

ESTIMACIÓN DE LA SUBSIDENCIA EN EL AREA DE OSTRAVA (REPÚBLICA CHECA) UTILIZANDO DATOS ERS SAR CON TÉCNICAS DE INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL

F. Costantini^(*) y A. B. Ruescas^(**).

(*) *Universita di Tor Vergata-ESA/ESRIN, fabiano.costantini@esa.int*

(**) *ESA/ESRIN, Via Galileo Galilei, C.P. 64, 00044 Frascati, Italy.*

RESUMEN

La interferometría derivada de los datos del *Synthetic Aperture Radar* (InSAR) es una técnica que procesa datos radar para producir modelos digitales de elevación (MDE) y para detectar y cuantificar movimientos del terreno como la subsidencia. Estos movimientos pueden tener causas tectónicas, sísmicas o antrópicas. En la región de Ostrava (República Checa), se ha observado niveles de subsidencia causados por la extracción de agua ligada a la minería. En el presente trabajo se han utilizado dos imágenes SAR adquiridas en 1997 y 1998 del satélite ERS-2, que operan en la banda C (5.6 cm). Como resultado se ha obtenido un interferograma diferencial que muestra franjas de fase en relación con la subsidencia en el terreno en diversas áreas de la región. Los resultados se han comparado con trabajos previos y se han detectado las principales fuentes de ruido y error. Éstas son (1) las pérdidas de la coherencia debido a una alta densidad de la vegetación en toda la zona, (2) la falta de correlación temporal, (3) los residuos topográficos debido a la precisión limitada del MDE empleado y (4) factores atmosféricos como la temperatura y las variaciones de vapor de agua en la atmósfera.

ABSTRACT

SAR (Synthetic Aperture Radar) interferometry (InSAR) is a technique that exploits SAR data to produce digital elevation model (DEM) as well as to estimate terrain movements and subsidence (differential interferometry). This subsidence can be caused by tectonic movements, seismic events and human activities. In the region of Ostrava (Czech Republic) land subsidence has been observed caused by water extraction related to coal mining human activities. In the present work two SAR images, acquired in 1997 and 1998, installed on ESA satellite ERS-2 and operating in C band (5.6 cm) have been processed using the differential interferometry technique. The resulting differential interferogram clearly shows the occurrence of this land subsidence in several areas over the region of Ostrava.. Results have been compared with previous works. The main sources of errors are the loss of coherence due to the high level of vegetation all over the area, temporal decorrelation, lack of accuracy of the reference DEM and the atmospheric delay caused by the presence of water vapour and different temperature conditions in the two acquisition..

Palabras clave: SAR, interferometría, subsidencia, MDE.

INTRODUCCIÓN

La geografía de la zona de estudio, centrada en Ostrava (República Checa), es muy variable y comprende una intrincada topografía, desde tierras bajas a altas montañas cuyas cimas más elevadas se encuentran en la zona oeste de las montañas Hrubý Jeseník. El pico más alto alcanza 1491 m (Pradid). Dichas montañas están cubiertas por densos bosques. La industria pesada de la región, la minería, en declive desde la última década, se localiza también en esta zona, dedicada a la explotación de los depósitos de carbón. Múltiples movimientos verticales del terreno han sido observados *in situ* en esta zona: subsidencias de los márgenes de las carreteras, hundimiento de edificios y levantamientos naturales. de origen geomorfológico

El objetivo del trabajo consiste en estimar los hundimientos debidos a los desplomes del terreno a causa de la extracción minera -con una precisión de centímetros- en el curso de un año utilizando pares de imágenes del *Synthetic Aperture Radar* (SAR). En este estudio cualitativo -para llevar acabo un estudio cuantitativo haria falta más pares de imágenes- se ha utilizando dos imágenes SAR del satélite ERS-2 para generar un interferograma (Massonnet y Feigl, 1998). Un satélite SAR puede observar la misma zona con dos ángulos de visión ligeramente diferentes en un intervalo de tiempo determinado. El interferograma SAR se genera haciendo una multiplicación cruzada, píxel por píxel, de la primera imagen SAR compleja por el complejo conjugado de la segunda, así, la amplitud del interferograma es la amplitud de la primera imagen multiplicada por la de la segunda y

