

Geocodificación de imágenes SAR del satélite ERS-1

V. Palà¹, J. Corbera² y F. Pérez¹

¹*Institut Cartogràfic de Catalunya, Balmes 209-211 - 08006 Barcelona*

²*Departament de Geologia Dinàmica i Paleontologia. Universitat de Barcelona Zona Universitària de Pedralbes 08028 Barcelona.*

RESUMEN

Desde el lanzamiento del satélite ERS-1 en Julio de 1991 por parte de la Agencia Espacial Europea, el *Institut Cartogràfic de Catalunya* y el *Departament de Geologia de la Universitat de Barcelona* han estado trabajando conjuntamente en el problema de la geocodificación de imágenes de radar de apertura sintética (SAR).

El método desarrollado utiliza un modelo kepleriano para la órbita del satélite, ajustado mediante los puntos orbitales de efemérides y sus velocidades. En caso de tener una imagen en Ground-Range, serán necesarios los coeficientes de un polinomio de paso a Slant-Range que, si no están presentes en la información de cabecera de la cinta, obtendremos en base a los puntos control.

El proceso de rectificación necesita un Modelo de Elevaciones del Terreno (MET) preciso y aprovecha las propiedades de localidad en el momento de calcular la posición de la imagen SAR a partir de la coordenada geocéntrica de un punto. Una imagen ERS-1 sobre un área de accidentado relieve en el Sur de Catalunya fue rectificada y comparada con una ortoimagen SPOT PAN a escala 1:50.000 de la misma zona, obteniéndose una buena superposición.

PALABRAS CLAVE: SAR, ERS-1, geocodificación.

ABSTRACT

Since the European Space Agency's ERS-1 satellite was launched on July 1991, the *Institut Cartogràfic de Catalunya* and the *Departament de Geologia of the Universitat de Barcelona* have been working together on the SAR geocoding problem.

The developed method involves a keplerian modelization for the satellite orbit based on the ephemerides orbital points and its velocities. In the case of Ground-Range data, polynomial coefficients allowing transformation from Ground-Range to Slant-Range are needed and derived from control points if not provided in the tape header.

The rectification process needs an accurate DEM, and takes profit of locality when calculating the SAR position from the geocentric position. An ERS-1 image over a rough area in South Catalonia was rectified and compared with 1:50.000 SPOT PAN orthoimages over the same area, giving a successful overlapping.

KEY WORDS: SAR, ERS-1, geocoding.

INTRODUCCIÓN

En el *Institut Cartogràfic de Catalunya* (ICC) hemos acumulado una considerable experiencia en la geocodificación de imágenes obtenidas por sensores ópticos, con la finalidad de obtener productos cartográficos, es decir, ortoimágenes libres de distorsiones geométricas. En concreto se ha trabajado con imágenes LANDSAT (MSS y TM), SPOT (Pancromático y multiespectral), NOAA, ATM (Airborne TM) y CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager).

Tras el anuncio del lanzamiento del satélite ERS-1, el ICC se planteó por vez primera la utilización con fines cartográficos de las imágenes radar. Para ello contactó con el departamento de Geología de la Universidad de Barcelona, que tenía como objetivo la utilización de imágenes ERS-1 para el estudio del retroceso del hielo de la isla Livingston, en la Antártida.

El propósito de dicha colaboración ha sido elaborar un modelo que reproduzca la geometría de observación y captación de la imagen (Corbera, 1992) y que, combinado con el Modelo de Elevaciones del Terreno (MET) de una zona, permita eliminar en lo posible las distorsiones geométricas. Esto ha de permitir combinar imágenes de diferentes sensores, y también efectuar estudios multi-temporales de una zona.

