

V. Palà, R. Arbiol

Institut Cartogràfic de Catalunya
Parc de Montjuïc. E-08038. Barcelona

1. Resumen

La triangulación espacial es una técnica poco usada en el ámbito de la teledetección, al contrario de la bien conocida aerotriangulación, indispensable en las aplicaciones fotogramétricas. Para exponerla, se revisarán en primer lugar las particularidades de los sensores de barrido embarcados en los satélites, sus modelos geométricos, así como el problema del establecimiento de las órbitas. A continuación se describirá el conjunto de ecuaciones de observación necesarias para resolver simultáneamente un bloque de imágenes y la necesidad de utilización de modelos de elevación del terreno para dar solidez al sistema de ecuaciones y evitar posteriores problemas en la generación de ortoimágenes digitales. Al final presentaremos algunos resultados de su aplicación sobre diferentes áreas de trabajo.

2. Introducción

La geometría de los sensores comerciales embarcados en el espacio (SPOT, LANDSAT, ERS1, NOAA,...) ha sido ampliamente tratada por la comunidad de teledetectores desde sus inicios [1,2,3,4,5,6]. Estos trabajos han asentado una gran diversidad de modelos geométricos que podríamos clasificar en diferentes categorías según se definan sobre un espacio de coordenadas 2D o 3D, global a toda la Tierra o local, según utilicen parámetros que describan una trayectoria orbital o no.

El primer modelo geométrico, ampliamente utilizado hasta el momento, fue el polinómico que es del tipo 2D, no orbital y sobre un sistema cartesiano de coordenadas determinado por una proyección cartográfica. Con polinomios de primer grado podemos tratar imágenes SPOT y LANDSAT con un nivel de precorrección geométrica que haya resuelto previamente las distorsiones debidas a la rotación y esfericidad de la Tierra, así como distorsiones panorámicas y efectos sistemáticos introducidos por el sensor (p.ej: la no linealidad del espejo de LANDSAT). Los expresamos como sigue:

$$\text{col} = A + B x + C y \quad (1)$$

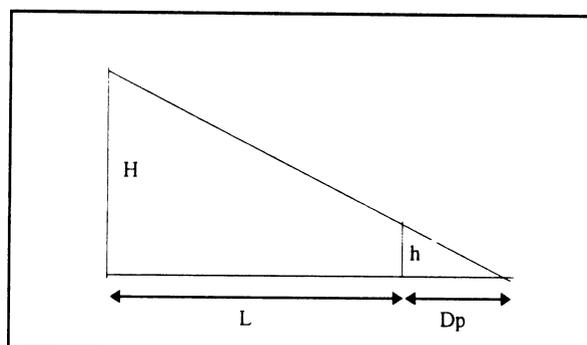
$$\text{lin} = A' + B' x + C' y \quad (2)$$

donde col, lin son las coordenadas imagen, x,y las coordenadas mapa y A,B,C,A',B',C' los coeficientes del polinomio.

En realidad, bajo estas condiciones, este modelo es válido para territorios con poco rango de variación altimétrica. Si éste no es el caso debemos aumentar el grado de los polinomios, aunque nunca podremos conseguir buenos resultados sobre zonas de gran relieve, puesto que su aleatoriedad no es modelizable con pocos términos polinómicos.

La magnitud del error D_p introducido por el relieve está en función de la altura H del satélite, la altura h del punto (respecto de la altura media de la zona cubierta por la imagen) y su distancia L al nadir según la siguiente expresión (ver fig.1):

$$D_p = L h / [H-h]. \quad (3)$$



- Figura 1-

A título orientativo, para una imagen LANDSAT, un punto visto en el extremo de la misma ($L=90$ Km) con una altitud de 1500 m. estará desplazado 192 m. en la imagen.

Un modo de resolver este problema, sin entrar en modelos más complejos, es mediante la introducción, en los polinomios, de términos que dependan de las elevaciones [7]. Un modelo tan simple como el que sigue proporciona muy buenos resultados:

$$\text{col} = A + B x + C y + D xh + E yh + F h \quad (4)$$

$$\text{lin} = A' + B' x + C' y \quad (5)$$

El siguiente eslabón en el proceso geométrico de las imágenes de satélite vino impulsado básicamente por una serie de acontecimientos entre los que podemos destacar: la aparición de sensores de creciente resolución, la posibilidad de adquirir datos en formato original (SPOT 1A), la disponibilidad de información sobre la posición orbital y los ángulos de actitud del sensor, la necesidad de obtener una buena superposición entre la información georeferenciada, especialmente con la aparición de los SIG (Sistemas de

Información Geográfica), y la necesidad de tratar de forma correcta las zonas de gran relieve. En esta etapa proliferaron los modelos físicos rigurosos para describir la trayectoria orbital, los movimientos del sensor y el proceso de captación de la imagen.

