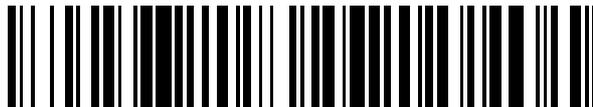


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 566 132**

51 Int. Cl.:

**G01S 13/90** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **06.07.2009 E 09772570 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.10.2015 EP 2304466**

54 Título: **Identificación y análisis de dispersores persistentes en series de imágenes de SAR**

30 Prioridad:

**04.07.2008 EP 08159769**

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

**11.04.2016**

73 Titular/es:

**TELESPAZIO S.P.A. (100.0%)  
Via Tiburtina 965  
00156 Roma, IT**

72 Inventor/es:

**COSTANTINI, MARIO;  
FALCO, SALVATORE;  
MALVAROSA, FABIO y  
MINATI, FEDERICO**

74 Agente/Representante:

**PONS ARIÑO, Ángel**

**ES 2 566 132 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**

Identificación y análisis de dispersores persistentes en series de imágenes de SAR

Campo técnico de la invención

5 La presente invención se relaciona con un nuevo método para identificación y análisis de Dispersores Persistentes (PS) en series de imágenes de Radar de Abertura Sintética digital (SAR).

En particular, en lo siguiente, en aras de simplicidad de descripción y sin perder la generalidad, se describirá la presente invención con referencia específica a las imágenes de SAR adquiridas de los sistemas SAR a bordo de vehículos espaciales, quedando claro que la presente invención también se puede aplicar a imágenes de SAR adquiridas de los sistemas SAR con base en tierra o vehículos aéreos.

10 Técnica antecedente

15 Como se sabe, la interferometría de Radar de Abertura Sintética (SAR) de satélite de paso repetido es una tecnología muy efectiva para medir los desplazamientos del terreno debido a hundimientos, deslizamientos de tierra, terremotos y fenómenos volcánicos, como fue revisado en P.A. Rosen, S. Hensley, I.R. Joughin, F.K. Li, S.N. Madsen, E. Rodriguez, R.M. Goldstein, Synthetic Aperture Radar interferometry, Proceedings of the IEEE, vol. 88, no. 3, pp. 333-382, Marzo 2000, y en R. Bamler, P. Hartl, Topical Review: Synthetic Aperture Radar interferometry, Inverse Problems, vol. 14, pp. R1-R54, 1998.

20 En particular, la interferometría de SAR de satélite de paso repetido se basa en una detección coherente de la superficie de la Tierra a través de radares montados en satelitales (o montados en avión o con base en tierra), que presentan imágenes de la superficie de la Tierra con una resolución espacial del orden de un metro o pocos metros con sensores espaciales actuales (menos para radares aéreos o terrestres). Una combinación de señales de retrodispersión de todas las fuentes dentro de cada celda de resolución resulta en una amplitud y una fase asociada con la celda de resolución o pixel en la imagen de SAR.

En detalle, la fase de un solo pixel de una imagen de SAR, que se asocia con la porción de terreno dentro de la celda de resolución, se puede modelar como la suma de cuatro contribuciones:

- 25
- una primera contribución  $\phi_s$  es una fase asociada con el mecanismo de dispersión en la celda de resolución dada;
  - una segunda contribución  $\phi_r$  se relaciona con la distancia  $r$  entre el sensor y la celda de resolución, y con la longitud de onda  $\lambda$  del sensor, la segunda contribución  $\phi_r$  se define como  $\phi_r = 4\pi r/\lambda$ ;
  - una tercera contribución  $\phi_a$  es una fase asociada con el retardo introducido por la atmósfera; y
  - una cuarta contribución  $\phi_n$  es un residuo del modelo, incluido el ruido de fase.

30 Teniendo en cuenta, en primera instancia, sólo la contribución  $\phi_s$  de fase relacionada con la dispersión y la contribución  $\phi_r$  de fase de distancia de celda de resolución del sensor, si las dos imágenes de SAR se adquieren en diferentes momentos y con ángulos de visión ligeramente diferentes, y bajo la hipótesis de que el comportamiento de dispersión de la celda de resolución es idéntico en las dos adquisiciones, la diferencia de fase de las dos imágenes corregistradas, la llamada "fase interferométrica", depende de la elevación de la celda de resolución y de sus desplazamientos, ya que el término  $\phi_s$  se debe a que se elimina el dispersor en la diferencia. Se puede utilizar un Modelo de Elevación Digital (DEM) para determinar y eliminar la contribución de la elevación del terreno de la fase interferométrica y, por lo tanto, obtener desplazamientos de terreno.

35

40 En principio, la interferometría diferencial puede medir desplazamientos de terreno de pocos milímetros. Sin embargo, la exactitud y viabilidad de las mediciones están influenciadas por diferentes fuentes de error, que se pueden dividir en dos grupos: ruido, debido principalmente a decorrelación entre las imágenes de SAR en diferentes adquisiciones y errores sistemáticos, debido a precisiones limitadas de los datos de órbita y del DEM utilizado en el procesamiento, y diferentes condiciones atmosféricas en las diferentes fechas de adquisición.

En particular, el ruido de decorrelación hace mediciones interferométricas válidas solo posibles en un grupo escaso de puntos, denominados Difusores Persistentes (PS), que permanecen correlacionados en diferentes adquisiciones. El PS

normalmente corresponde a celdas de resolución en las que la contribución dominante a la señal proviene de un único punto similar y estable durante el tiempo de las adquisiciones, el mecanismo de dispersión. Estos mecanismos de dispersión son más frecuentes en la presencia de edificios, infraestructuras, rocas y suelo.

5 La identificación del PS y luego la recuperación de su movimiento (junto con su elevación precisa) de una serie de adquisiciones SAR son los problemas clave de la Interferometría de Dispersor Persistente (PSI).

10 Un método conocido, llamado método de Dispersores Permanentes y descrita en A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, Permanent scatterers in SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 39, no.1, pp. 8-20, Jan. 2001, y en A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 38, pp. 2202-2212, Sept. 2000, con el concepto de minimizar la amplitud y dispersiones de fase en la larga serie máxima de imágenes de SAR de resolución completa, se ha introducido una nueva forma de concebir la interferometría SAR.

