

OBTENCIÓN DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO Y DETECCIÓN DE PEQUEÑOS MOVIMIENTOS DE LA SUPERFICIE TERRESTRE MEDIANTE INTERFEROMETRÍA RADAR DESDE SATÉLITE

Daniel Carrasco, Francisco López, Olga Rodríguez, Javier Tena, Daniel Esteban, Antoni Broquetas
Grupo de Ingeniería Electromagnética y Fotónica (D3-EEF). Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones.
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Palabras clave: Interferometría, cartografía, DEM, SAR, Synthetic Aperture Radar, ERS.

Resumen. La interferometría SAR es una técnica que mediante la combinación coherente de imágenes radar de alta resolución de la superficie terrestre permite obtener patrones de interferencia de fase, los interferogramas, directamente relacionados con la geometría de la escena (el relieve). Un tratamiento posterior que involucra procesos críticos como un desenrollado de fase bidimensional y una georeferenciación considerando las efemérides del satélite y un modelo preciso de la superficie terrestre (datum) permite obtener - con algunas restricciones - un modelo digital del elevaciones del terreno (DEM) con precisiones en altura del orden de 10 m rms. Un segundo grupo de aplicaciones es la medida de pequeños movimientos de la superficie terrestre con una precisión por debajo del centímetro; estas aplicaciones diferenciales son las que han permitido estudiar el efecto de la atmósfera en los interferogramas SAR. En el artículo se muestran resultados obtenidos a partir de imágenes ERS-1 y ERS-2 de Tarragona.

I. Introducción.

Desde hace unos años, gracias a los dos satélites de teledetección radar de la Agencia Espacial Europea, el ERS-1 (1991) y el ERS-2 (1995), se dispone de imágenes de la superficie terrestre en la banda de microondas. Estos satélites incorporan un sensor activo, el radar de apertura sintética (SAR), capaz de obtener imágenes coherentes de alta resolución de la reflectividad del terreno. Por su propia naturaleza de sensor activo en banda C, al contrario que las imágenes ópticas, las imágenes adquiridas por el SAR no están limitadas por las condiciones atmosféricas o de iluminación diurna. Adicionalmente, el posicionamiento del satélite en una órbita polar baja permite tener una cobertura global.

La interferometría explota la naturaleza coherente de las imágenes SAR. Combinando las fases de dos imágenes de una misma tomadas desde posiciones diferentes es posible generar patrones de interferencia directamente relacionados con la geometría de la escena, es decir con el relieve, lo que puede ser utilizado para la obtención de modelos digitales del terreno [1][3][9][11]. Adicionalmente, la fase contiene también información sobre pequeños movimientos de la escena que es de gran utilidad en estudios de subsidencia.

II. Formación del interferograma.

Restando las fases de dos imágenes de la misma zona, tomadas desde puntos de vista ligeramente diferentes y suponiendo que el retardo de fase introducido por el blanco es el mismo en los dos casos, se obtiene un diagrama de fases asociado únicamente a la diferencia de caminos satélite-suelo-satélite entre las dos imágenes. Este patrón de interferencia, el interferograma, está claramente relacionado con la geometría de la escena. La figura 1 muestra un detalle de la geometría de observación. Se ha representado un plano perpendicular a la dirección de vuelo del satélite y en él se han señalado las dos posiciones de los satélites S1 y S2 y dos puntos sobre el suelo P1 y P2. Explotando la geometría del dibujo se puede relacionar la diferencia de fase $\Delta\psi$ en el interferograma de los dos puntos P1 y P2 con su diferencia de alturas mediante una aproximación de Taylor de primer orden, dando lugar a la siguiente relación [9]:

$$\Delta\psi = \frac{4\pi}{\lambda r_0} n_s n_p$$

La expresión anterior ya permite relacionar la fase interferométrica con la altura si se trabaja sobre el sistema de coordenadas definido por \mathbf{r} y \mathbf{n} , que son la dirección de apuntamiento y la normal respectivamente.

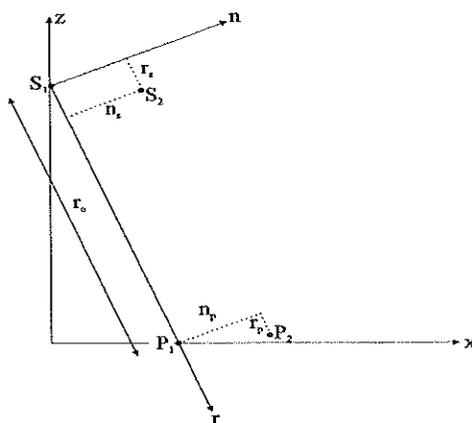


Figura 1: Geometría de la escena.