Hasta ese momento el proceso geométrico básico implicaba la localización de puntos de control (Ground Control Points), el ajuste de los parámetros libres del modelo y la corrección geométrica. Este proceso, en el ámbito de la teledetección, estaba concebido para una sola imagen. En caso de necesitar varias para cubrir un territorio, se recurría a un posterior ajuste imagen-imagen para minimizar las discrepancias geométricas. El establecimiento de modelos más precisos hizo conectar con la fotogrametría y sus principios básicos, así como con las técnicas ampliamente desarrolladas en dicho campo, como la aerotriangulación. Su adaptación a los sensores remotos ha dado pie a la llamada triangulación espacial que permite el tratamiento de bloques de varias imágenes de forma simultánea, con las siguientes ventajas:

- Ahorro de puntos de control terrestre, de elevado coste respecto de los puntos de transferencia que pueden ser obtenidos de forma automática.
- No es necesario disponer de puntos de control sobre todas las imágenes.
- Se garantiza una buena coherencia entre todas las imágenes, reduciendo en gran medida el esfuerzo necesario en las fase de mosaicado.
- El método es más robusto y permite detectar mejor los puntos erróneos.

Ahora bien, la triangulación espacial requiere que los modelos implementados para los diferentes tipos de imagen que queramos ajustar de forma simultánea utilicen un sistema único de coordenadas terreno. Esto nos conduce a desarrollar modelos sobre un sistema global a la Tierra, como el sistema geocéntrico o las coordenadas geográficas más la altitud.

3. La geometría de los sensores de barrido

Vamos aquí a considerar únicamente los sensores embarcados en plataformas espaciales, aunque podríamos extenderlo, con ligeras modificaciones, a sensores aerotransportados. Hablaremos pues de sensores de barrido refiriéndonos a aquellos que forman una imagen digital aprovechando el desplazamiento de la plataforma a lo largo de su órbita.

Al plantearnos un modelo geométrico preciso y riguroso para los sensores espaciales debemos atender a las particularidades del modo de captación de las imágenes. Estas imágenes han sido captadas por barrido, en bloques de unas pocas líneas (en ocasiones línea a línea). La geometría de cada bloque nos recuerda aquella de una cámara fotogramétrica cuyo formato se redujera, en una de las dos dimensiones de

la película, al grosor mínimo cuya proyección sobre el terreno fuera la del bloque de líneas original. Así pues, una forma natural de modelizar dichos instrumentos es mediante las ecuaciones de colinealidad, provenientes de la fotogrametría, adaptadas a cada bloque.

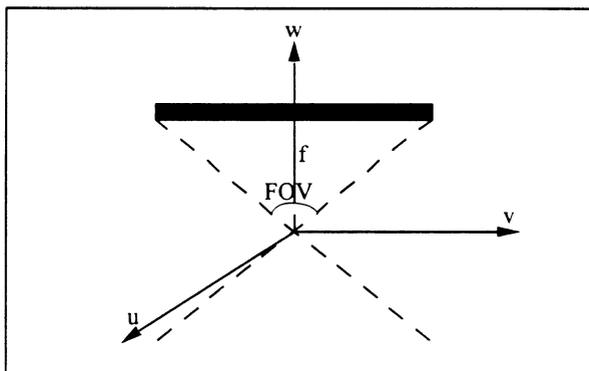
Podemos clasificar (desde el punto de vista de la geometría) los sensores de barrido en tres grupos:

- Sensores de barrido de CCD's, como HRV del satélite SPOT.
- Sensores de barrido por espejo, como MSS y TM de LANDSAT, así como AVHRR de NOAA.
- Radares de apertura sintética, como ERS y RADARSAT.

Vamos a ver a continuación las particularidades de cada grupo.

3.1 Sensores de barrido de CCD's

En cuanto al primer grupo, la geometría de los datos originales para una línea es idéntica a la de la fotografía aérea y viene definida por las ecuaciones de colinealidad. Para ello definimos un sistema de coordenadas local al sensor tal como se indica en la figura 2.



- Figura 2 -

A título de ejemplo, para SPOT-HRV Pancromático, el cálculo de las coordenadas locales para una columna determinada sería del siguiente modo:

$$u = 0 \quad (6)$$

$$v = 3000 - \text{col} \quad (7)$$

$$w = f = 832000 / 10 \quad (8)$$

La posición del satélite está en función del tiempo o de la línea

$$s = s(\text{lin}) = (x_s, y_s, z_s) \quad (9)$$

El punto observado está en un sistema de coordenadas global a la Tierra tal como el geocéntrico

$$P = (x_p, y_p, z_p) \quad (10)$$

La matriz de rotación r que permite relacionar el sistema de coordenadas de los puntos observados con el sistema local al sensor se establece en base a tres ángulos de actitud. La actitud del sensor viene determinada por una actitud nominal ocasionada por la

propia evolución en su órbita y una actitud residual, ambas dependiendo del tiempo. En cuanto a la actitud residual se calcula a partir de tres ángulos de rotación: aleteo (ω), cabeceo (φ) y deriva (κ). A menudo disponemos de información de este tipo adjunta a la imagen.