15 En particular, el método de Dispersores Permanentes requiere una identificación de un grupo preliminar de PS, seleccionado de acuerdo con la estabilidad en las diferentes adquisiciones de su amplitud de señal (es decir, el módulo de reflectividad). Estos puntos se analizan en relación con un modelo de fase para determinar la velocidad de desplazamiento PS (que se supone constante, el desplazamiento evoluciona linealmente con el tiempo) y elevación (o, más precisamente, corrección de elevación con respecto a DEM utilizado para aplanar la fase), y refinar la selección PS.

Estas contribuciones de velocidad y elevación luego se restan a la fase PS para determinar los residuos de fase, que contienen la contribución atmosférica, el desplazamiento no lineal con el tiempo, y las otras contribuciones no modeladas incluyendo ruido.

20 Luego se puede filtrar la contribución de fase atmosférica al explotar su propiedad de ser espacialmente correlacionada (y temporalmente no correlacionada).

Las contribuciones de fase atmosférica calculadas sobre el PS seleccionado se pueden utilizar después para estimar las contribuciones de fase atmosféricas en todos los puntos, por interpolaciones o ajustes locales o globales (con base en modelos).

25 Estas estimaciones se pueden restar de las imágenes relativas, que se pueden procesar de nuevo para encontrar una mejor velocidad de elevación y desplazamiento y nuevo PS.

Se puede repetir varias veces este procedimiento para aumentar el número de PS encontrado.

30 En este método, es fundamental calibrar los datos, radiométricamente y desde el punto de vista de fase. En particular, es necesario calibración radiométrica para analizar la dispersión de amplitud de señal, mientras que calibrar la fase significa la eliminación de las contribuciones de fase orbitales y atmosféricas, una etapa necesaria no sólo para el análisis, sino también para la identificación de todos los posibles PS.

En este sentido, los métodos para el análisis e identificación de PS que requieren una calibración previa de imágenes de SAR se conocen de:

35 • Hooper, A. et al., A new method for measuring deformation on volcanos and other natural terrains using InSAR dispensor persistentes, Geophysical Research Letters, vol. 31, L23611, 10 December 2004, en lo siguiente D1 en aras de simplicidad de descripción; y

• Bert M. Kampes, Radar Interferometry - Dispersor persistente Technique, 2006, Springer, Dordrecht, NL, ISBN 978-1-4020-4576-9, páginas 43-69, en lo siguiente denominado D2 en aras de simplicidad de descripción.

40 En particular, D1 describe un método para identificar pixeles de formación de imagen de dispensor persistente en una serie de interferogramas, cuyo método comprende:

• formar interferogramas N con base en una serie de imágenes de SAR y eliminar la mayor parte de la firma de fase topográfica utilizando un DEM;

• considerar los pixeles individuales en los interferogramas N;

- calcular, para cada pixel considerado en cada interferograma, una fase interferométrica promedio correspondiente de todos los dispersores persistentes ya identificados en dicho interferograma que están dentro de un parche circular que se centra en dicho pixel considerado y tiene un radio determinado;
  - suponer que la fase topográfica residual debido a un error en el DEM de dicha fase interferométrica promedio es cero;
- 5
- suponer que el cambio de fase debido al movimiento entre dicha fase interferométrica de pixel considerada y dicha fase interferométrica promedio es insignificante debido a su correlación espacial;
  - maximizar, para cada pixel considerado, como una función del error en el DEM, una única coherencia temporal correspondiente sobre la base de las fases interferométricas N de dicho pixel considerado en todos los interferogramas N y de las fases interferométricas promedio N calculadas para dicho pixel considerado en todos los interferogramas N; e
- 10
- identificar un pixel considerado como un pixel de formación de imagen de dispersor persistente sobre la base del valor relacionado con coherencia temporal correspondiente única determinada para dicho pixel considerado.

Más aún, de acuerdo con D1, un grupo inicial de pixeles de formación de imagen de dispersor persistente se tiene que seleccionar con base en la dispersión de amplitud de pixel. Por lo tanto, como se explicó anteriormente, el método de acuerdo con D1 requiere necesariamente una calibración previa de las imágenes de SAR.

- 15
- En cambio, D2 describe dos métodos para identificar pixeles de formación de imagen de dispersor persistente, en donde un primer método se basa en un umbral de intensidades de pixeles calibrados, y un segundo método se basa en un umbral de amplitud de dispersión de pixel. Por lo tanto, también los métodos de acuerdo con D2 requieren necesariamente una calibración previa de las imágenes de SAR.

Objeto y resumen de la invención

- 20
- Un gran inconveniente del método mencionado anteriormente es que los resultados finales son sensibles a densidad y conectividad de las mediciones obtenidas en las primeras etapas de procesamiento, y a errores de procesamiento que ocurren en estas primeras etapas de procesamiento, los errores de procesamiento son particularmente más probables en áreas grandes en donde se presentan Difusores Persistentes débiles o aislados.

- 25
- Más aún, puede suceder que no se obtengan mediciones preliminares en grandes áreas donde están presentes Difusores Persistentes aislados o débiles.

Adicionalmente, el método anteriormente mencionado requiere modelos de artefactos atmosféricos y la historia de deformación, o refinamientos sucesivos.

El objetivo de la presente invención entonces es proporcionar un método de identificación de dispersor persistente que pueda superar, por lo menos en parte, los inconvenientes anteriormente mencionados.

- 30
- Este objetivo se consigue mediante la presente invención porque se relaciona con un método para identificar dispersores persistentes, como se define en las reivindicaciones adjuntas.

En particular, la presente invención se relaciona con un método para identificar dispersores persistentes en imágenes digitales de Radar de Abertura Sintética (SAR) que forman imágenes de un área de superficie de la Tierra en diferentes momentos. El método comprende:

- 35
- registrar las imágenes de SAR digitales; y
  - procesar las imágenes de SAR digitales registradas para producir interferogramas diferenciales generalizados digitales con respecto a una imagen maestra, cada interferograma diferencial generalizado digital es un interferograma diferencial entre la imagen maestra y una imagen de SAR digital registrada respectiva, cada pixel en los interferogramas diferenciales generalizados digitales son indicadores de una fase interferométrica.