su fase es la diferencia de fase entre las dos imágenes (Ferretti *et al.* 2007). La imagen de la coherencia (correlación entre las 2 imágenes) es un subproducto de este proceso y está relacionada con la desviación estándar local de la fase diferencial. Un valor alto de coherencia es indicador de una buena señal con respecto al ruido (*signal-to-noise ratio*, *SNR*) de las imágenes, lo que indica su buena calidad y puede servir al mismo tiempo para clasificar el terreno. El área de estudio está densamente vegetada, por lo que la coherencia esperada es baja comparada con las zonas urbanas de vegetación escasa (Hanssen, 2001).

DATOS

Se utilizan dos imágenes SAR con una diferencia temporal de 280 días y una línea de base (distancia ortogonal) entre ambos satélites de 96.7 m. Las coordenadas del punto central son 49.93° de latitud N y 18.95° longitud E. La imagen *master* (Figura 1) tiene fecha del 22 de octubre de 1997. En dicha figura se representa el coeficiente de dispersión (*backscatter*) medido por el radar. En el sur se observan las formas de relieve del área montañosa con fenómenos de escorzado (*foreshortening*) e inversión por relieve (*layover*). Las ciudades aparecen con tonos más brillantes, debido a su alta rugosidad, mientras que las masas de agua, aparecen en negro. La imagen dependiente o *slave* es del 29 de julio de 1998 y se muestra en la Figura 2. El lago aparece con menor tamaño porque el coeficiente de dispersión ha cambiado debido a variaciones en la superficie del terreno: menos humedad y cambios de cultivos y vegetación durante el verano. Se ha utilizado el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) derivado del SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), la misión topográfica de radar del trasbordador espacial, que operó del 11 al 22 de febrero de 2000. Durante la misión se adquirieron datos topográficos de las masas continentales e islas situados en el campo de visión del radar (SIR-C/X-SAR), con 30 arc-segundos de resolución espacial.

METODOLOGÍA

Para poder obtener un interferograma diferencial del área de estudio, debe seguirse una metodología ya establecida que comienza con la generación de un primer producto interferométrico generado como la simple diferencia de fase entre las dos imágenes radar complejas. Sobre dicho interferograma hay que sustraer la contribución topográfica a la fase, utilizando un modelo de fase generado con un MDE. Ese nuevo interferograma se llama “diferencial” y permite medir las diferencias

de elevación de la superficie del terreno entre las dos adquisiciones. El primer requisito para la generación de un interferograma diferencial es que la distancia perpendicular entre las imágenes sea lo más pequeña posible. En el presente caso es de 96.7 m.

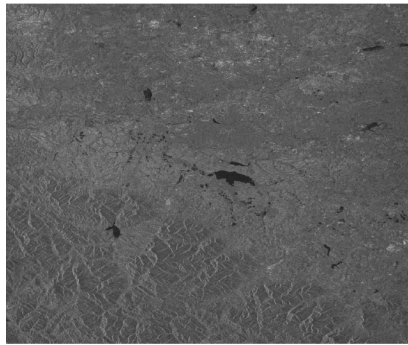


Figura 1. Imagen SAR utilizada como *master* para calcular el interferograma.

Los parámetros a tener en cuenta son:

$$\Delta r = -2 \frac{B_n q_s}{R} \quad (1)$$

donde Δr es la diferencia de elevación, B_n es la línea de base perpendicular, R la distancia entre el radar y el objeto observado y q_s , el desplazamiento entre los píxeles en la línea de visión del satélite.

Para generar un interferograma primero se co-registran los datos utilizando información orbital precisa y los parámetros de adquisición necesarios (tiempo de la adquisición, alcance, etc.). El remuestreo de la imagen *slave* para llevarla a la posición geométrica de la imagen *master* en alcance y azimut se lleva a cabo utilizando un polinomio de coregistro que puede ser implementado utilizando diferentes *kernels* en el software DORIS¹ (Kampes y Hanssen, 2003). En el presente caso hemos usado un *kernel* de convolución cúbica de 6 puntos.

