

APLICACIONES DE LA TECNOLOGIA INSAR A LA CARTOGRAFÍA

R. ARBIOL, V. PALÀ, F. PÉREZ, M. CASTILLO Y M. CROSETTO

arbiol@icc.es

Institut Cartogràfic de Catalunya
Parc de Montjuïc 08038 Barcelona

RESUMEN: En este trabajo se presentan diversas aplicaciones cartográficas realizadas por el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) con sensores de observación de la Tierra basados en microondas: la obtención de Modelos de Elevación del Terreno y de mapas de subsidencia.

Palabras clave: tecnología SAR, interferometría, topografía, Modelos de Elevación del Terreno, análisis de subsidencias

ABSTRACT: In this paper some cartographic applications performed at ICC using microwave Earth observation sensors are presented: the computation of Digital Elevation Models and surface deformation maps.

Keywords: SAR technology, interferometry, topography, Digital Elevation Model, subsidence analysis

LA INTERFEROMETRÍA SAR

La tecnología de imagen SAR es reconocida como una herramienta muy prometedora para la captura de información cartográfica porque utiliza sensores activos y las nubes son básicamente transparentes en esta parte del espectro electromagnético. En particular, la interferometría con imágenes SAR ha demostrado su capacidad para proporcionar información suplementaria respecto a los sensores ópticos tradicionales.

Actualmente, la interferometría SAR es una de las aplicaciones de las imágenes radar que presenta más perspectivas de futuro en cuanto a su aplicación a la extracción de topografía. Por ello, existe en la literatura un gran número de trabajos que describen con detalle y desde el punto de vista teórico cada uno de los procesos necesarios para generar modelos numéricos de elevaciones del terreno con esta técnica. Como trabajos relevantes en este ámbito podemos citar a Gabriel y Goldstein (1988), Goldstein *et alii* (1988), Prati y Rocca (1990) y Prati *et alii* (1990); y como referencia a anteriores trabajos nuestros: Castillo y Arbiol (1995) y Arbiol *et alii* (1995).

En la interferometría SAR se utilizan dos imágenes de una misma escena, ya sea tomadas por dos antenas separadas espacialmente o bien dos observaciones separadas en el tiempo tomadas con una sola antena. En el caso del satélite ERS-1 se utilizan dos pasadas del satélite por la misma órbita nominal. Como las dos pasadas no son exactamente iguales, debido a la existen-

cia de perturbaciones orbitales, las ondas reflejadas por el terreno recorren diferente caminos. Esta diferencia de recorrido de la señal puede cuantificarse midiendo la diferencia de fases de las ondas. La altura de cada punto introduce también una diferencia de camino en las ondas observadas en las dos imágenes. Por tanto, para derivar la información altimétrica se utiliza la diferencia de fase de las ondas observadas desde cada una de las posiciones orbitales.

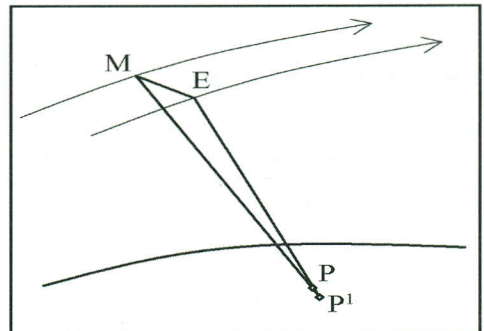


Figura 1. Geometría de la interferometría SAR.

Cuando el punto en el suelo se mueve de P a P^I (Figura 1) entre las dos tomas de imagen, la diferencia de fase, o fase interferométrica, $\Delta\Phi_{Int}$ es:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{Int} &= \Phi_E - \Phi_M \\ &= \frac{EP - MP}{\lambda} + \frac{EP^1 - EP}{\lambda} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Noise} \\ &= \Phi_{Topo} + \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Noise} \end{aligned}$$

Siendo Φ_E, Φ_M las fases de las imágenes secundaria y principal; E, M las posiciones del sensor en las imágenes secundaria y principal; EP, MP distancias de P a E, M ; EP^1 la distancia de E a P^1 ; λ es la longitud de onda del radar; Φ_{Topo} es la componente de fase debida a la topografía del terreno; Φ_{Mov} es la componente de fase debida al movimiento del terreno; Φ_{Atm} es la componente de fase introducida por la atmósfera; Φ_{Noise} es el ruido de fase.