El trabajo ha sido concebido específicamente para tratar imágenes de ERS-1, aunque podría ser fácilmente generalizado para otras imágenes SAR. En primer lugar revisaremos la información útil disponible en las cabeceras de las cintas que el usuario recibe. Seguidamente entraremos en detalle sobre la generación de una función temporal que describa la órbita del satélite, para pasar después al modelo radargramétrico general y su particularización para ERS-1. Se describirá también el algoritmo de geocodificación y el problema del

ajuste en base a puntos de control (PC), así como futuros desarrollos previstos. En la Figura 1 resumimos el esquema general de la geocodificación para ERS-1.

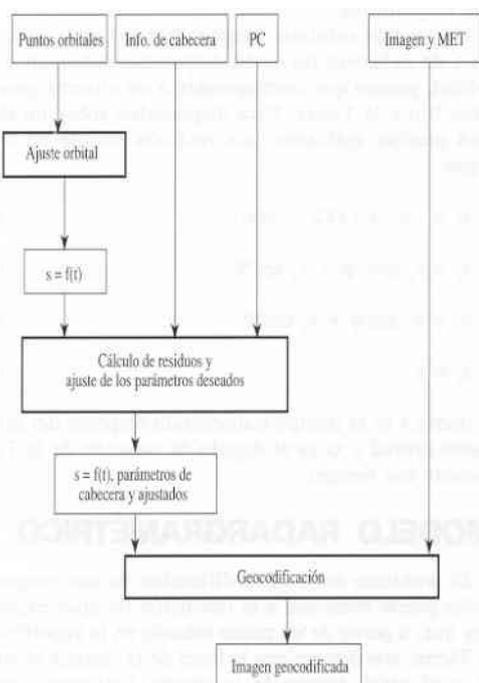


Figura 1. Esquema global de la geocodificación

USO DE LA INFORMACIÓN AUXILIAR A LA IMAGEN

Dado que este trabajo está orientado específicamente al tratamiento de imágenes de ERS-1, se ha intentado aprovechar al máximo la información existente en las cabeceras de las cintas con el objeto de evitar en lo posible la búsqueda de puntos de control. En nuestro caso, dicha búsqueda tiene un coste especialmente alto en las imágenes de radar por dos razones fundamentales: el nivel de ruido de las imágenes y aspecto general de las mismas (con importantes deformaciones en las zonas de gran relieve), y nuestra intención de utilizar imágenes sobre zonas remotas en las que apenas existe información cartográfica.

La instalación central ERS-1 de Earthnet (EECF) situada en ESRIN (Frascati, Italia) está proporcionando imágenes en diversos formatos pensados para diferentes aplicaciones. En cuanto a la cartografía, dos de los formatos son adecuados, aunque no ideales. El primero es el producto llamado SAR.SLC que ofrece imágenes de un único «look», complejas y en Slant-Range. El segundo es el producto SAR.PRI con múltiples «looks», reales y Ground-Range. Como veremos más adelante, el formato ideal sería un híbrido entre ambos, caracterizado por disponer de múltiples «looks», valores reales y Slant-Range, aunque este último requisito podría obviarse si en la información de cabecera se encontraran los coeficientes de paso de Slant-

Range a Ground-Range, que necesariamente han sido utilizados en ESRIN.

En cuanto a la información colateral, útil para la geocodificación, proporcionada junto con las imágenes de ERS-1, cabe destacar.

- Información relativa a 5 puntos de paso de la órbita en la que se ha captado la imagen a tratar. Para cada punto se proporcionan sus coordenadas y velocidades en un sistema geocéntrico fijo a la Tierra. También se proporciona el intervalo de tiempo transcurrido entre punto y punto.

- Tiempo de «Zero-doppler azimuth» para el primer y último píxel azimuthal (t_f , t_i). Estos dos valores nos indican el tiempo de la primera y última líneas de imagen en relación con los puntos orbitales.

- El número total de líneas de la imagen. Este valor junto con los tiempos asociados a la primera y última línea nos proporciona el tiempo transcurrido entre línea y línea.

