

Técnicas de interferometría diferencial SAR para la obtención de mapas de deformación del terreno y control de edificios

Óscar Mora*, **, Jordi Mallorquí*, Ricardo Lanari*** y Antoni Broquetas*
toni@tsc.upc.es

* *Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Dept. Teoría del Senyal i Comunicacions (TSC).
Campus Nord UPC D3-211.*

Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, Spain

** *Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC). Unitat de Teledetecció.*

Parc de Montjuïc. 08038 Barcelona, Spain

*** *Instituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA). Consiglio Nazionale delle
Ricerche (CNR). Via Diocleziano, 328 - 80124 Napoli, Italia*

RESUMEN

En este artículo se presentan diversas técnicas para la obtención de mapas de deformación del terreno usando datos SAR (Radar de Apertura Sintética). El primero de los algoritmos estima las componentes lineal y no lineal del desplazamiento, el error del Mapa de Elevación del Terreno (MET) utilizado para eliminar el término topográfico de los interferogramas, y los artefactos atmosféricos. La entrada de datos se compone de un conjunto de Interferogramas Diferenciales de baja resolución espacial y sus correspondientes mapas de coherencia. El algoritmo no tiene restricciones teóricas respecto al mínimo número de interferogramas requerido y las dimensiones de las líneas de base. Sin embargo, los mejores resultados se obtienen con grandes conjuntos de datos de línea de base corta. El algoritmo selecciona aquellos píxeles que presentan una alta coherencia, evitando aquellos afectados por decorrelación temporal. La segunda técnica presentada se encarga de estimar la deformación relativa respecto al terreno de estructuras, tales como edificios. Dicha técnica se basa en el cálculo del residuo obtenido al restar los Interferogramas Diferenciales de baja y alta resolución. Utilizando esta información es posible obtener la evolución temporal de la deformación de puntos coherentes. Los algoritmos presentados han sido validados como datos SAR de los satélites ERS.

PALABRAS CLAVE: SAR, radar, interferometría, subsidencia, deformación.

ABSTRACT

In this paper, advanced techniques for the generation of Terrain deformation maps using SAR (Synthetic Aperture Radar) data are presented. One of the algorithms estimates the linear and non-linear components of the displacement, the error of the Digital Elevation Model (DEM) used to cancel the topographic term from the interferograms, and the atmospheric artifacts. The input data is a set of spatial low resolution Differential Interferograms and their associated coherence images. The algorithm has no theoretical restrictions with respect to the minimum number of required interferograms and their baseline dimensions. However, better results are obtained with large datasets of short baseline interferograms. The algorithm takes advantage of those pixels presenting a good coherence level in the whole set of interferograms, avoiding the rest affected by temporal decorrelation. Another algorithm has been developed to estimate the deformation respect to the ground of structures, such as buildings. The main point is the calculation of the phase residue obtained by subtracting equivalent low and high resolution versions of Differential Interferograms. Using this information it is possible to obtain the deformation evolution of high coherent points, like buildings. These algorithms have been tested with ERS SAR data.

INTRODUCCIÓN

Al generar un interferograma combinando dos imágenes SAR, los incrementos de fase entre píxeles pueden expresarse como:

$$\Delta\Psi_{\text{int}} = \Delta\Psi_{\text{flat}} + \Delta\Psi_{\text{topo}} + \Delta\Psi_{\text{mov}} + \Delta\Psi_{\text{atmos}} + \Delta\Psi_{\text{noise}} \quad (1)$$

donde $\Delta\Psi_{\text{flat}}$ es el término de tierra plana, $\Delta\Psi_{\text{topo}}$ se corresponde con la fase topográfica, $\Delta\Psi_{\text{mov}}$ es la componente debida al desplazamiento del terreno en la dirección slant-range, $\Delta\Psi_{\text{atmos}}$ es la fase relacionada con los artefactos atmosféricos, y $\Delta\Psi_{\text{noise}}$ incluye diversos factores de decorrelación y ruido térmico.