Generación del DEM

Si no existe deformación entre las dos pasadas ($\Phi_{Mov} = 0$), la componente de fase debida a la atmósfera es despreciable ($\Phi_{Atm} \approx 0$) y el ruido de fase es menor que la componente de fase debida a la topografía del terreno ($\Phi_{Noise} \ll \Phi_{Topo}$), entonces a partir de Φ_{Topo} es posible derivar información de la topografía del terreno, generando un DEM de la zona. La sensibilidad en la determinación de la altimetría depende de la separación espacial (línea de base) entre las órbitas desde las que se captaron las dos imágenes que se utilizan para establecer la interferometría. Con una separación de 100 m, una transición de fase de 2π conduce a un cambio de altura del orden de 100 m. Es posible utilizar líneas de base mayores, pero el aumento del ruido y la disminución de la coherencia entre las imágenes dificulta en gran medida el desenrollado posterior de la fase.

Control de movimientos del terreno

Si la topografía del terreno es conocida (disponemos de un DEM de la zona), entonces se puede calcular la componente de fase generada por la topografía Φ_{Topo} y restarla de la fase interferométrica $\Delta\Phi_{Int}$, obteniéndose la fase interferométrica diferencial:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{D-Int} &= \Delta\Phi_{Int} - \Phi_{Topo} \\ &= \Phi_{Mov} + \Phi_{Atm} + \Phi_{Res_Topo} + \Phi_{Noise} \end{aligned}$$

donde Φ_{Res_Topo} representa la componente de fase residual debida a errores en el DEM utilizado.

Si ambas Φ_{Atm} y Φ_{Res_Topo} son despreciables y el ruido de fase es menor que la componente de fase debida a los movimientos del terreno ($\Phi_{Noise} \ll \Phi_{Mov}$), entonces, a partir de Φ_{Mov} es posible derivar información sobre los movimientos del terreno, generando un mapa de defor-

maciones de la zona. La sensibilidad de la medida del movimiento no depende en este caso de la separación espacial entre las imágenes. Una transición de fase de 2π conduce a un movimiento de una longitud de onda, en este caso de 5,7 cm.

Naturalmente estamos obviando en estos cálculos la componente atmosférica, que puede ser muy importante en algunos casos, así como el propio ruido de la señal.

En cualquier caso, el proceso interferométrico de imágenes SAR es muy semejante en ambos casos, solamente al final deberán interpretarse las variaciones de fase desenrolladas como alturas o como variaciones de distancia.

Ajuste del modelo geométrico

Es deseable que cualquier información que se derive de las imágenes SAR se pueda representar en un sistema de referencia cartográfico. Para ello, las funciones que transforman las coordenadas imagen en coordenadas cartográficas del terreno y viceversa se deben determinar previamente. Como muchos de los parámetros que aparecen en las funciones no se conocen con precisión o son desconocidos, tanto en el caso aerotransportado como en el de satélite, es necesario realizar un ajuste de los mismos. Este proceso usualmente utiliza puntos de control identificados sobre el terreno (Palà y Corbera, 1993).

Proceso interferométrico

Una vez ajustado el modelo geométrico, el siguiente paso consiste en generar la imagen interferométrica. Para ello se escoge una de las imágenes como soporte del interferograma (imagen principal) y sobre ella se registra la imagen secundaria. Para ello se utilizan puntos de registro obtenidos utilizando la coherencia compleja de las señales. De forma similar a la correlación estándar, los puntos de registro son aquellos que maximizan la coherencia, pero en este caso se utiliza tanto la amplitud como la fase de la onda (coherencia compleja). A continuación, sobre la imagen principal se genera el interferograma, multiplicando punto a punto la señal de la imagen secundaria por la señal compleja conjugada del punto correspondiente de la imagen "master".

Dado que en la extracción de las fases se invierten funciones trigonométricas, el valor de las fases se obtiene con ambigüedad en el número de ciclos. Esto hace que la imagen interferométrica consista en una serie de franjas claras y oscuras en el rango $(-\pi, +\pi)$ moduladas por la influencia del relieve del área observada. Así, para derivar correctamente la altura de cada punto, hay que reconstruir las diferencias de fase que se observan en el interferograma. Es necesario obtener el número de ci-

culos sin ambigüedad de tal modo que la imagen interferométrica sea continua y no presente franjas. A esta reconstrucción se le denomina desenrollado de la fase (*phase unwrapping*), y es el procedimiento clave en todo el proceso interferométrico.

Finalmente, con el interferograma reconstruido se genera el DEM. Para ello se invierte el modelo geométrico ajustado de la imagen principal teniendo en cuenta las diferencias de fase reconstruidas. De esta forma, se obtiene el DEM georeferenciado.