- 40
- El método se caracteriza porque comprende adicionalmente analizar las propiedades de pares de pixeles cercanos en los interferogramas diferenciales generalizados digitales para identificar pixeles que forman imágenes de dispersores persistentes.

En detalle, analizar las propiedades de pares de píxeles cercanos en los interferogramas diferenciales generalizados digitales incluye:

- considerar pares de píxeles cercanos en los interferogramas diferenciales generalizados digitales;
- 5 • calcular, para cada par considerado de píxeles cercanos, valores diferenciales relacionados con la fase correspondiente indicadora de diferencias entre las fases interferométricas de dichos píxeles cercanos en los interferogramas diferenciales generalizados digitales;
- 10 • determinar, para cada par considerado de píxeles cercanos, un valor relacionado con coherencia temporal correspondiente sobre la base de los valores diferenciales relacionados con la fase correspondiente, de un valor diferencial relacionado con elevación correspondiente, y de un valor diferencial relacionado con velocidad correspondiente, dicho valor diferencial relacionado con elevación correspondiente es indicador de una diferencia entre elevaciones de dos puntos correspondientes sobre la superficie de la Tierra de los cuales se forman imágenes mediante dichos píxeles cercanos, dicho valor diferencial relacionado con velocidad correspondiente es indicador de una diferencia entre las velocidades de desplazamiento de dichos dos puntos correspondientes sobre la superficie de la Tierra; e
- 15 • identificar, entre los píxeles que pertenecen a los pares de píxeles cercanos considerados, los píxeles que forman imágenes de dispersores persistentes sobre la base de los valores relacionados con coherencia temporal determinada.

Breve descripción de los dibujos

Para una mejor comprensión de la presente invención, las realizaciones preferidas, que están destinadas solo a modo de ejemplo y no se deben considerar como limitantes, se describirán ahora con referencia a los dibujos adjuntos (todos no están a escala), en donde :

- 20 • La Figura 1 muestra esquemáticamente puntos identificados como Dispersores Persistentes (PS) o no PS de acuerdo con la presente invención.

Descripción detallada de la realización preferida de la invención

- 25 Se presenta la siguiente discusión para permitir a un experto en la técnica hacer y utilizar la invención. Diversas modificaciones a las realizaciones serán fácilmente evidentes para aquellos expertos en la técnica, sin apartarse del alcance de la presente invención como se reivindica.

Por lo tanto, no se pretende limitar la presente invención a las realizaciones mostradas, sino que se le tiene que conceder del alcance más amplio consistente con los principios y características descritos en este documento y definidos en las reivindicaciones adjuntas.

- 30 Más aún, la presente invención se implementa por medio de un producto de programa de software, que se puede cargar en una memoria de un procesador electrónico, y que comprende porciones de código de software para implementar, cuando el producto de programa de software se ejecuta en un procesador electrónico, el método de identificación de dispersor persistente descrito adelante.

- 35 En lo siguiente, en aras de simplicidad de descripción y sin perder la generalidad, los términos “punto (s)” y “píxel (s)” se utilizarán como términos esencialmente intercambiables, y la expresión “dispersor persistente (s)” “(o PS) se utilizará tanto para un dispersor persistente formado por imagen mediante un píxel (o dispersores persistentes formados por imagen mediante píxeles) y para un píxel que forma imágenes de un dispersor persistente (o píxeles que forman imágenes de dispersores persistentes).

- 40 En particular, cuando la expresión “Dispersor persistente(s)” (o PS) se utilice en lo siguientes el significado correcto, entre los dos significados mencionados anteriormente, asociado con el mismo será sin duda comprensible sobre la base del contexto respectivo en que se utilice esta expresión.

- 45 En general, el método, de acuerdo con la presente invención, para identificar y analizar Dispersores Persistentes, que el Solicitante ha nombrado método de Pares Dispersores Persistentes (PSP), explota solo las propiedades relativas de los pares puntos y un modelo bastante general de la señal SAR, lo que permite identificar mejor todos los Dispersores Persistentes (PS) (también en áreas donde no son muy densos o se caracterizan por movimientos no lineales con el tiempo), y recuperar sus movimientos y elevaciones precisas (y en consecuencia, también una mejor localización).

En particular, el método de PSP no requiere un modelo para artefactos atmosféricos, ni una calibración previa de imágenes de SAR, y es robusto con respecto a la densidad de PS encontrado en las etapas preliminares.

El concepto central del método de PSP es identificar y analizar el PS que solo funciona con pares de puntos (“arcos”).

5 Debido a que las perturbaciones espacialmente correlacionadas afectan en una forma similar las señales en dos puntos cercanos, trabajando con diferencias de fase entre puntos cercanos elimina la atmósfera y contribuciones de fase de órbita, eliminando de esta manera la necesidad de calibración previa de datos.

En detalle, de acuerdo con el método de PSP, una serie de adquisiciones SAR N corregistradas, es decir, imágenes de SAR digitales de N corregistradas, siendo  $N > 1$ , se procesan para producir interferogramas diferenciales generalizados con respecto a una imagen maestra, o de referencia,.

10 En particular, de acuerdo con la presente invención, un interferograma diferencial generalizado se define como un interferograma diferencial entre la imagen maestra (o referencia) y una imagen de SAR corregistrada, donde la imagen maestra puede ser una imagen (real) seleccionada entre las Imágenes de SAR corregistradas N o una imagen de referencia sintética. Cuando la imagen maestra es una imagen real, la definición corresponde a aquella de los interferogramas diferenciales clásicos o también puede incluir la posibilidad de un “interferograma idéntico de fase cero” de la imagen  
15 maestra con si mismo.

En los siguientes, en aras de simplicidad de descripción y sin perder la generalidad, las expresiones “interferograma diferencial generalizado”, “interferograma diferencial(s)” e “interferograma (s)” se utilizarán como expresiones esencialmente intercambiables.