Debido a que la línea de base perpendicular es > 0 , el terreno es observado desde un ángulo de visión ligeramente diferente en ambas imágenes. Esto implica la no superposición exacta del espectro de la imagen *slave* sobre la *master*; que puede corregirse eliminando todas las frecuencias no comunes mediante un filtro, incrementando así el *SNR* del interferograma. Tras la coregistración y el

¹ DORIS: <http://enterprise.lr.tudelft.nl/doris/>

filtrado de las imágenes *master* y *slave*, se calcula la fase interferométrica como el producto complejo conjugado de dos imágenes complejas. Una vez calculado el interferograma complejo se sustrae al elipsoide de fase para eliminar la influencia de la topografía (efecto “tierra plana”). Esto es lo que se conoce como *interferogram flattening* o suavización del interferograma. El resultado es un mapa de fase que contiene la señal de distintas contribuciones: efectos topográficos, de deformación, orbitales y atmosféricos.



Figura 2. Imagen SAR utilizada como dependiente o *slave*.

El interferograma complejo se ha convertido a multi-haz (*multi-look*), con un factor 5 en el azimut y 1 en el alcance. Ello reduce el tamaño de la imagen y aumenta la proporción *SNR* del interferograma a costa de la resolución espacial. Durante la sustracción de la fase de referencia se realiza de nuevo un multi-haz. Esto hace que otra vez se reduzca la resolución ya que a cada píxel corregido le es aplicado un multi-haz de 3 x 3. El interferograma resultante se muestra en la Figura 3. La diferencia de altitud en el terreno entre dos discontinuidades adyacentes se llama altitud de la ambigüedad (h_a), que se define como la diferencia de altura que genera un cambio de fase interferométrica de 2π tras la suavización del interferograma. La altitud de ambigüedad es inversamente proporcional a la línea de base perpendicular (Ecuación 2).

$$h_a = \frac{\lambda R \sin \theta}{2B_n} = \frac{0.056 \cdot 850 \cdot 10^3 \cdot \sin(23)}{2 \cdot 96,7} = 96,16m \quad (2)$$

donde h_a es la altitud de la ambigüedad, $\lambda R \sin \theta$ es la longitud del ángulo de incidencia, y B_n la línea de base perpendicular.

Durante el proceso se genera la imagen de coherencia, que es el coeficiente de correlación cruzada del par de imágenes SAR complejas estimada en una pequeña ventana de unos pocos píxeles en alcance y azimut. El algoritmo implementado en DORIS utiliza una ventana móvil tras la cual se aplica una multi-ventana. Una ventana lo suficientemente grande reduciría la desviación (por ejemplo utilizando una ventana de 64 x 64 píxeles). La coherencia varía entre 0 y 1, desde sólo ruido a ausencia total de ruido. La Figura 4 muestra la imagen de coherencia del área de estudio. Las zonas urbanas tienen elevada coherencia y en el lago ésta es nula. Sin embargo la tendencia de fase no ha sido eliminada antes de la estimación, lo que podría llevar a resultados incorrectos en áreas coherentes que podrían contener dicha tendencia debida, por ejemplo, a la señal topográfica. Este residuo de la señal topográfica se debe al hecho de que la precisión vertical del MDE SRTM utilizando es de 13 m.

RESULTADOS

La coherencia es relativamente baja en el conjunto de la imagen debido a 1 intervalo temporal entre las dos adquisiciones y a la alta densidad de vegetación en la zona. Para eliminar el efecto de la topografía se aplica el MDE SRTM y se obtiene el interferograma diferencial. La contribución de la altitud se sustrae a la fase interferométrica, generando el llamado interferograma diferencial donde por fin puede estimarse el desplazamiento del terreno con una precisión milimétrica. Cada franja interferométrica mide una deformación igual a la mitad de la longitud de onda del radar empleado. En la Figura 5 cada franja corresponde a 2,8 cm de desplazamiento en la línea de visión de la dirección del satélite o alcance, lo que genera una variación interferométrica de fase de 2π .