APLICACIONES DE LA INTERFEROMETRÍA DE SATÉLITE

Aunque se han descrito aplicaciones interferométricas con otros satélites (Radarsat, JERS), la mayoría de trabajos utilizan las imágenes de los satélites ERS de la ESA. La disponibilidad de amplios catálogos de imágenes y una órbita muy bien controlada han permitido demostrar ampliamente la viabilidad de esta técnica. En este caso se utiliza la interferometría de múltiples vistas, que tiene sus inconvenientes (pérdida de coherencia, artefactos de fase provocados por la atmósfera, etc.). En las aplicaciones cartográficas de la interferometría SAR realizadas en el ICC se han utilizado principalmente imágenes SAR obtenidas por los satélites ERS.

Mención aparte merece la misión SRTM de la NASA como ejemplo de sensor interferométrico de un solo paso. Las restricciones en la distribución de imágenes y problemas técnicos asociados a su orientación han limitado considerablemente su uso. En consecuencia no existen muchos trabajos que describan sus prestaciones.

Vamos a ver dos ejemplos de aplicación a la cartografía con imágenes ERS. En el primer caso se trata de extraer información altimétrica mediante interferometría, a partir de imágenes del satélite ERS-1. Se utilizaron imágenes complejas (formato SLC), 3 ascendentes y 2 descendentes, sobre Tarragona con las que se generaron tres interferogramas: dos con las imágenes ascendentes y uno con las descendentes.

Para el ajuste simultáneo de la geometría de las imágenes se utilizaron puntos de control extraídos de la cartografía y puntos de registro obtenidos empleando la coherencia compleja entre las diferentes imágenes que forman cada par interferométrico. El ajuste simultáneo de las cuatro imágenes determinó los siguientes residuos de error:

Sobre puntos de control:

RMSX: 1.32 píxeles

RMSY: 1.26 píxeles

Sobre puntos homólogos:

RMSX: 0.65 píxeles

RMSY: 0.72 píxeles

En el modelo geométrico no se ajustaron los parámetros relacionados con la órbita, ya que para estas imágenes se conocía con suficiente precisión.

Una vez realizado el proceso de fase se comparó el DEM obtenido con el DEM de referencia y se obtuvo un RMS para toda el área de prueba de 15 m. En zonas con relieve suave el error está por debajo de los 5 metros pero en las zonas con relieve abrupto se obtienen errores del orden de 10-25 metros. También aparecen zonas con errores muy altos, del orden de 100 m, pero no son muy abundantes a la vista del RMS y están muy localizadas, fundamentalmente de zonas en las que se observa la presencia de *layover*, que provoca imprecisiones en el proceso de reconstrucción de las diferencias de fase.

Otra causa de error, pero que sólo se hace patente en grandes áreas, es el error asociado a efectos atmosféricos. Si bien los efectos atmosféricos son inobservables en la imagen de amplitud, tienen su efecto en la fase. Hoy por hoy, parece que el problema de la componente atmosférica sólo se puede resolver obteniendo un número de pares estadísticamente significativo para poder eliminar su efecto.

Una segunda aplicación de las imágenes ERS ha sido la determinación de movimientos de subsidencia. En una zona pequeña, situada en un barrio de Sallent, en el centro de Cataluña, se han detectado y medido (mediante redes de nivelación) movimientos de subsidencia que alcanzan algunos centímetros por año y que están afectando a la habitabilidad de las edificaciones de la zona. Para poder comparar las medidas realizadas en el campo con las observaciones de satélite, se adquirieron 7 imágenes ERS-1/2 con diferentes separaciones temporales y espaciales. Algunos de los pares utilizados presentaban ruido de fase provocado por la atmósfera, por lo que fueron eliminados del análisis. La relativamente larga distancia en el tiempo de los pares de imágenes provocó también una decorrelación casi total de la información fuera de las zonas urbanas, pero permitió obtener un grado de coincidencia sorprendente de las deformaciones medidas (Figura 2). Además, la aplicación de la interferometría diferencial permitió detectar que este mismo movimiento también se producía en diferentes poblaciones, lo que permitirá planificar una campaña de medidas geodésicas para corroborar dicha observación. Aún más, la existencia de un número considerable de imágenes ERS en catálogo nos permite analizar hacia atrás el fenómeno y determinar si el movimiento empezó recientemente o si se está acelerando.