- «Normalization reference range (r_0)». Permite trasladar las distancias en Slant-Range a posiciones de píxel dentro de la línea.

AJUSTE DE LA ÓRBITA

A partir de los puntos orbitales es necesario construir una función que describa la evolución de la posición del satélite en el tiempo.

$$s = (x_s, y_s, z_s) = f(t) \quad (1)$$

donde s es un vector que define la posición del satélite y t es el tiempo.

Para ello, la aproximación más simple, y suficiente en la mayoría de casos, pasa por la utilización de polinomios (Raggam, 1990; Roth, 1990):

$$s = s_0 + s_1 \cdot t + s_2 \cdot t^2 + s_3 \cdot t^3 + \dots \quad (2)$$

$$v = \partial s / \partial t = s_1 + 2 \cdot s_2 \cdot t + 3 \cdot s_3 \cdot t^2 + \dots \quad (3)$$

$$t = t_f + row \cdot \Delta t \quad (4)$$

donde t_f es el tiempo para la primera línea de imagen y Δt es el tiempo entre líneas consecutivas.

El principal obstáculo de la utilización de polinomios es la gran cantidad de coeficientes que hay que ajustar a partir de los puntos orbitales. Aunque cinco puntos serían suficientes para una imagen, no bastarían para modelizar grandes segmentos orbitales (por ejemplo una órbita entera). Por ello optamos por una modelización basada en una concepción más física y realista de la evolución orbital, la que permite reducir el número de incógnitas involucradas y admite la opción de trabajar con grandes segmentos orbitales.

La función que describe la trayectoria orbital se basa en los 6 elementos Eulerianos: \mathbf{a} (semieje mayor de la elipse), \mathbf{e} (excentricidad de la órbita), \mathbf{i} (inclinación orbital), $\mathbf{\Omega}$ (nodo ascendente), \mathbf{w} (ar-

gumento del perigeo) y T_0 (tiempo de paso por el perigeo). Resulta también frecuente considerar como elementos que describen la órbita la posición y velocidad de un único punto de la propia órbita. Por convenio, consideramos que dicho punto es el punto inicial de nuestro segmento orbital.

$$(S_0, S'_0) = (x_0, y_0, z_0, x'_0, y'_0, z'_0)$$

Light (1980) describe como pasar de la descripción Euleriana a la descripción «posición-velocidad». El uso de este algoritmo está restringido al cálculo de órbitas elípticas y contiene algunas singularidades y dificultades numéricas cuando la excentricidad o la inclinación orbital son próximas a cero. Por ello, el mismo autor describe una solución no singular al problema, en la cual, dada una posición y velocidad inicial, se calcula la posición y velocidad para cualquier tiempo posterior. A continuación resumimos esta solución, llamada «solución f y g de Herrick»:

$$s_0 = (x_0^2 + y_0^2 + z_0^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$s'_0 = (x_0'^2 + y_0'^2 + z_0'^2)^{1/2} \quad (6)$$

$$d_0 = x_0 \cdot x'_0 + y_0 \cdot y'_0 + z_0 \cdot z'_0 \quad (7)$$

$$a = 1 / (2/s_0 - s_0^2/\mu) \quad (8)$$

donde μ es la masa de la Tierra por la constante gravitacional

La ecuación de Kepler

$$\frac{\mu^{1/2} \cdot (t-t_0)}{a^{3/2}} = \Phi - (1-s_0/a) \cdot \text{sen}\Phi + \frac{d_0}{(\mu \cdot a)^{1/2}} (1-\cos\Phi) \quad (9)$$

debe ser resuelta por la variable Φ mediante el método de Newton y a continuación se obtiene:

