

TÉCNICAS DE GEORREFERENCIACIÓN PRECISA DE DATOS INTERFEROMÉTRICOS DE RADAR ORBITAL Y AEROTRANSPORTADO

Marc Bara, Oscar Mora y Antoni Broquetas

mabara@tsc.upc.es

*Grupo de Ingeniería Electromagnética y Fotónica (EEF)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
C/ Jordi Girona, 1-3. 08034 Barcelona.*

RESUMEN

Las técnicas interferométricas permiten la obtención de modelos digitales del terreno (DEM) a partir de datos obtenidos por radares de apertura sintética (SAR). En este artículo se propone, en primer lugar, un método de georreferenciación aplicado a datos ERS-1/2 basado en un conocimiento exacto de las órbitas, un paso a alturas en slant-range y finalmente una proyección e interpolación para generar un mapa final en coordenadas UTM. Como segunda opción se presenta una técnica evaluada en el caso aerotransportado, capaz de relacionar directamente la fase interferométrica de cada punto de la imagen con su posición en un sistema de referencia global.

The interferometric techniques allow the generation of digital elevation models (DEM) from data collected by synthetic aperture radars (SAR). In this paper a geocoding method applied to ERS-1/2 data is proposed. It is based on an exact knowledge of the orbits, a step from phase to height in slant-range and, finally, a projection and interpolation to generate a final map in UTM coordinates. Next, a technique evaluated in the airborne case is also presented. It is able to relate directly the interferometric phase of every point of the image to its position in a global reference system.

Palabras clave: interferometría, SAR, radar de apertura sintética, cartografía, georreferenciación.

INTRODUCCIÓN

La interferometría SAR combina las informaciones coherentes procedentes de sensores radar para la obtención de perfiles de elevación del terreno. Para ello requiere del uso de dos imágenes captadas desde ángulos de incidencia distintos, de manera que el patrón de interferencias resultante (llamado interferograma) guarda relación directa con el relieve (Carrasco *et alii.* 1997).

El interferograma obtenido, en primer lugar, debe ser filtrado para eliminar los efectos de diferentes fuentes de error (Carrasco 1998). A continuación se lleva a cabo el proceso de extracción del término de tierra plana, el cual no proviene del relieve de la escena sino de la propia geometría de adquisición. El interferograma resultante sigue presentando una información de fase en módulo 2π , por lo que para la obtención del número de ciclos relativo correcto se aplica un proceso de *desenrollado* de fase. A partir de este punto se prosigue con la etapa de *georreferenciación*, que debe relacionar fase con altura para hallar un mapa en un sistema cartográfico estándar.

GEORREFERENCIACIÓN DE DATOS ORBITALES

En esta sección se presenta una técnica aplicable a datos SAR interferométricos captados por las plataformas ERS-1/2. El método se basa en la información de fase a la salida del proceso de desenrollado, sin el término de tierra plana. Básicamente se trata de un problema geométrico, que requiere una modelización precisa tanto de la órbita como de la misma superficie terrestre (Bara 1999).

Los ejes de las imágenes SAR o de los interferogramas se definen como *acimut* en la dirección de desplazamiento de la plataforma, y *slant-range* en la dirección directa que une blancos y radar. El proceso a realizar se ha dividido en dos etapas:

- Conversión de fase a alturas: Transformación de la fase topográfica en alturas con geometría slant-range.
- Georreferenciación a coordenadas topográficas: Conversión de las alturas en slant-range a coordenadas UTM.

Modelización de la órbita

La información orbital sobre una imagen está constituida por una serie de vectores de estado que informan sobre la posición y velocidad del satélite. En el caso del ERS-1/2 existen tres posibles productos en función de su calidad:

- Órbita predicha: Es un producto de baja calidad que no está basado en medidas directas. No es recomendable su uso para interferometría.
- Órbita restituida: Está basado en medidas directas, y presenta una mayor calidad que el caso anterior.
- Órbita precisa: Es el producto de más calidad, y se basa en un post-proceso de los datos orbitales medidos. Se consigue una precisión de 15 cm en la dirección radial.