Están en estudio algunas propuestas metodológicas para extender estos resultados fuera de las zonas urbanas. De hecho, en zonas teóricamente incoherentes existen algunos puntos que mantienen su coherencia. Son

los denominados *Permanent Scatterers* de los cuales sí podemos analizar su evolución de fase (Ferretti *et alii*. 2001). Si se encuentran suficientes de ellos en una zona podrían tratarse de la misma forma que una red geodésica y obtener valores de movimiento en zonas presentamente incoherentes.

APLICACIONES DE LA INTERFEROMETRÍA AEROTRANSPORTADA

La demostración de las aplicaciones de la tecnología SAR empezó, como en otros casos, sobre plataformas aerotransportadas hace ya bastantes años. En cualquier caso, las aplicaciones cartográficas han tardado más en desarrollarse, posiblemente debido a las dificultades existentes en la orientación y el posicionamiento preciso de los sensores. Actualmente existe una serie de instrumentos experimentales y no menos de tres sensores de aplicación comercial. La ventaja obvia de los sensores aerotransportados es una mayor resolución y una mejor calidad de los datos obtenidos. En casi todos los casos se trata de equipos que trabajan con dos antenas y, por tanto, captan la doble imagen simultáneamente.

La aplicación de estos sensores se ha demostrado eficiente para la cartografía de zonas con una significativa cobertura de nubes o en zonas relativamente planas y con poca textura, poco propicias para el análisis estereoscópico de imágenes de sensores ópticos.

Hace pocos años, la autoridad cartográfica de Venezuela se planteó el desafío de cartografiar una región de 266616 km² al sur del país, entre el río de Orinoco y la frontera brasileña. La topografía es montañosa, con pocas áreas planas y elevaciones de fuerte pendiente emergiendo del llano. La zona está básicamente cubierta por selva tropical, con árboles de hasta 40 o 50 m.

La cartografía existente incluía un mapa topográfico a escala 1:500000 y un mapa de imagen SLAR a escala 1:250000, los cuales presentaban grandes inexactitudes. Podían considerarse útiles para entender el marco geográfico pero difícilmente para las tareas de planificación o el control del medio ambiente.

Tras un concurso internacional de ofertas para la realización del proyecto se seleccionó la propuesta del ICC, basada en la utilización de la interferometría aerotransportada de un solo paso, como la mejor técnica para cartografiar a la escala 1:50000 la región situada al sur de Venezuela en un plazo de tiempo razonable.

El sensor InSAR seleccionado fue el AeS-1 diseñado y fabricado por la empresa AeroSensing GmbH. Este es un sensor de doble antena en banda X instalado en un avión Aerocommander especialmente modificado para albergar el sensor (Moreira, 1996).

Los productos cartográficos a generar incluían ortoimágenes digitales con píxel de 5 metros, un mode-

lo de elevaciones del terreno muy denso, también de 5 metros de resolución (Figura 3), y el conjunto de curvas de nivel, con contorno de 40 metros, a derivar a partir del DTM. El número total de hojas a publicar era de 536.

El sistema AeS-1 utiliza los datos de posición del GPS y de actitud del INS para georreferenciar las imágenes, combinándolos con los propios datos interferométricos.

Se realizó una campaña de campo complementaria para el posicionamiento de reflectores en puntos medidos con mucha precisión. Dichos reflectores se orientan hacia el sensor durante el paso del avión por la zona y el resultado es muy visible en la imagen radar, lo que permite la comparación de medidas efectuadas sobre la imagen y sobre el campo. Finalmente se utilizaron 31 reflectores.

La campaña del vuelo duró 99 días en total, con 66 días reales de vuelo. La campaña se realizó desde 3 bases diferentes situadas en la zona de estudio, pero la infraestructura disponible es tan escasa que fue necesario adquirir, transportar y almacenar todo el material complementario (comida, bebida, combustible, etc) lo que complicó extraordinariamente la logística.

El volumen total de datos generados durante el proyecto fue de 16 TB. El proceso de los datos se dividió en dos partes. El primer paso consiste en la reconstrucción de los valores de intensidad y fase a partir de las informaciones en bruto obtenidas por las dos antenas. Esta es la parte más costosa en tiempo de cómputo y se diseñó una configuración de ordenadores distribuidos en red para realizarla. También incluía la generación del interferograma y su desenrollado. El segundo paso consiste en la calibración de la fase y el cálculo de las elevaciones del terreno, a partir de la cual las pasadas de vuelo son corregidas geoméricamente y ensambladas conjuntamente en un proceso de mosaico, tanto las imágenes de intensidad como las del modelo de elevaciones. La medida de calidad planimétrica y altimétrica sobre los reflectores situados en el campo resultó ser mejor de 7 metros en planimetría y mejor de 5 metros en altimetría.