$$f = 1 - a \cdot (1 - \cos\Phi) / s_0 \quad (10)$$

$$g = (t-t_0) - a^{3/2} \cdot (\Phi - \text{sen}\Phi) / \mu^{1/2} \quad (11)$$

$$s = f \cdot s_0 + g \cdot s'_0 = (x_s, y_s, z_s) \quad (12)$$

$$s = (x_s^2 + y_s^2 + z_s^2)^{1/2} \quad (13)$$

$$f' = (-\mu \cdot a)^{1/2} / (s \cdot s_0) \cdot \text{sen}\Phi \quad (14)$$

$$g' = 1 - (a/s) \cdot (1 - \cos\Phi) \quad (15)$$

$$s' = f' \cdot s_0 + g' \cdot s'_0 = (x'_s, y'_s, z'_s) \quad (16)$$

La función orbital (1) queda resuelta mediante las ecuaciones (5) a (12), mientras que las ecuaciones (13) a (16) permiten calcular las velocidades. Cabe destacar que esta solución no tiene en cuenta perturbaciones orbitales y que no es suficiente considerar como parámetros s_0 y s'_0 el primer punto orbital de la información de cabecera, puesto que pretendemos minimizar el error a lo largo de toda la trayectoria recorrida durante la captación de la

imagen. Esto nos lleva a un ajuste por mínimos cuadrados del error cometido mediante las expresiones (5) a (16) a partir de los puntos orbitales de que disponemos.

Los puntos orbitales proporcionados en la información de cabecera no están dispuestos sobre un plano orbital, puesto que corresponden a un sistema geocéntrico fijo a la Tierra. Para disponerlos sobre un plano será preciso aplicarles una rotación simple tal como sigue:

$$\psi = -\pi \cdot t / (12 \cdot 3600) \quad (17)$$

$$x_r = x_s \cos\psi + y_s \text{sen}\psi \quad (18)$$

$$y_r = -x_s \text{sen}\psi + y_s \cos\psi \quad (19)$$

$$z_r = z \quad (20)$$

donde t es el tiempo transcurrido respecto del primer punto orbital y Ψ es el ángulo de rotación de la Tierra durante ese tiempo.

MODELO RADARGRAMÉTRICO

El problema de la geocodificación de una imagen de radar puede reducirse a la obtención de unas expresiones que, a partir de un punto situado en la superficie de la Tierra, nos determinen la línea de la imagen resultante y el píxel dentro de la misma (columna) que le corresponde.

Las ecuaciones básicas de la geometría SAR, perfectamente conocidas y ampliamente comentadas en la literatura (Curlander, 1987; Raggam, 1990; Roth, 1990; Schreier, 1990), son la ecuación del Doppler y la ecuación del 'range' (ver figura 2):

$$\lambda f_{DC} / 2 = (p' - s') \cdot (p - s) / |p - s| \quad (21)$$

$$r_s = |p - s| \quad (22)$$

donde p y s son respectivamente la posición de un punto de la Tierra y la posición del satélite en el momento de captar ese punto. Los vectores p' y s' corresponden a las derivadas respecto del tiempo de los valores anteriores; λ es la longitud de onda del radar; f_{DC} es el centroide Doppler y r_s es la distancia entre el satélite y el punto.

En el caso de ERS-1 estas ecuaciones pueden simplificarse, puesto que f_{DC} es igual a cero, obteniéndose:

$$(p' - s') \cdot (p - s) = 0 \quad (23)$$

$$r_s = |p - s| \quad (24)$$

En el caso de que dispongamos de una imagen en Slant-Range tendremos que

$$r_s = r_0 + \text{col} \cdot \text{pix} \quad (25)$$

o lo que es lo mismo

$$\text{col} = (r_s - r_0) / \text{pix} \quad (26)$$

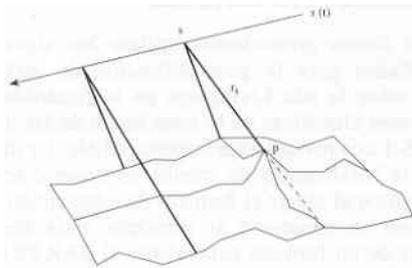


Figura 2. Geometría SAR.

donde r_0 es ella distancia del primer píxel en 'range' que podemos extraer de la información de la cinta, r_s es la distancia en Slant-Range, pix es el tamaño del píxel en Slant-Range y col es la columna de la imagen.

