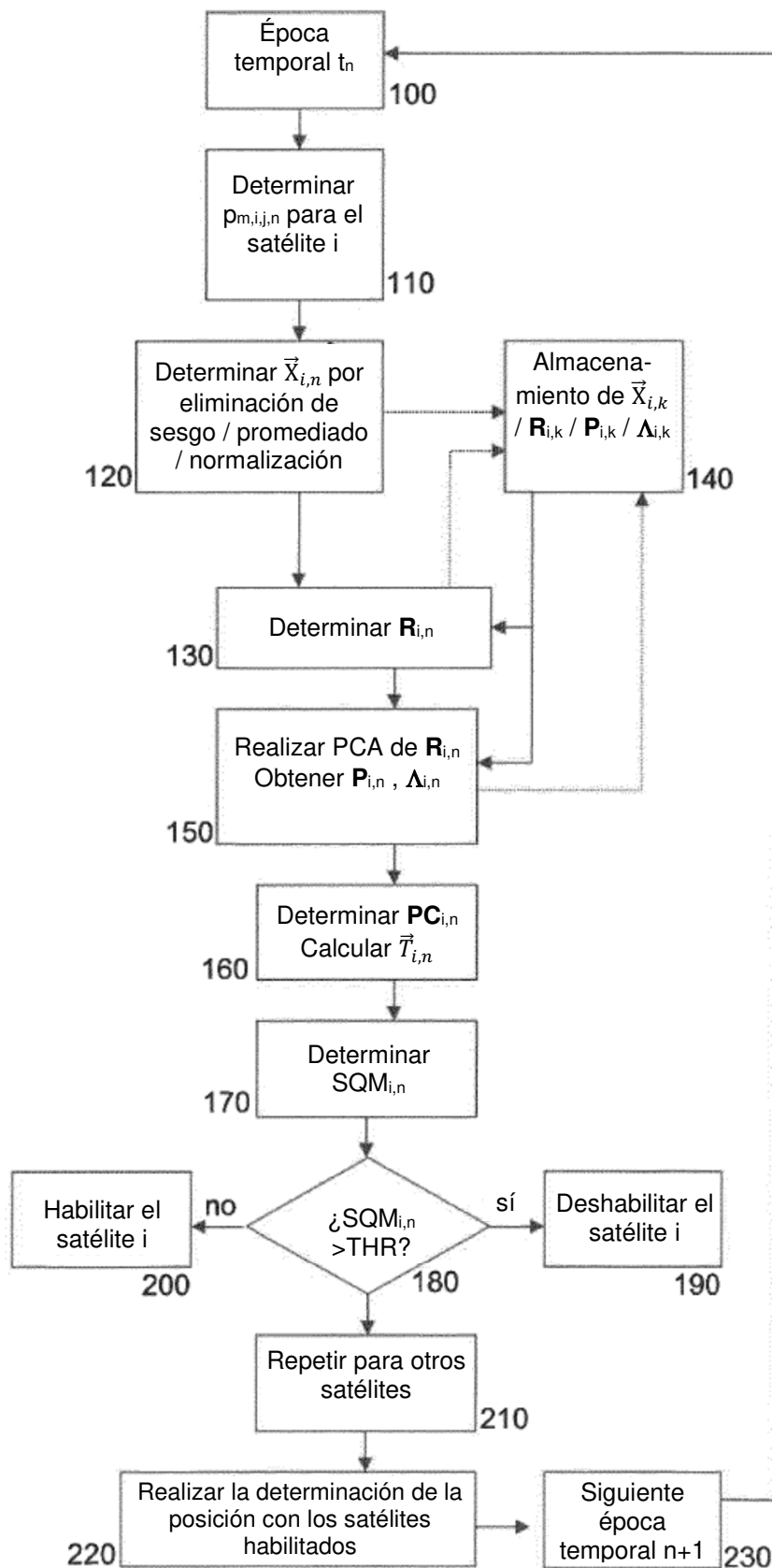


Fig. 3