20 Cada interferograma tiene un valor de referencia perpendicular asociado (espacial)  $B_i$  (es decir, el componente perpendicular a la línea de visión) y diferencia de tiempo (o valor inicial temporal)  $T_i$  con respecto a la imagen maestra, en donde  $i$  denota un índice que identifica un interferograma considerado  $i$ -ésimo.

Luego, deja  $\delta\phi_{a,i}$  ser una diferencia de fase entre dos puntos, es decir, pixeles, en el interferograma considerado  $i$ -ésimo que se identifican por un arco  $a$  que los conecta. El arco  $a$  se asocia con una diferencia de elevación  $\delta h_a$  (una diferencia de elevación residual si se utiliza un DEM para aplanar la fase) y con una diferencia de velocidad  $\delta v_a$  (velocidad significa  
25 velocidad a lo largo de la línea de visión) entre los dos puntos, y  $\delta\phi_{a,i}$  se puede modelar como:

$$\delta\phi_{a,i} = \left[ \frac{4\pi}{\lambda} (T_i \delta v_a + \alpha B_i \delta h_a) + \epsilon_{a,i} \right]_{2\pi}, \quad (1)$$

30 donde  $\lambda$  es la longitud de onda en la que se ha detectado (o tomado) las Imágenes de SAR,  $\alpha$  es un parámetro conocido, y  $\epsilon_{a,i}$  es una desviación del modelo e incluye principalmente ruido térmico o moteado cuando se limita la longitud del arco  $a$ . El ruido  $\epsilon_{a,i}$  es, por definición, pequeño para Pares de Dispersores Persistentes (PSPs), y entonces la ecuación (1) es una ecuación muy útil para seleccionar PSPs y recuperar la elevación residual y diferencia de velocidades  $\delta h_a$  y  $\delta v_a$  asociadas con el arco  $a$ .

Un parámetro útil es una coherencia  $\gamma_a$  temporal o de múltiples adquisiciones asociada con el arco  $a$  y se define como:

$$\gamma_a = \max_{\delta v_a, \delta h_a} \left| \sum_i w_{a,i} e^{j\epsilon_{a,i}} \right| = \max_{\delta v_a, \delta h_a} \left| \sum_i w_{a,i} e^{j \left[ \delta\phi_{a,i} - \frac{4\pi}{\lambda} (T_i \delta v_a + \alpha B_i \delta h_a) \right]} \right|, \quad (2)$$

35 donde  $w_{a,i}$  son pesos posibles elegidos de acuerdo con un criterio dado (todos pueden ser unitarios en el caso más simple, o dependen por ejemplo, de los valores de amplitud de las imágenes de SAR adquiridas, o se pueden elegir de acuerdo con otros criterios).

En algunos casos, algunos de los parámetros  $\delta h_a$  y  $\delta v_a$  pueden ser considerados conocidos y por lo tanto mantenidos fijo en la maximización en la ecuación (2).

Usualmente, en la literatura, la suma en la coherencia  $\gamma_a$  de múltiples adquisiciones definida por la ecuación (2) se extiende sobre los interferogramas  $N - 1$  formados por la imagen maestra con todas las otras imágenes.

- 5 Por el contrario, el Solicitante ha observado que también el interferograma idéntico de fase cero de la imagen maestra por sí mismo se puede considerar en la suma en la definición (2) o, lo que es equivalente, dada la definición (2), los interferogramas diferenciales  $N$  generalizados con respecto a una imagen maestra de fase cero sintética externa pueden ser considerados en la suma en la definición (2). Se puede observar que los resultados obtenidos al aplicar la modificación propuesta son más correctos teóricamente, mientras que, desde el punto de vista cuantitativo, las diferencias pueden ser significativas, en particular, cuando el número  $N$  de las adquisiciones disponibles no es muy grande.

- 10 La modificación propuesta a la definición (2) de la coherencia  $\gamma_a$  de múltiples adquisiciones se puede aplicar también a las definiciones análogas de coherencia de múltiples adquisiciones o temporal, con base en puntos o arcos, que se utilizan en otros métodos de dispersor persistente (PS), como, por ejemplo, aquellos originalmente propuestos en la anteriormente mencionada A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, Permanent scatterers in SAR interferometry, y en A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry o aquellos desarrollados sucesivamente por otras personas.

La coherencia  $\gamma_a$  de múltiples adquisiciones definida por (2) se puede utilizar para medir la calidad del arco como un PSP por medio de una prueba de arco.

- 20 En particular, el arco pasa la prueba de arco si  $\gamma_a$  es mayor que un umbral dado. El umbral que se va a utilizar se puede determinar empíricamente, o con base en simulaciones o derivaciones analíticas. Sin embargo, el algoritmo es independiente del tipo de prueba de arco utilizada, y se pueden utilizar pruebas de arco diferentes o más complejas, incluyendo también el análisis de más arcos.

Trabajar con arcos podría requerir muchos más cálculos que el análisis de puntos individuales. De hecho, con un grupo de puntos  $P$ , se presentan para analizar arcos  $(P - 1) P/2$ .

- 25 En el caso de interés, sólo son significativos los arcos cortos: incluso considerando sólo los vecinos  $M$  más cercanos de cada punto de imagen, no se deben probar arcos menores de  $PM/2$ , que aún puede ser un número enorme, ya que PS puede ser muy escaso y, por lo tanto, es útil que  $M$  sea un número grande.

- 30 Sin embargo, no es necesario analizar todos los arcos posibles. Un grupo mínimo de arcos útiles para identificar los puntos buscados, es decir, todos los PS, se representa por el gráfico formado por los arcos que conectan cada PS con unos pocos (por lo menos uno) del PS más cercano, y por los arcos que conectan cada punto que se va a descargar con unos pocos (por lo menos uno) del PS más cercano.

En general, el gráfico se puede desconectar parcialmente si se presentan diferentes grupos de PS que no pueden ser conectados entre sí, por ejemplo, porque están demasiado separados. La construcción de este gráfico no es inmediata (porque no se conocen las posiciones de PS sino que en cambio son el propósito de búsqueda).