Como hay un intervalo de 9 meses entre las dos imágenes, se ha calculado un desplazamiento de alrededor de 3,73 cm por año. El MDE SRTM tiene una precisión vertical máxima de 13 m, que corresponde a un máximo de 0.601 franjas, lo que supone un error de desplazamiento en la línea del sensor de $\pm 1,86$ cm. Si se compara este resultado con el desplazamiento máximo de 1 cm/año obtenido en la misma zona mediante la técnica de dispersores permanentes (*Permanent Scatterers*, PS) (Ferretti *et al.* 2001), se obtiene un error entre 1,9 cm y 5.5 cm. Sin tener en cuenta los errores orbitales, las principales causas de error se deben a la señal topográfica residual y a la señal atmosférica.

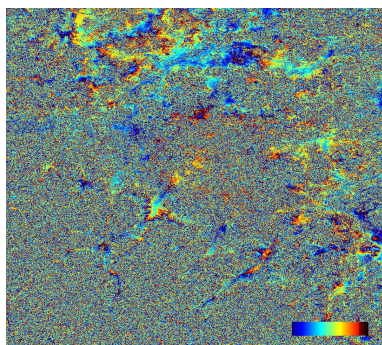


Figure 3. Imagen del interferograma antes de sustraer la topografía (leyenda entre $-\pi$ y $+\pi$).

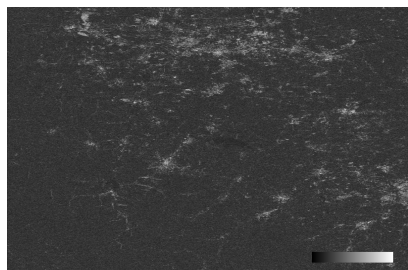


Figure 4. Imagen de coherencia (leyenda entre 0-1).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La extracción de medidas de altitud y deformación mediante interferogramas es una técnica limitada por las desviaciones potenciales debidas a efectos atmosféricos. La variabilidad de las condiciones atmosféricas entre dos adquisiciones puede producir franjas como las de deformación del terreno. Son errores complicados de detectar si sólo se dispone de dos imágenes (un interferograma), por lo que debe contarse con el máximo número de interferogramas posibles en un área para poder corregirlos.

El uso de técnicas de interferometría multitemporal con series de imágenes, como los dispersores permanentes permitiría mejorar los resultados.

A pesar de estas limitaciones, en este trabajo ha sido posible detectar áreas de subsidencia similares a aquellas identificadas con la técnica de PS (Schenk *et al.* 2009), con estimaciones de deformaciones cualitativamente comparables, con las mismas dimensiones y sentido de la

deformación. Una ulterior valoración cuantitativa se hace necesaria.

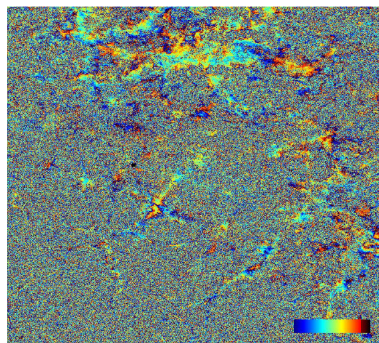


Figura 5. Interferograma diferencial (de 0 a 2.8 cm).

BIBLIOGRAFÍA

Ferretti, A., Monti-Guarneri, A., Prati, C. y Rocca, F., 2007, InSAR principles: Guidelines for SAR interferometry processing and interpretation, ESA Publications, pp. 230.

Ferretti A., Prati C., Rocca, F., 2001, Permanent Scatterers in SAR interferometry, *IEEE Trans. Geo. and Remote Sensing*, January 2001, 8-10.

Hanssen, A., 2001, Radar interferometry interpretations and errors analysis, Ed. Springer, 328.
Schenk, V., Kadlecik, P., Wegmüller, U, Schenkova, Z, Seidlova, Z, 2009, Surface Deformation of Prague and Ostrava-Karviná Areas Determined by PS and Differential Interferometry Products, *TerraFirma 5th User Workshop and Product Training Day*, 25-26 March 2009.

Massonet D., Feigl K. L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface *Reviews of Geophysics* 36,4.

Bert Kampes & Ramon Hanssen & Zbigniew Perski. 2003, Radar interferometry with public domain tools, *Proceedings Fringe 2003*, 1-5 Dec, Frascati.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a ESA por la provisión de las imágenes ERS. Gracias al profesor Dr. Solimini y al Dr. F Sarti por su dirección y supervisión.