Para nuestro estudio se requiere trabajar con los productos de órbita precisa. En este caso, la información del vector de estado está muestreada cada 30 segundos, lo que implica que para tener la posición del satélite en cada línea acimutal de la imagen es necesario interpolar la órbita cada 4,5 metros. Otro problema es la correlación en acimut de las órbitas, que consiste en determinar los pares de posición de ambas que han sido usados para una misma línea de la imagen.

La interpolación orbital realizada consiste en tomar un segmento de la órbita y ajustar un polinomio de tercer orden utilizando los valores de posición y velocidad en los puntos conocidos en el sistema CTS (Conventional Terrestrial System), representados por los coeficientes a en la (Ecuación 1). De este modo, la posición orbital (x,y,z) puede ser expresada como:

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{x3} \\ a_{y3} \\ a_{z3} \end{bmatrix} \cdot t^3 + \begin{bmatrix} a_{x2} \\ a_{y2} \\ a_{z2} \end{bmatrix} \cdot t^2 + \begin{bmatrix} a_{x1} \\ a_{y1} \\ a_{z1} \end{bmatrix} \cdot t + \begin{bmatrix} a_{x0} \\ a_{y0} \\ a_{z0} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dicho cálculo debe realizarse para cada una de las órbitas. Para calcular el error obtenido al interpolar valores separados 30 segundos se pueden utilizar las expresiones sobre aproximaciones polinómicas (Carrasco 1998), obteniendo un error máximo de 1.875 cm, el cual se ajusta a los niveles de precisión requeridos.

Alineado de órbitas en interferometría de doble pasada

En un sistema de doble pasada deben

encontrarse las posiciones en una órbita que se corresponden con la segunda, siendo el principal problema la posible falta de paralelismo entre ambas. Existen dos opciones dependiendo del grado de precisión requerido: los métodos de acimut cero y Doppler cero (Small *et alii*. 1996). En el método de acimut cero, se escoge el punto de la segunda órbita que tiene la misma posición en acimut que el de la primera. Por el contrario, el método de Doppler cero es más exacto, puesto que mediante una georreferenciación directa e inversa encuentra la posición en las dos órbitas perpendicular a cada punto del terreno. De este modo, nos aseguramos cumplir con la geometría cero-Doppler, propia de las imágenes SAR utilizadas. Podemos observar este proceso ilustrado en la (Figura 1).

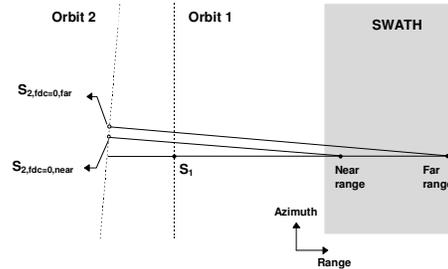


Figura 1.- Algoritmo cero-Doppler, mostrando la dependencia con la posición range.

Conversión de fase a alturas

Una vez se ha modelado la geometría, el siguiente paso es la obtención de la altura del terreno de cada punto del interferograma desenrollado. Para ello se ha utilizado una aproximación polinómica (Geudtner 1996), cuyo objetivo es calcular los coeficientes k_i de la expresión que relaciona el incremento de fase en el interferograma $\Delta\phi$ con los cambios de topografía Δh :

$$\Delta h = k_1 + k_2 \cdot \Delta\phi + k_3 \cdot (\Delta\phi)^2 + \dots + k_n \cdot (\Delta\phi)^{n-1} \quad (2)$$

Obtención de coordenadas UTM

La siguiente etapa consiste en transformar la información topográfica conocida en slant-range a unas coordenadas estándar de referencia, como puede ser el sistema UTM. Para resolver este punto se ha realizado una transformación de cada pixel con altura conocida en el plano slant-range a su posición en coordenadas UTM. Esta conversión genera una malla UTM irregular con espacios sin información, por lo que se tendrá que realizar algún tipo de interpolación. En nuestro estudio se ha optado por

una división triangular de la red UTM y una interpolación bilineal dentro de cada uno de ellos (Carrasco 1998), tal y como se muestra en la (Figura 2).