- 35 Este establecimiento mínimo se construye de forma iterativa. En particular, el análisis de PSP comienza con un gráfico  $P_0$  inicial de puntos "semilla" (o nodos) y arcos. Siguiendo la filosofía del trabajo sólo en arcos, también los puntos de semillas y los arcos se pueden encontrar al aplicar la prueba de arco a un grupo limitado de arcos que conectan puntos cercanos.

- 40 Este grupo inicial de arcos puede consistir de arcos que conectan solo los primeros píxeles vecinos. Sin embargo, esta opción sería eficaz sólo en las áreas donde los PS son densos. Por lo tanto, se puede considerar que arcos adicionales unen píxeles a distancias relativamente grandes. Con el fin de limitar su número, estos arcos no deben ser demasiado largos (como se explica en la discusión de la ecuación (1)), y unir sólo los puntos más "prometedores", o candidatos de PS.

- 45 Los candidatos de PS se pueden identificar con base en un índice de calidad obtenido al calcular la coherencia  $\gamma_a$  de múltiples adquisiciones definidas por (2) para todos los arcos entre los primeros píxeles vecinos (por ejemplo, el índice de calidad de un punto se puede definir como la máxima entre las coherencias  $\gamma_a$  de múltiples adquisiciones sobre los arcos incidentes a ese punto). Sin embargo, otras propiedades de los píxeles, también con base en sus amplitudes, se podrían considerar para decidir los puntos más prometedores o candidatos.

5 Más aún, diferentes grupos de candidatos de PS se pueden identificar al aplicar diferentes umbrales para el índice de calidad. Con umbrales más altos, los puntos seleccionados son más escasos pero más confiables y con arcos más cortos y más largos entre pixeles vecinos es posible conectar áreas distantes. Luego, el grupo de arcos limitado inicial buscado que conecta puntos cercanos se puede obtener como la unión de todos los arcos entre los pixeles que son vecinos (no necesariamente primeros vecinos) en los diferentes grupos de puntos correspondientes a diferentes umbrales.

Una vez determinado el grupo de arcos inicial, la prueba de arco se puede aplicar a estos arcos, y aquellos que pasan la prueba de arco formarán distintos gráficos que no están relacionados entre sí. Los gráficos que presentan propiedades deseadas, por ejemplo, una cardinalidad dada, es decir, el número de nodos del gráfico conexo, o la conectividad, es decir, el número mínimo de arcos/nodos cuya eliminación haría que el gráfico desconectado, forme el grupo inicial  $P_0$ .

10 Sin embargo, se pueden considerar diferentes propiedades y diferentes estrategias para seleccionar el gráfico  $P_0$  inicial. Más aún, la selección de semillas no es un problema muy crítico, porque el algoritmo iterativo se construye de tal manera que los resultados son bastante insensibles a la densidad de semillas iniciales. Sin embargo, se debe prestar atención, con el fin de que  $P_0$  contenga principalmente solo puntos “buenos”, es decir, PS (a pesar de la presencia de pocos puntos “malos”, en cuyo caso pueden ser desechados en las siguientes etapas, no es crítico), y que las semillas se distribuyan bien, lo que podría ser relevante cuando hay diferentes grupos de PS que no se pueden conectar juntos porque están demasiado separados.

20 En la etapa  $k$ -ésima, con  $k > 0$ , se obtiene  $P_k$  al agregar a  $P_{k-1}$  por lo menos un PS más. Para este propósito, se comprueban los arcos entre PS que pertenecen a  $P_{k-1}$  y puntos aún no incluidos en este gráfico, normalmente en el orden de longitud, y se incluyen en  $P_k$  dependiendo de los resultados de las pruebas de arco. De la misma manera, se puede identificar un punto que no pertenece al grupo PS y no se prueba más.

Por ejemplo, se puede hacer selección con base en el número de arcos que pasan la prueba de arco entre un nuevo nodo y el gráfico  $P_{k-1}$ . Por el contrario, si un número dado de arcos entre un nodo no en  $P_{k-1}$  y se encuentra que los puntos ya en  $P_{k-1}$  no pasan la prueba de arco, este nodo no se prueba más (a menos que se que encuentren arcos más cortos que los ya considerados en iteraciones sucesivas entre el nodo y algunos nodos seleccionados sucesivamente).

25 Sin embargo, se pueden utilizar diferentes pruebas de arco y combinaciones de pruebas de arco para la inclusión o exclusión de un punto a partir del grupo de PS.

Las iteraciones finalizan en la etapa  $L$ , cuando todos los puntos han sido probados e identificados ya sea como PS, o no PS.

30 La selección iterativa de PS descrita anteriormente se puede aplicar al grupo de puntos completo o a un grupo de puntos preseleccionados (candidatos de PS, como se definió anteriormente) con el fin de reducir la carga computacional.

En relación con la selección iterativa descrita anteriormente de PS, la Figura 1 muestra esquemáticamente un grupo mínimo de arcos que identifica puntos PS y no PS.

35 En particular, en la Figura 1, los círculos negros representan Difusores Persistentes (PS) identificados de acuerdo con el método de PSP, mientras que los círculos blancos representan los puntos identificados como no PS. Las flechas continuas representan arcos que pasan una prueba de arco elegida, mientras que las flechas discontinuas representan arcos que no pasan la prueba de arco elegida.

40 En el ejemplo mostrado en la Figura 1, la prueba de arco elegido requiere que un arco tenga una coherencia  $\gamma_a$  de múltiples adquisiciones mayor que un umbral dado. Esto significa que cada punto se prueba una vez a través del examen de coherencia  $\gamma_a$  de múltiples adquisiciones de un arco entre el punto probado y un PS. En particular, si  $\gamma_a$  es mayor que el umbral dado, el punto de prueba se incluye en el grupo PS, de lo contrario se rechaza y no se prueba otra vez (a menos que se encuentre un arco más corto que uno ya considerado en iteraciones sucesivas entre el punto probado y algunos nodos seleccionados sucesivamente). Sin embargo, se utilizan normalmente pruebas de arco más complejas, por ejemplo que requieren más de un arco entre el punto probado y se analiza un PS.