Si la imagen está codificada en Ground-Range tendremos una serie de coeficientes que nos relacionarán dichas coordenadas con las de la imagen en Slant-Range. En ESRIN se aplica una transformación del siguiente tipo (Oriol, 1992):

$$r_g = c_0 + c_1 \cdot r_s + c_2 \cdot r_s^2 + c_3 \cdot r_s^3 \quad (27)$$

donde c_0, c_1, c_2, c_3 son los coeficientes del polinomio y r_g es la distancia en Gound-Range.

Por otro lado, mediante los tiempos asociados a la primera y última líneas de imagen (t_f, t_l), podemos relacionar fácilmente cualquier línea con el parámetro tiempo

$$t = t_f + (t_l - t_f) \cdot lin / total_lin \quad (28)$$

donde lin es la línea y $total_lin$ es el número total de líneas de la imagen.

GEOCODIFICACIÓN DE UNA IMAGEN ERS-1

Para la geocodificación de una imagen pueden seguirse dos procedimientos distintos. El primero consiste en calcular la posición sobre el terreno que corresponde a cada píxel de la imagen (modo inverso). El segundo calcula, para cada posición del terreno asociada a la imagen geocodificada que vamos a construir, el píxel (línea, columna) correspondiente en la imagen original (modo directo).

Cada método ofrece una serie de ventajas e inconvenientes, pero, por lo general, es más sencillo y efectivo el modo directo. De forma resumida, para cada píxel de la imagen a construir, del cual conocemos sus coordenadas x_c, y_c en una determinada proyección cartográfica, el algoritmo realizaría las siguientes operaciones:

a) Extracción de la altitud z_c del punto a partir del MET.

b) Cálculo de sus coordenadas en el sistema geocéntrico \mathbf{p} .

c) Cálculo de la velocidad \mathbf{p}' del punto debida a la rotación de la Tierra.

d) Cálculo del tiempo t que determina la posición del satélite \mathbf{s} y velocidad \mathbf{s}' que cumplen la ecuación del Doppler (23). Para cada tiempo t ensayado rotar el punto \mathbf{p} con las ecuaciones (18) y (19).

e) Mediante la ecuación (24) obtenemos la distancia r_s en Slant-Range.

f) Si la imagen es en Ground-Range aplicaremos (27) para obtener $r_g = col$.

g) Si la imagen es en Slant-Range aplicaremos (26) para obtener col .

h) Mediante la ecuación (28) obtenemos la línea.

El paso (d) requiere de la aplicación de un algoritmo interactivo, puesto que de todas las posiciones (o tiempos) del satélite, hay que calcular la que cumple la ecuación Doppler. Durante el proceso de geocodificación, el algoritmo va calculando sobre posiciones sucesivas y localmente muy parecidas, lo que permite resolver en pocas iteraciones la posición del satélite a partir de la última posición ya calculada. En una fase inicial es conveniente almacenar en una tabla (residente en memoria) la posición del satélite asociada a cada una de las líneas de la imagen, con el objeto de ahorrar cálculos costosos. Dicha tabla la calcularemos mediante el empleo de las ecuaciones (28) y (5) a (12).

AJUSTE MEDIANTE PUNTOS DE CONTROL

En el caso de que la información de cabecera necesaria sea muy precisa (puntos orbitales, t_f, t_l) y de disponer de una imagen en Slant-Range, no será necesario ningún punto de control para geocodificar una imagen.