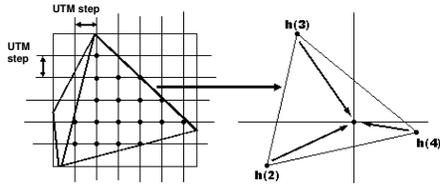


Figura 2.- Interpolación de los pixels internos al triángulo en UTM.

Como resultado final podemos mostrar un DEM de la zona de Tortosa (Tarragona). La imagen (Figura 3) ha sido georreferenciada sobre el elipsoide Hayford ED50 utilizando una malla UTM con un espaciado de 15 metros.

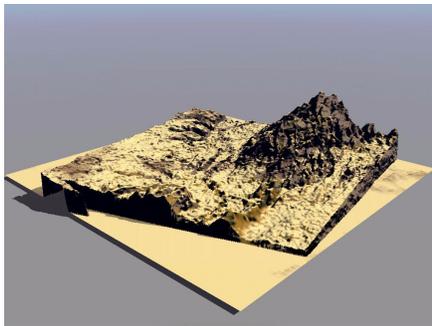


Figura 3.- Perspectiva 3D del DEM de la zona de Tortosa.

MÉTODO DE GEORREFERENCIACIÓN DIRECTA PARA EL CASO AEROTRANSPORTADO

En esta sección se presenta un algoritmo de paso a alturas y georreferenciación directo, capaz de obtener la posición de cada pixel en un sistema de coordenadas global a partir de la fase del interferograma. En el método expuesto anteriormente, aplicado en el caso orbital, el mapa de alturas se obtenía en dos etapas: primero paso de fases a alturas, para más tarde georreferenciar las alturas slant-range.

Este algoritmo directo ha sido analizado con datos provenientes de un sensor radar aerotransportado, caracterizado por una serie de

factores diferentes respecto a un satélite, como son el movimiento inestable del avión y la diferente geometría de observación. Otra diferencia es que ambas imágenes SAR se han captado simultáneamente, por lo que se asegura el paralelismo entre antenas y un alineado en acimut simple.

La diferente naturaleza de la plataforma implica que durante el procesado de cada una de las imágenes SAR debe aplicarse una etapa conocida como de *compensación de movimiento* (Bara *et alii.* 1998). A partir de ahí, se considera que el aeroplano ha seguido una trayectoria nominal, que es la que debe considerarse durante el paso a alturas.

La geometría interferométrica puede representarse en este caso por la (Figura 4), donde se asume que las posiciones P_1 y P_2 de las antenas son conocidas en un sistema de referencia global, típicamente WGS84, ya que normalmente esta información se deriva de los sensores GPS instalados a bordo. P_0 es la posición del blanco a obtener, mientras que V es la velocidad de la plataforma. Se puede hacer uso del conocimiento de la distancia r_1 , puesto que es directamente la posición slant-range en la primera imagen SAR (imagen master).

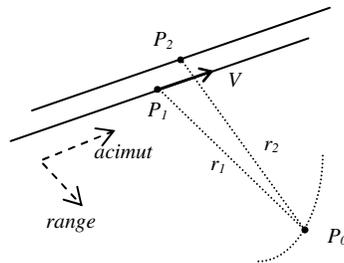


Figura 4.- Geometría de georreferenciación directa

El objetivo es encontrar P_0 mediante el conocimiento de esta geometría y la fase interferométrica. Para ello es posible aplicar una primera ecuación que describe una esfera alrededor de la antena *master*:

$$(P_{1x} - P_{0x})^2 + (P_{1y} - P_{0y})^2 + (P_{1z} - P_{0z})^2 = r_1^2 \quad (3)$$

donde P_{ik} es la componente k -ésima de P_i . A continuación, puede utilizarse una segunda relación que caracteriza el plano perpendicular a la trayectoria (ecuación Doppler):

$$V_x \cdot (P_{1x} - P_{0x}) + V_y \cdot (P_{1y} - P_{0y}) + V_z \cdot (P_{1z} - P_{0z}) = 0 \quad (4)$$