45 Más aún, la coherencia  $\gamma_a$  de múltiples adquisiciones definida en (2) proporciona también un estimado de elevación residual y diferencias de velocidades  $\delta h_a$  y  $\delta v_a$  asociadas al arco  $a$ . Por lo tanto, después de la selección de PS, se pueden reconstruir la velocidad y valores de elevación residuales en todo los PS seleccionados por “integración”, hasta constantes aditivas, desde las diferencias  $\delta h_a$  y  $\delta v_a$  calculadas sobre un grupo de arcos que conectan el PS.

- 5 Sin embargo, los valores de diferencia  $\delta h_a$  y  $\delta v_a$  asociados con arcos son tales que los valores reconstruidos en los puntos dependen, en general, de la ruta de "integración". En otras palabras, la solución se sobre-determina (aunque definida hasta una constante aditiva), y se puede determinar al resolver un problema de optimización con el fin de reducir al mínimo, de acuerdo a una métrica dada y pesos dependiendo de las fiabilidades de arco, los residuos correspondiente a las diferentes "determinaciones".
- Gracias a esta sobredeterminación o redundancia, la velocidad y valores de elevación residual reconstruida en todo el PS seleccionado son más robustos a errores y menos ruidosos.
- 10 Luego, con el fin de recuperar la evolución de desplazamiento de cada PS identificado es necesario desenvolver las fases de todos los interferogramas. Las velocidades y elevaciones reconstruidas se eliminan de acuerdo con la ecuación (1) desde cada fase interferométrica; los residuos son idealmente independientes sobre los valores iniciales espacial y temporal.
- Las fases residuales en el grupo escaso de puntos seleccionados se pueden desenvolver como se enseña en M. Costantini, A novel phase unwrapping method based on network programming, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 36, pp. 813-821, Mayo 1998, y en M. Costantini and P. Rosen, A generalized phase unwrapping approach for sparse data, in Proc. Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS), Hamburg, Alemania, Junio 28-Julio 2 1999, pp. 267-269.
- 15 Más aún, desde las fases residuales no envueltas, los artefactos atmosféricos caracterizados por variabilidad lenta y rápida en los dominios de espacio y tiempo, respectivamente, se filtran, para obtener las fases relacionadas con el componente de tiempo no lineal de los desplazamientos.
- Por último, se obtiene evolución de desplazamiento de PS al agregar la velocidad constante y componentes con tiempo no lineales de los desplazamientos.
- 20 Un filtrado adicional se puede aplicar en el caso con base en el concepto de que las aceleraciones de desplazamiento no pueden ser demasiado altas, como se enseña en M. Costantini, F. Minati, and L. Pietranera, A Curvature Based Method for Combining Multi-Temporal SAR Differential Interferometric Measurements, in Proc. of Fringe 2003 Workshop, Frascati, Italia, Dic. 2003.
- Después de depurar la fase de artefactos atmosféricos, en principio el proceso se puede repetir.
- 25 De lo anterior, se puede apreciar inmediatamente que el método de acuerdo con la presente invención para identificar y analizar Dispersiones Persistentes en serie de imágenes de SAR de resolución completa, es decir, el método PSP, supera efectivamente los problemas procedentes de artefactos de fase orbital y de atmósfera, al explotar su correlación espacial, sin utilizar interpolaciones o ajustes con base en modelos.
- 30 En particular, el método de PSP es particularmente ventajoso cuando los artefactos atmosféricos o desplazamientos que se van a recuperar no se describen bien por los modelos utilizados en el método PS estándar.
- Más aún, el método de PSP no necesita un procesamiento previo para calibrar los datos, es menos sensible a densidad de PS, y es capaz de identificar mejor el PS en terrenos naturales y PS caracterizado por movimientos no lineales.
- Adicionalmente, el método PSP es computacionalmente eficiente y altamente paralelizable.

**REIVINDICACIONES**

1. Método para identificar dispersores persistentes en imágenes digitales de Radar de Abertura Sintética (SAR) que forman imágenes de un área de superficie de la Tierra en diferentes momentos; el método comprende:

- registrar las imágenes digitales de Radar de Abertura Sintética (SAR);

5 • procesar las imágenes digitales de Radar de Abertura Sintética (SAR) registradas para producir interferogramas diferenciales generalizados digitales con respecto a una imagen maestra, cada interferograma diferencial generalizado digital es un interferograma diferencial entre la imagen maestra y una imagen de Radar de Abertura Sintética (SAR) digital registrado respectivo, cada pixel en los interferogramas diferenciales generalizados digitales son indicadores de una fase interferométrica;

10 el método se caracteriza porque comprende adicionalmente:

- analizar las propiedades de pares de pixeles cercanos en los interferogramas diferenciales generalizados digitales para identificar pixeles que forman imágenes de dispersores persistentes, analizar que incluyen

- considerar pares de pixeles cercanos en los interferogramas diferenciales generalizados digitales;

15 - calcular, para cada par considerado de pixeles cercanos, valores diferenciales relacionados con la fase correspondiente ( $\delta\phi_{a,i}$ ) indicadores de diferencias entre las fases interferométricas de dichos pixeles cercanos en los interferogramas diferenciales generalizados digitales;

20 - determinar, para cada par considerado de pixeles cercanos, un valor relacionado con coherencia temporal correspondiente ( $\gamma_a$ ) sobre la base de los valores diferenciales relacionados con la fase correspondiente ( $\delta\phi_{a,i}$ ), de un valor diferencial relacionado con elevación correspondiente ( $\delta h_a$ ), y de un valor diferencial relacionado con velocidad correspondiente ( $\delta v_a$ ), dicho valor diferencial relacionado con elevación correspondiente ( $\delta h_a$ ) es indicador de una diferencia entre elevaciones de dos puntos correspondientes sobre la superficie de la Tierra de los cuales se forman imágenes mediante dichos pixeles cercanos, dicho valor diferencial relacionado con velocidad correspondiente ( $\delta v_a$ ) es indicador de una diferencia entre las velocidades de desplazamiento de dichos dos puntos correspondientes sobre la superficie de la Tierra; e

25 - identificar, entre los pixeles que pertenecen a los pares de pixeles cercanos considerados, los pixeles que forman imágenes de dispersores persistentes sobre la base de los valores relacionados con coherencia temporal determinada ( $\gamma_a$ ).