Si la imagen es de Ground-Range, necesitaremos puntos para calcular los coeficientes del polinomio (27) que ha permitido el paso de Slant-Range a Ground-Range en ESRIN. Además, puede ser recomendable recalcular, con mayor precisión que la disponible, los tiempos t_f y t_l . En este caso deberemos proceder a realizar un ajuste por mínimos cuadrados de los parámetros necesarios en base a un conjunto de puntos de control.

RESULTADOS

Hasta la fecha hemos podido realizar pruebas sobre una imagen que cubre una zona de considerable desnivel altimétrico alrededor del Delta del Ebro en el Sur de Catalunya. La imagen fue captada el 10 de Agosto de 1991 y está en Ground-Range. Optamos por ajustar los 4 coeficientes del

polinomio (27) y los tiempos de las líneas inicial y final. Utilizamos un MET disponible sobre todo el territorio de Catalunya con un paso de malla de 15 m. El R.M.S. que obtuvimos sobre 24 puntos fue:

$$\text{rms}_x = 24.75 \text{ metros}$$

$$\text{rms}_y = 26.12 \text{ metros}$$

La imagen fue geocodificada con un píxel de salida de 10 metros (figura 3) con objeto de superponerla a una imagen SPOT también geocodificada. El resultado fue altamente satisfactorio pues las discrepancias geométricas fueron menores o del orden de dos píxeles para la mayoría de puntos y algo superiores en las zonas más montañosas.



Figura 3. Imagen geocodificada.

FUTUROS TRABAJOS

En el futuro pretendemos utilizar los algoritmos desarrollados para la geocodificación de imágenes ERS-1 sobre la isla Livingston en la Antártida. Las condiciones climáticas de la zona hacen de las imágenes ERS-1 una herramienta imprescindible. La dificultad en la localización de puntos de control será un punto crítico al elegir el formato de adquisición, aunque como se mencionó al princi-

pio sería deseable disponer de un formato equivalente al SAR.PRI pero en Slant-Range, o lo que es equivalente, conocer los coeficientes de paso de Slant-Range a Ground-Range.

Por otro lado, la ICC ha desarrollado el software GeoTeX (Colomina, 1992), especialmente indicado para el ajuste simultáneo de múltiples observaciones. Tenemos planteado integrar en el mismo el modelo radargramétrico ERS-1, con lo que podrían ser resueltas, de forma combinada, observaciones fotogramétricas, GPS, LANDSAT, SPOT y ERS-1.

BIBLIOGRAFIA

- COLOMINA, I., NAVARRO, J.A. Y TERMENS, A. (1992). «GeoTeX: A general point determination system», en *XVII International Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Washington, DC.
- CORBERA, J., (1992). «Elaboració d'un model orbital de correcció d'imatges SAR-ERS-1», tesina presentada en la *Universitat de Barcelona*.
- CURLANDER, J.C., KWOK, R. y PANG, S.S. (1987). «A post-processing system for automated rectification and registration of spaceborne SAR imagery». *International Journal of Remote Sensing*, vol 8, 4: 621-638.
- LIGHT, D.L. (1980). «Capítulo XVII: Satellite Photogrammetry», en *a. American Society of Photogrammetry*, Falls Church.
- ORIOLO, E., (1992). Comunicación personal. ESRIN, Frascati, Italy.
- RAGGAM, J. (1990). «SAR parameter adjustment and related modules for simulated ERS-1 data», en *Third International Workshop on Image Rectification of Spaceborne Synthetic Aperture Radar*, Farnham Castle: 9-14.
- ROTH, A., BAYER, T., SCHREIER, G., y KOSMANN, D. (1990). «Tuning the D-PAF operational SAR geocoding system for throughput enhancement», en *Third International Workshop on Image Rectification of Spaceborne Synthetic Aperture Radar*, Farnham Castle: 87-93.
- SCHREIER, G. (1990). «Approach to quality control and long loop quality assessment for SAR geocoded products», en *Third International Workshop on Image Rectification of Spaceborne Synthetic Aperture Radar*, Farnham Castle: 115-121 datos de satellite