La fase interferométrica completa ϕ puede obtenerse después del proceso de desenrollado, incluyendo el término de tierra plana y la corrección de la fase flotante mediante al menos un punto de control. A partir de su valor es simple obtener la distancia a la antena *slave*:

$$r_2 = r_1 + \frac{\lambda\phi}{4\pi} \quad (5)$$

donde λ es la longitud de onda. La ecuación de una segunda esfera centrada en P_2 es:

$$(P_{2x} - P_{0x})^2 + (P_{2y} - P_{0y})^2 + (P_{2z} - P_{0z})^2 = r_2^2 \quad (6)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior numéricamente se obtienen las tres componentes de la posición del blanco. A partir de aquí podría seguirse el proceso de interpolación a malla regular UTM descrito anteriormente.

Este método ha sido aplicado con éxito a datos procedentes de la plataforma aerotransportada E-SAR del Instituto de Radiofrecuencia Alemán (DLR). En la (Figura 5) se presenta el modelo digital de elevaciones obtenido, el cual muestra una zona de Oberpfaffenhofen, Alemania, de dimensiones 2900 m x 900 m. La reflectividad del terreno medida por una de las antenas ha sido superpuesta sobre la imagen de alturas.



Figura 5.- Mapa de elevaciones con reflectividad superpuesta

En esta zona se dispone de cinco reflectores de los que se conoce la posición, útiles para la verificación de la precisión final. En este caso se ha encontrado un error *rms* de tan sólo 25 cm.

CONCLUSIONES

La generación de modelos digitales del terreno para aplicaciones cartográficas es posible mediante técnicas radar interferométricas. La etapa de georreferenciación es uno de los puntos clave, el cual requiere de un conocimiento preciso de la geometría de adquisición de las imágenes. En este sentido, los sensores orbitales y aerotransportados presentan algunas diferencias fundamentales. Diferentes métodos de georreferenciación han sido aplicados con éxito en ambos casos.

BIBLIOGRAFÍA

Bara, M. Cachón, J. Broquetas, A. Crespo, J.C. 1998. Procesado de Imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética) Aerotransportado con Compensación de Movimiento, *Actas del XIII Congreso URSI, 1998.*

Bara, M. Romero, M. Broquetas, A. 1999. Generation of Precise Wide-Area Geocoded Elevation Models with ERS SAR Data. *IEEE IGARSS 1999.*

Carrasco, D. López, F. Rodríguez, O. Tena, J. Esteban, D. Broquetas, A. 1997. Obtención de modelos digitales del terreno y detección de pequeños movimientos de la superficie terrestre mediante interferometría radar desde satélite. *VII Congreso Nacional de Teledetección, 1997.*

Carrasco, D. 1998. SAR Interferometry for Digital Elevation Model Generation and Differential applications. *Tesis Doctoral. UPC. Barcelona, 1998.*

Geudtner, D. 1996. The interferometric processing of ERS-1 SAR data. *PhD Dissertation. DLR, Oberpfaffenhofen, Alemania, 1996.*

Small, D. et al 1996. A comparison of phase to height conversion methods for SAR interferometry. *IEEE IGARSS 1996.*

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la *Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT)* y la *Comissió Interdepartamental de Recerca i Innovació Tecnològica (CIRIT)*. Los autores también expresan su agradecimiento al *ERS Fringe Working Group* de la Agencia Espacial Europea y al *Institute für Hochfrequenztechnik (DLR)* por haber proporcionado los datos de trabajo.