2. El método de la reivindicación 1, donde analizar las propiedades de pares de pixeles cercanos adicionalmente incluye seleccionar un grupo de pixeles inicial en los interferogramas diferenciales generalizados digitales;

donde considerar incluye considerar pares de pixeles cercanos iniciales que pertenecen a dicho grupo inicial;

30 donde calcular incluye calcular, para cada par inicial de pixeles cercanos, valores diferenciales relacionados con la fase correspondiente ( $\delta\phi_{a,i}$ );

donde determinar incluye determinar, para cada par inicial de pixeles cercanos, un valor relacionado con coherencia temporal correspondiente ( $\gamma_a$ ) sobre la base de los valores diferenciales relacionados con la fase correspondiente ( $\delta\phi_{a,i}$ ), de un valor diferencial relacionado con elevación correspondiente ( $\delta h_a$ ), y de un valor diferencial relacionado con velocidad correspondiente ( $\delta v_a$ );

35 donde identificar incluye identificar, entre los pixeles que pertenecen al grupo de pixeles inicial, los pixeles que forman imágenes de dispersores persistentes sobre la base de los valores relacionados con coherencia temporal ( $\gamma_a$ ) determinados para los pares de pixeles cercanos iniciales formando de esta manera un grupo de pixeles que forman imágenes de dispersores persistentes;

40 donde considerar también incluye considerar pares adicionales de pixeles cercanos en los interferogramas diferenciales generalizados digitales, cada par adicional se constituye de un primer pixel respectivo que pertenece al grupo de pixeles que forman imágenes de dispersores persistentes y un segundo pixel respectivo que no pertenece a dicho grupo de pixeles que forman imágenes de dispersores persistentes;

donde calcular también incluye calcular, para cada par adicional de pixeles cercanos, valores diferenciales relacionados con la fase correspondiente ( $\delta\varphi_{a,i}$ );

5 donde determinar también incluye determinar, para cada par adicional de pixeles cercanos, un valor relacionado con coherencia temporal correspondiente ( $\gamma_a$ ) sobre la base de los valores diferenciales relacionados con la fase correspondiente ( $\delta\varphi_{a,i}$ ), de un valor diferencial relacionado con elevación correspondiente ( $\delta h_a$ ), y de un valor diferencial relacionado con velocidad correspondiente ( $\delta v_a$ ); y en donde identificar también incluye:

- identificar, entre los segundos pixeles de los pares de pixeles cercanos adicionales, pixeles adicionales que forman imágenes de dispersores persistentes sobre la base de los valores relacionados con coherencia temporal ( $\gamma_a$ ) determinados para los pares de pixeles cercanos adicionales; y
- 10 • agregar al grupo de pixeles que forman imágenes de dispersores persistentes los pixeles adicionales identificados.

3. El método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, donde procesar las imágenes digitales de Radar de Abertura Sintética (SAR) corregistradas para producir interferogramas diferenciales generalizados digitales incluye seleccionar la imagen maestra entre las imágenes digitales de Radar de Abertura Sintética (SAR) corregistradas; y en donde los interferogramas diferenciales generalizados digitales comprenden un interferograma diferencial digital idéntico de fase cero producido solo sobre la base de la imagen maestra.

4. El método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, donde la imagen maestra es una imagen de referencia sintética.

5. El método de acuerdo con cualquier reivindicación precedente, donde identificar incluye detectar que un pixel dado forma imagen de un dispersor persistente si un valor relacionado con coherencia temporal ( $\gamma_a$ ) determinado para un par de pixeles cercanos que comprenden dicho pixel dado cumple un primer criterio de detección.

20 6. El método de la reivindicación 5, donde detectar que un pixel dado forma imagen de un dispersor persistente comprende detectar que un pixel dado forma imagen de un dispersor persistente si un valor relacionado con coherencia temporal ( $\gamma_a$ ) determinado para un par de pixeles cercanos que comprenden dicho pixel dado es mayor que un primer umbral de detección.

25 7. El método de acuerdo con cualquier reivindicación 1 a 4, donde identificar incluye detectar que un pixel dado forma imagen de un dispersor persistente si los valores relacionados con coherencia temporal ( $\gamma_a$ ) determinados para pares de pixeles cercanos que comprenden dicho pixel dado cumple un segundo criterio de detección.

30 8. El método de la reivindicación 7, donde detectar que un pixel dado forma imagen de un dispersor persistente comprende detectar que un pixel dado forma imagen de un dispersor persistente si los valores relacionados con coherencia temporal ( $\gamma_a$ ) determinados para pares de pixeles cercanos que comprenden dicho pixel dado comprenden un número de valores relacionados con coherencia temporal ( $\gamma_a$ ) mayores que los primeros umbrales de detección respectivos, cuyo número es mayor que un segundo umbral de detección.