La interferometría diferencial clásica trata de eliminar las componentes conocidas de la ecuación (1) para obtener la fase relacionada con el desplazamiento del terreno. Esto se puede conseguir generando la fase topográfica con la ayuda de un MET externo. Sin embargo, estos interferogramas diferenciales suelen estar seriamente afectados por artefactos atmosféricos, dificultando la obtención de resultados precisos.

Movimientos de áreas extensas

La primera parte de la técnica propuesta considera un modelo lineal de deformación del terreno (Ferretti 2000). Esto significa que se asume que la parte más importante del movimiento es un vector de velocidad constante. El modelo lineal puede ser ajustado a los datos utilizando un conjunto de interferogramas diferenciales con diferentes intervalos temporales. El proceso completo es el siguiente (Mora 2002a):

- Selección de los píxeles basada en su coherencia. Este paso es necesario para eliminar aquellos puntos seriamente afectados por ruido.
- Triangulación entre los píxeles seleccionados. Esto permite trabajar con los incrementos de fase entre puntos cercanos, minimizando los efectos atmosféricos (Hanssen 1998).
- Ajuste de los datos a un modelo lineal de deformación. También se tiene en cuenta la estimación del error en altura del MET utilizado para la eliminación de la componente topográfica de la fase.
- Integración de los resultados obtenidos para cada par de puntos con el fin de estimar la velocidad de deformación absoluta.

Una vez estimada la componente lineal de la deformación, la técnica presentada propone una solución para el cálculo del término no lineal (Mora 2002a). De este modo se puede analizar la evolución temporal del movimiento. Las dos etapas principales del algoritmo propuesto son las siguientes:

- Cálculo del residuo de fase resultante de restar a las fases originales el modelo lineal obtenido anteriormente. Este residuo estará compuesto por el movimiento no lineal, los artefactos atmosféricos y otros términos de ruido.
- Separación de los términos de movimiento no lineal y atmósfera, mediante un filtrado espacio-temporal.

Finalmente, la combinación de las componentes lineal y no lineal del movimiento resultan en una completa descripción de la deformación del terreno durante el periodo de tiempo de observación.

Movimientos de edificios

La técnica propuesta anteriormente está pensada para el control de deformaciones que ocurren a gran escala, por ejemplo mediante el uso de píxeles de 100 m x 100 m. Sin embargo, no es apropiada para el estudio de deformaciones muy localizadas que afecten a edificios aislados. Por lo tanto, se propone un nuevo algoritmo que extiende las capacidades del método anterior utilizando un conjunto de interferogramas diferenciales de línea de base corta para minimizar los efectos de la decorrelación espacial (Mora 2002b). El proceso es el siguiente:

- Se generan dos conjuntos de interferogramas diferenciales del área de interés; uno de ellos con alta resolución espacial (un sólo look) y el otro a baja resolución (multi-look).
- Obtención del residuo resultante de restar las fases de baja resolución a las de alta. Este residuo estará compuesto por el movimiento relativo de las estructuras del tamaño del orden del pixel utilizado en la alta resolución con respecto al terreno sobre el que están instaladas.
- Cálculo de la componente lineal de movimiento de forma similar al algoritmo de áreas extensas.
- Estimación de la componente no-lineal mediante el estudio temporal de los residuos obtenidos de restar el modelo lineal a los datos originales.

Debe destacarse que la información obtenida con las dos técnicas (áreas extensas y edificios) es absolutamente complementaria, y se deben combinar para realizar un estudio completo de la zona de interés.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se han seleccionado dos zonas urbanas para validar los métodos presentados. La primera contiene dos poblaciones rodeadas de bosque y la segunda corresponde a una ciudad con escasa vegetación.

En la primera zona se ha aplicado el algoritmo de áreas extensas. La Figura 1 muestra la deformación lineal y el error del MET obtenidos para una zona de 10 Km x 16 Km usando un conjunto de 28 interferogramas de línea de base corta. Los resultados muestran que prácticamente todos los píxeles seleccionados no presentan deformación. Sin embargo, se ha detectado una pequeña zona en la parte superior de la imagen con problemas de subsidencia (hasta 1.8 centímetros por año en la dirección slant-range). La Figura 2 muestra detalles de dos zonas; la primera afectada por movimiento y la segunda estable.