Para obtener alturas referidas sobre el plano horizontal x es necesario llevar a cabo la corrección de Tierra plana, que consiste en suprimir la fase que generaría una superficie sin relieve. Por sencillez, se puede aproximar este paso por la substracción de un término lineal de fase. La fase interferométrica obtenida finalmente es [9]:

$$\Delta\psi' = \frac{4\pi}{\lambda r_0} n_s \frac{\Delta h}{\sin(\theta)} \quad (2)$$

siendo θ el ángulo de incidencia off-nadir. Esta expresión relaciona la diferencia de fase $\Delta\psi'$ entre dos puntos del interferograma corregido con su diferencia de alturas sobre el terreno Δh . Por lo tanto se observa una proporcionalidad entre la diferencia de altura y la diferencia de fase. La constante de proporcionalidad, para una plataforma orbital determinada, está gobernada por la línea de base perpendicular n_s , que no es más que la separación entre satélites proyectada sobre la perpendicular a la dirección de iluminación.

En las figuras 2 y 3 se muestra una imagen de amplitud y su interferograma correspondiente. La línea de base es de 100 m. Se han utilizado imágenes de los satélites ERS-1 y ERS-2. La zona corresponde al río Ebro a su paso por Tortosa.

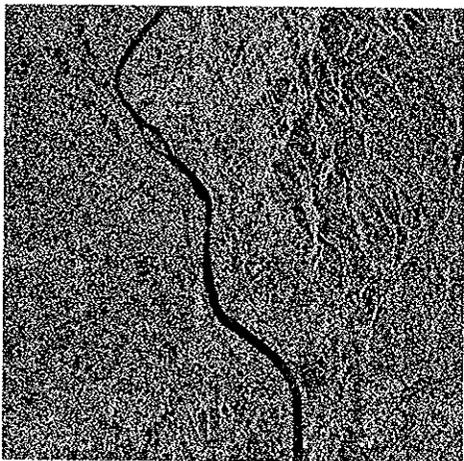


Figura 2. Módulo de una de las imágenes SAR.

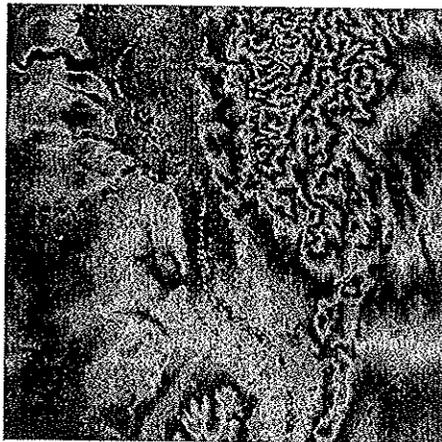


Figura 3. Interferograma con corrección de Tierra plana.

III. Desenrollado de fase.

La proporcionalidad entre alturas y fases manifestada en la expresión (2) sólo se sostiene cuando la fase está desenrollada, es decir cuando se ha recuperado el número entero de vueltas 2π que inicialmente se pierde debido a la naturaleza cíclica de la fase. El desenrollado de fase, que en este caso es un problema evidentemente bidimensional, puede verse dificultado por problemas debido a decorrelación temporal de las imágenes o simplemente por muestreo deficiente de la superficie [5].

El problema del desenrollado de fase es uno de los puntos críticos en el procesado interferométrico [5][7]. Para recuperar el número entero de ciclos 2π perdidos se debe realizar una integración. La hipótesis básica es que no haya discontinuidades en el terreno que se traduzcan en saltos de fase superiores a π . Esto no siempre se cumple y existen diversos métodos de desenrollado para luchar contra este problema que obtienen mejores o peores resultados. Entre otros están los métodos de integración directa evitando discontinuidades (método de los residuos) [5], los métodos LMS que tratan la escena globalmente [4][10], y los métodos con múltiples imágenes [6]. En cualquier caso, cuanto mayor sea la línea de base o la separación entre los satélites, un ciclo completo de fase de 0 a 2π corresponderá a menos metros de altura, con lo que en el interferograma aparecerán más franjas y será más difícil de desenrollar. En particular, en las zonas montañosas el problema puede llegar a ser muy difícil de resolver, ya que se ve agravado por las deformaciones de las imágenes SAR (layover, foreshortening y sombra).