9. El método de acuerdo con cualquier reivindicación precedente, donde para un par de pixeles cercanos considerado el valor relacionado con coherencia temporal correspondiente ( $\gamma_a$ ) se determina de acuerdo con la siguiente definición:

$$\gamma_a = \max_{\delta v_a, \delta h_a} \left| \sum_i w_{a,i} e^{j\epsilon_{a,i}} \right|,$$

35 en donde a denota dicho par de pixeles cercanos considerado,  $\gamma_a$  denota dicho valor relacionado con coherencia temporal correspondiente,  $\delta v_a$  denota dicho valor diferencial relacionado con velocidad correspondiente,  $\delta h_a$  denota dicho valor diferencial relacionado con elevación correspondiente, i denota un índice que identifica un interferograma diferencial generalizado digital considerado i-ésimo respectivo entre dichos interferogramas diferenciales generalizados digitales,  $w_{a,i}$  denota un peso dado escogido de acuerdo con un criterio de ponderación dado, y  $\epsilon_{a,i}$  denota una cantidad obtenida al invertir la siguiente ecuación

40

$$\delta\phi_{a,i} = \left[ \frac{4\pi}{\lambda} (T_i \delta v_a + \alpha B_i \delta h_a) + \varepsilon_{a,i} \right]_{2\pi},$$

en donde  $\delta\phi_{a,i}$  denota un valor diferencial relacionado con fase indicador de una diferencia entre las fases interferométricas de dichos pixeles cercanos en el interferograma diferencial generalizado digital considerado i-ésimo,  $\lambda$  denota una longitud de onda en la que se han tomado las imágenes de Radar de Abertura Sintética digital (SAR),  $T_i$  denota un valor inicial temporal asociado con el interferograma diferencial generalizado digital considerado i-ésimo,  $\alpha$  denota un parámetro conocido, y  $B_i$  denota un valor inicial espacial perpendicular asociado con el interferograma diferencial generalizado digital considerado i-ésimo.

5

10. El método de la reivindicación 9, donde el peso dado denotado por  $w_{a,i}$  depende de los valores de amplitud en las imágenes de Radar de Abertura Sintética digital (SAR).

10

11. El método de acuerdo con cualquier reivindicación precedente, comprendiendo adicionalmente:

- determinar valores relacionados con elevación sobre la base de los valores diferenciales relacionados con elevación ( $\delta h_a$ ) con base en los cuales se ha determinado los valores relacionados con coherencia temporal ( $\gamma_a$ ) para pares de pixeles identificados, cada valor relacionado con elevación se asocia con un pixel identificado respectivo y es indicador de una elevación sobre la superficie de la Tierra del dispersor persistente formado por imagen mediante el pixel identificado respectivo; y

15

- determinar valores relacionados con velocidad constante sobre la base de los valores diferenciales relacionados con velocidad ( $\delta v_a$ ) con base en los cuales se ha determinado los valores relacionados con coherencia temporal ( $\gamma_a$ ) para pares de pixeles identificados, cada valor relacionado con velocidad constante se asocia con un pixel identificado respectivo y es indicador de una velocidad constante de desplazamiento sobre la superficie de la Tierra del dispersor persistente formado por imagen mediante el pixel identificado respectivo.

20

12. El método de la reivindicación 11, comprendiendo adicionalmente:

- calcular fases residuales para los pixeles identificados sobre la base de las fases interferométricas de dichos pixeles identificados, de los valores relacionados con elevación determinados, y de los valores relacionados con velocidad constante determinados;

25

- desenvolver las fases residuales computadas;

- filtrar los artefactos atmosféricos de las fases residuales computadas para obtener componente con tiempo no lineales del desplazamiento de los dispersores persistentes formados por imagen mediante los pixeles identificados; y

- determinar los desplazamientos de los dispersores persistentes formados por imagen mediante los pixeles identificados sobre la base de los valores relacionados con velocidad constante determinados y de los componentes de desplazamiento no lineales con el tiempo.

30

13. Aparato de procesamiento configurado para realizar el método para identificar dispersores persistentes reivindicados en cualquier reivindicación precedente.

14. Producto de programa de ordenador que comprende porciones de código que se pueden almacenar en una memoria de un aparato de procesamiento y de tal manera que provoque, cuando se ejecuta, que el aparato de procesamiento se configure para implementar el método para identificar dispersores persistentes reivindicado en cualquier reivindicación 1 a 12.

35

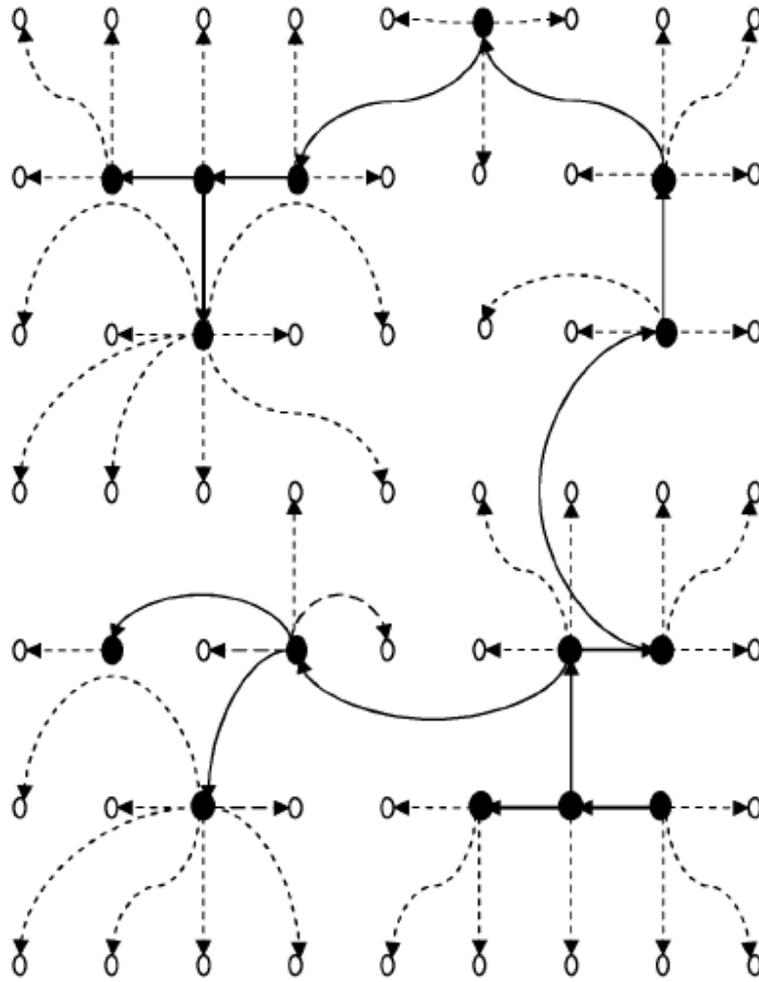


Fig. 1