Se utilizó una cobertura de imágenes Landsat con muy pocas nubes para estimar la altura de los árboles y convertir el modelo superficial digital (DSM) en el modelo digital del terreno (DTM) a partir del cual se calcularon automáticamente las curvas de nivel.

Los topónimos se extrajeron de la cartografía existente y de información bibliográfica. Finalmente, los marcos, las leyendas y la marginalia se colocaron sobre el mapa, se filmó y se pasó a la impresión definitiva.

El proyecto está terminado y aceptado.

CONCLUSIONES

La tecnología SAR ha demostrado muy claramente sus excelentes posibilidades en el mundo de la cartografía. No sólo compete claramente en ciertos ámbitos con los sensores ópticos sino que ha demostrado tener algunas capacidades únicas que la hacen imbatible en ciertas aplicaciones.

En cualquier caso, la tecnología SAR se encuentra todavía en pleno desarrollo. La exploración de frecuencias de trabajo a las que la vegetación natural afecten poco o no afecten en absoluto, así como la combinación de diferentes polarizaciones y diferentes frecuencias permitirán, sin duda, nuevos resultados todavía mejores que los actuales.

BIBLIOGRAFÍA

ARBIOL, R., CASTILLO, M., FRANQUESA, C. y PALA, V. (1995). "Aplicación de la interferometría SAR a la geocorrección de imágenes del satélite ERS-1". SELPER, 11, 23-28.

CASTILLO, M. y ARBIOL, R. (1995). "Obtención de modelos numéricos de elevaciones con Interferometría SAR". Revista de la Asociación Española de Teledetección, 4, 4-11.

FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA, F. (2001). "Permanent Scatterers in SAR Interferometry". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 39, No.1, 8-20.

GABRIEL, A. K. y GOLDSTEIN, R. M. (1988). "Crossed orbit interferometry: Theory and experimental results from SIR-B." International Journal of Remote Sensing, 9, 857-872.

GOLDSTEIN, R. M., ZEBKER, H. A. y WERNER, C. L. (1988). "Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping." Radio Science, 23, 713-720.

MOREIRA, J. (1996). "Airborne SAR: image generation and height precision DEM generation". Proceedings of the XVIII IPSRS Congress. Vienna, 1996.

PALÀ, V., CORBERA, J., (1993). "ERS-1 SAR rectification based on orbital and elevation data". GEOSAR Workshop. Loipersdorf (Austria).

PRATI, C. y ROCCA, F. (1990). "Limits to the resolution of elevation maps from stereo SAR images". International Journal of Remote Sensing, 11, 2215-2235.

PRATI, C., GIANI, M. y LEURATTI, N. (1990). "SAR interferometry: a 2-D phase unwrapping technique based on phase and absolute values information". Proceedings IGARS'90, 2043.

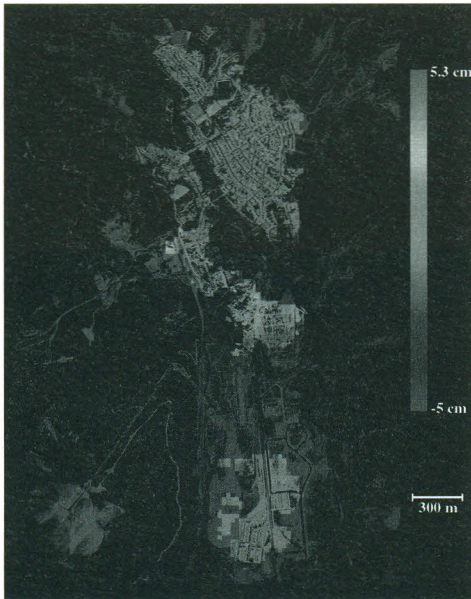


Figura 2. Mapa de subsidencia sobre la zona de Sallent (Barcelona). $\Delta T = 981$ días.

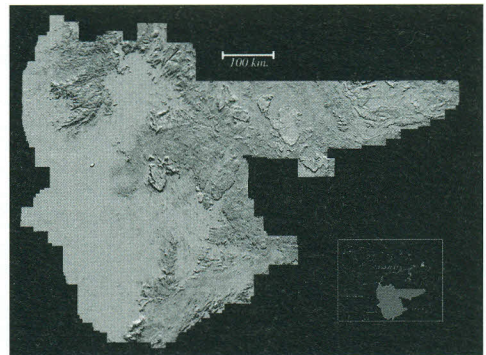


Figura 3. Modelo de elevaciones del Terreno del Sur de Venezuela.