En la figura 4 se muestra el interferograma anterior desenrollado utilizando técnicas LMS [4].

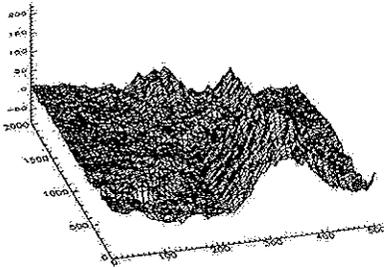


Figura 4. Fases desenrolladas.

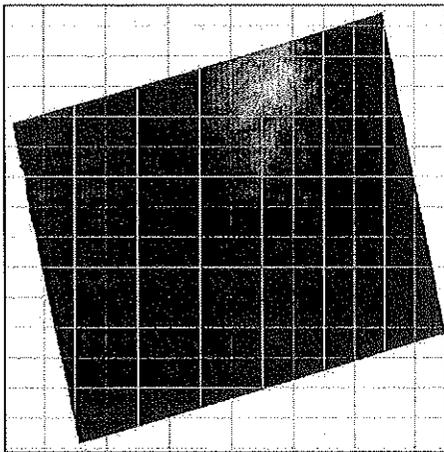


Figura 5. DEM georreferenciado sobre malla UTM.

IV. Conversión a alturas y georreferenciación.

Una vez se ha desenrollado la fase, el siguiente paso es la conversión a alturas. No se utilizarán las expresiones (1) y (2), únicamente válidas desde un punto de vista didáctico, sino que se empleará una aproximación de orden superior para evitar la propagación de errores al trabajar con áreas extensas. La conversión de fase a alturas se hará aplicando un modelo cúbico cuyos coeficientes se irán actualizando a medida que nos desplazamos sobre la escena. Será necesario un punto de control ya que las alturas obtenidas a partir del interferograma son flotantes y no están referidas a ningún punto. En todo el proceso se utilizará información precisa de las efemérides del satélite y un datum local para modelar la superficie terrestre.

Finalmente, una vez conocidas las alturas sobre elipsoide para cada uno de los puntos de la imagen SAR, es necesario un proceso de georreferenciación que compense

las deformaciones propias de la imagen radar. Tras este proceso se tendrá un modelo digital de elevaciones del terreno sobre una malla UTM. En este proceso, se hace uso de nuevo de la información orbital del satélite, del datum local y de las correcciones entre altura ortométrica sobre el geode y la altura elipsoidal. La figura 5 muestra el DEM final obtenido georreferenciado sobre una malla UTM con un paso de 1 Km.

V. Interferometría diferencial.

La expresión (1) evidenciaba la relación existente entre la fase interferométrica y la altura. Sin embargo, pueden aparecer términos adicionales de fase si la escena sufre una pequeña deformación entre las dos adquisiciones. Este movimiento dará lugar a una ligera modificación de la distancia radar-suelo y en este caso, el SAR se comportará como un interferómetro de distancia capaz de resolver movimientos con una precisión del orden de la longitud de onda en la dirección de observación del satélite[6][8].

La fase debida al movimiento del terreno aparecerá superpuesta a la debida al relieve. Para cancelar este último término se pueden utilizar pares de imágenes con una separación entre satélites tan pequeña que la fase quede completamente desensibilizada frente a las alturas del terreno, es decir, que un ciclo completo de fase corresponda a muchísimos metros de altura. Normalmente, este procedimiento no es útil porque la separación entre los satélites no es un parámetro directamente controlable por el usuario y rara vez suele ser tan baja. Como alternativa, se puede utilizar un DEM previamente existente -puede ser utilizado incluso uno obtenido por interferometría- para cancelar la componente de fase debida al relieve y evidenciar aquella que es debida únicamente al movimiento.

Las resoluciones alcanzables por interferometría diferencial están por debajo del centímetro. Este hecho, unido a la capacidad de obtener datos sobre grandes áreas la convierte en una herramienta de grandes posibilidades de cara al estudio de corrimientos de tierra, hundimientos producidos por explotaciones mineras, etcétera. Yendo un poco más lejos y aprovechando la disponibilidad periódica de las imágenes SAR (cada 35 días) es incluso posible su utilización para la medida de subsidencia en zonas de elevado riesgo sísmico o volcánico para la prevención de desastres naturales.