La Figura 3 muestra la evolución del desplazamiento para los puntos detallados en la Figura 2. Los resultados en el área B concuerdan con las medidas de nivelación precisa realizadas por el *Institut Cartogràfic de Catalunya* (ICC). El área C corresponde a una zona poco edificada de la que no existía aún constancia de subsidencia, poniendo de manifiesto la capacidad de detección precoz de este tipo de problemas mediante la interferometría radar.

Linear deformation map (cm/year)

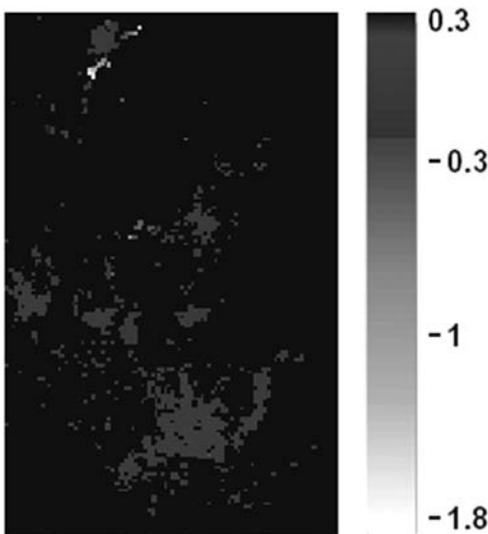


Figura 1. Velocidad (centímetros por año).

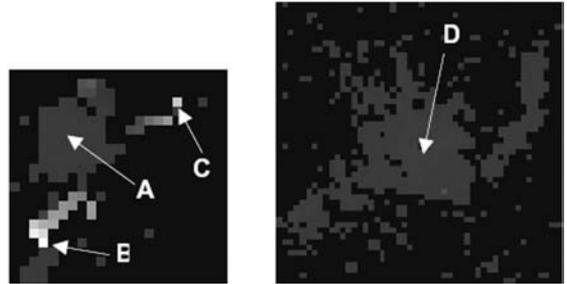


Figura 2. Detalles de dos áreas de interés. Puntos sin deformación (A y D) y puntos afectados por movimiento (B y C).

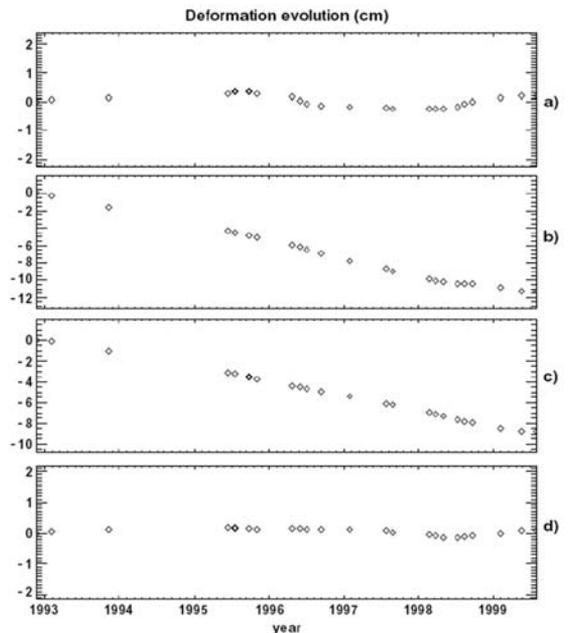


Figura 3. Evoluciones de la deformación para diversos puntos. Puntos estables (a) y (d). Puntos con deformación (b) y (c)

En la segunda zona de estudio correspondiente al casco urbano de una ciudad se ha seleccionado un conjunto de 70 interferogramas de línea de base corta para el estudio de estabilidad de edificios. La Figura 4 muestra detalles de una pequeña área de la ciudad donde se encuentra un edificio metálico (Figura 5). Como validación del método se ha calculado la deformación térmica de la estructura. La Figura 6 muestra la evolución de la deformación para tres puntos del mismo edificio. Todos ellos presentan una alta correlación (mayor que 0.8) con las medidas de temperatura.

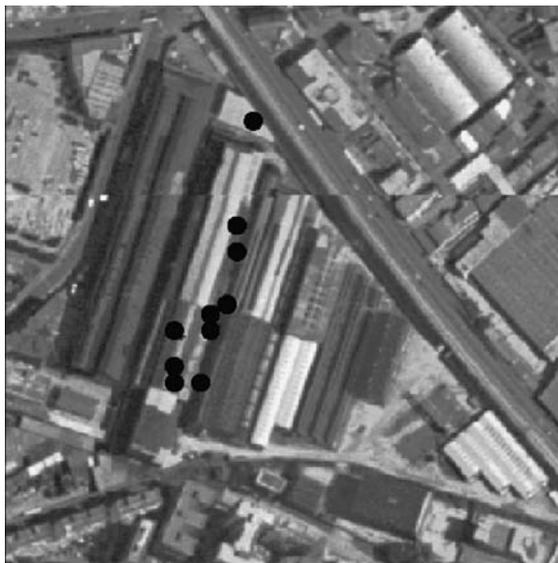


Figura 4. Puntos seleccionados sobre una estructura metálica. Dichas estructuras pueden estar afectadas por una deformación proporcional a los cambios térmicos.



Figura 5. Fotografías del edificio afectado por deformación térmica.

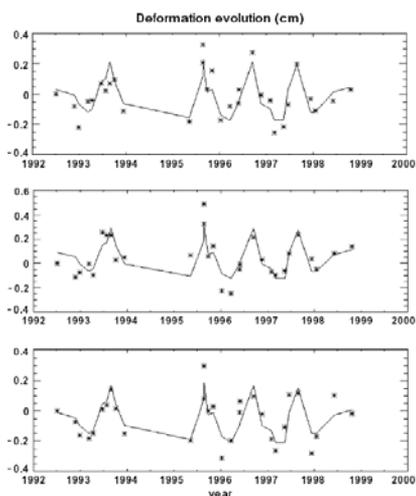


Figura 6. Evolución de la deformación de tres puntos sobre la estructura metálica comparada con la temperatura escalada.

CONCLUSIONES

Se han desarrollado técnicas de Interferometría Diferencial SAR con el objetivo de detectar y controlar movimientos del terreno causados por fenómenos naturales o la actividad humana. Con algoritmos adecuados es posible controlar incluso movimientos y deformaciones de edificios e infraestructuras. Los resultados experimentales obtenidos con los satélites ERS han permitido validar estas técnicas, que son únicas en su capacidad de controlar la estabilidad y los riesgos asociados en grandes extensiones de territorio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Agencia Europea del Espacio (ESA) por proporcionar las imágenes ERS usadas en este trabajo bajo los proyectos EO de categoría 1 (A03.421) y a la CICYT TIC2002-04451-C02-01 por el apoyo económico al proyecto. También quieren agradecer a la Fundación Repsol y al CIRIT por proporcionar la beca pre-doctoral. Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Agencia Espacial Italiana y el Grupo Nacional de Vulcanología Italiano (GNV).

BIBLIOGRAFÍA

- FERRETTI, A., PRATI, C. y ROCCA, F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 38, N.º 5, Septiembre 2000.
- HANSSEN, R. 1998. Atmospheric heterogeneities in ERS Tandem SAR Interferometry. Delft, The Netherlands: *Delft Univ. Press*, 1998.
- MORA, O., MALLORQUÍ, J. J. y DURO J. 2002. Generation of deformation maps at low resolution using differential interferometric SAR data. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2002)*, Toronto, Canada, Junio 24-28, 2002.
- MORA, O., LANARI, R., MALLORQUÍ, J.J., BERARDINO, P. y SANSOSTI, E. 2002. A new algorithm for monitoring localized deformation phenomena based on small baseline differential SAR interferograms. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2002)*, Toronto, Canada, Junio 24-28, 2002.