VI. Efectos atmosféricos y técnicas de múltiple imagen.

Con el fin de simplificar el proceso de desenrollado de fase, se pueden combinar varios interferogramas con diferente línea de base y por tanto con diferente correspondencia entre ciclos de fase y altura para romper las ambigüedades o inconsistencias producidas por discontinuidades del terreno o ruido por decorrelación

temporal. La idea fundamental es utilizar un interferograma de línea de base corta, con pocas franjas, y por lo tanto fácil de desarrollar para obtener una primera aproximación del relieve. Este primer DEM será utilizado - al igual que en las técnicas de interferometría diferencial - para simplificar el interferograma de línea de base larga y así obtener la precisión de alturas que éste proporciona. Sin embargo, la aplicación de esta técnica ha puesto de manifiesto la existencia unos problemas inesperados que al mismo tiempo abren la vía para nuevas aplicaciones. En particular, se trata de la atmósfera que hasta ahora no se había tenido en cuenta. Dado que las imágenes SAR no son adquiridas simultáneamente, las condiciones de propagación son diferentes en cada una de las dos imágenes. En particular, la diferente concentración de vapor de agua (atmósfera húmeda) da lugar a la aparición de ciclos de fase adicionales por variación del camino eléctrico. Este efecto diferencial debido a la atmósfera dificulta el proceso de obtención de DEMs ya que obliga a la utilización de múltiples imágenes para eliminarlo [2]. En aplicaciones de interferometría diferencial no supone problema ya que es más fácil de detectar.

Por otra parte, hay que decir que los efectos diferenciales debidos a la atmósfera abren nuevas vías de estudio de ésta ya que la interferometría va a permitir la obtención de "imágenes instantáneas" sobre áreas de 100x100 Km donde antes sólo se tenía información puntual muy localizada procedente de sondeos o medidas GPS.

V. Conclusiones.

La interferometría SAR se ha convertido en una de las mayores aplicaciones de los satélites ERS. La combinación de pares de imágenes para la obtención de modelos digitales del terreno se comienza a perfilar como un complemento de las tradicionales técnicas estéreo-ópticas, si bien aún quedan temas por terminar de estudiar como el efecto de la atmósfera y algunos problemas como la decorrelación temporal que quedarían resueltos con una misión dedicada. Por otra parte, la interferometría diferencial puede ser ya utilizada como una herramienta muy poderosa en las medidas de subsidencia y en la prevención de desastres naturales.

Agradecimientos.

Los autores desean expresar su agradecimiento al Institut Cartogràfic de Catalunya por proporcionar los DEMs utilizados en las comparaciones y a Román Arbiol, Manuel Castillo y Vicenç Palà por las numerosas y fructíferas reuniones sostenidas sobre el tema. También expresan su agradecimiento al ERS FRINGE WORKING GROUP de la Agencia Espacial Europea por haber proporcionado las imágenes de trabajo en el marco del proyecto TANDEM AO2/E105. Este trabajo ha sido

financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología CICYT - TIC 96-0879 y por INDRA Espacio.

Referencias

- 1 Carrasco, D. et al. Accuracy assessment of SAR interferometry using the ERS-1. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Florencia 1995.
- 2 Carrasco, D. et al. Interferometría radar para la obtención de modelos digitales del terreno. Posibilidades y limitaciones. Actas de la 3ª Semana Geomática de Barcelona, pp. 143-154, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, 8 al 11 de abril, 1997.
- 3 Carrasco, D. The development of a wide area interferometric processor. FRINGE 96, ESA workshop on applications of ERS SAR interferometry, Zurich 1996.
- 4 Ghiglia, D. et al. Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 11, nº1, Enero 1994.
- 5 Goldstein, R. et al. Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping. Radio Science, vol. 23, nº 4, Julio 1988.
- 6 Massonnet, D. et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. Nature, vol. 364, nº. 6433, 8 de Julio de 1993.
- 7 Massonnet, D. et al. Reduction of the Need for Phase Unwrapping in Radar Interferometry. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 34, nº 2, marzo 1996.
- 8 Massonnet, D. Interferometría de radar por satélite. Investigación y Ciencia, abril 1997, pp. 14-21.
- 9 Pratti, C. et al. Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images. Int. J. Remote Sensing, 1990, vol. 11, nº 12.
- 10 Pritt, M. Phase Unwrapping by Means of Multigrad Techniques for Interferometric SAR. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 43, nº 3, mayo 1996.
- 11 Zebker, H. et al. Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 32, nº 4, julio 1994.