De este modo la ecuaciones de observación son las siguientes:

$$0 = f \frac{r_{11}(X_s - X_p) + r_{12}(Y_s - Y_p) + r_{13}(Z_s - Z_p)}{r_{31}(X_s - X_p) + r_{32}(Y_s - Y_p) + r_{33}(Z_s - Z_p)} \quad (11)$$

$$v = f \frac{r_{21}(X_s - X_p) + r_{22}(Y_s - Y_p) + r_{23}(Z_s - Z_p)}{r_{31}(X_s - X_p) + r_{32}(Y_s - Y_p) + r_{33}(Z_s - Z_p)} \quad (12)$$

3.2 Sensores de barrido por espejo

En este grupo debemos incluir los sensores de la serie LANDSAT tales como MSS y TM, así como AVHRR de la serie NOAA.

No entraremos en el detalle que nos llevaría a comentar todos los preprocesos que implican la generación de una imagen libre de las distorsiones debidas a la falta de linealidad en el movimiento del espejo de dichos sensores. Vamos a simplificar el problema considerando que tenemos imágenes en formato bruto (raw) y captadas línea a línea.

Con ese supuesto, teniendo en cuenta que cada píxel de la imagen mantiene un IFOV (Instantaneous Field of View) constante, el modelo planteado en el apartado anterior sería válido con un ligera modificación. Ésta afecta al cálculo de las coordenadas del sistema local en base a la posición (la columna) dentro de la línea tal y como sigue:

$$u = 0 \quad (13)$$

$$v = \tan(-\text{IFOV}(\text{col} - \text{NUMPIX} / 2)) \quad (14)$$

$$w = f = 1 \quad (15)$$

donde NUMPIX es el número de píxeles por línea.

3.3 Radares de Apertura Sintética (SAR)

Las ecuaciones para la geometría de las imágenes SAR han sido ampliamente tratadas en la literatura [8,9,10] y son la ecuación del *range* y la del *doppler*:

$$\lambda f_{DC} / 2 = (\mathbf{p}' - \mathbf{s}') \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{s}) / |\mathbf{p} - \mathbf{s}| \quad (16)$$

$$r_s = |\mathbf{p} - \mathbf{s}| \quad (17)$$

donde \mathbf{p} y \mathbf{s} son respectivamente la posición de un punto de la Tierra y la posición del satélite en el momento de captar este punto. Los vectores \mathbf{p}' y \mathbf{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.

4. Las órbitas

En caso de disponer de puntos de efemérides orbitales asociados a una imagen, tenemos la posibilidad de resolver la órbita como paso previo a la triangulación espacial. Esto es especialmente interesante puesto que el conjunto de ecuaciones que formaremos posteriormente para el bloque de imágenes será más estable.

Ahora bien, a menudo no disponemos de puntos orbitales, o no son muy precisos, con lo que optamos por resolver la órbita simultáneamente junto con el resto de parámetros del ajuste. Hecha esta consideración podemos resumir los modelos más comúnmente usados para describir las órbitas:

- Modelo polinómico.** Se establecen 3 polinomios función del tiempo o de la línea para las 3 coordenadas geocéntricas de los puntos orbitales. Con grado tres tenemos buenos resultados para el segmento orbital asociado a una imagen.
- Órbita circular.** Con cuatro parámetros tenemos suficiente para modelizarla [2]. Estos son: La anomalía inicial, el nodo ascendente, la inclinación orbital y el radio orbital respecto del centro de la Tierra.
- Órbita Kepleriana.** Podemos utilizar los seis elementos Eulerianos: semieje mayor de la elipse, excentricidad de la órbita, inclinación orbital, nodo ascendente, argumento del perigeo y tiempo de paso por el perigeo. Resulta también frecuente considerar como elementos la posición y velocidad de un punto de la órbita [11]. Este modelo es especialmente interesante para largos segmentos orbitales.

La selección del modelo vendrá determinada por la calidad de los puntos de efemérides, su separación en tiempo y la longitud del segmento orbital. También hay que tener muy en cuenta el número de incógnitas que introduce cada modelo y la correlación que puedan tener con otros parámetros a resolver.

5. La triangulación espacial.

En la triangulación de un bloque disponemos de dos tipos básicos de información:

Puntos de control para los que ha sido observada su posición sobre la Tierra y su posición sobre una o más imágenes. Aunque los modelos han sido previamente planteados sobre un sistema de coordenadas geocéntricas, es conveniente trabajar en coordenadas geográficas más la elevación del punto sobre el terreno. La conversión entre ambos sistemas es bien conocida y la obviaremos en este trabajo.

Para cada punto se formará un grupo de parámetros \mathbf{p} con 3 incógnitas a resolver (p_{lon} , p_{lat} , p_h). A su vez este punto habrá sido observado, ya sea sobre el terreno, ya

sea sobre cartografía existente

$$\rho = (\rho_{lon}, \rho_{lat}, \rho_h), \quad (19)$$

con lo que podemos formar las siguientes ecuaciones de observación directa:

$$e_{lon} = \rho_{lon} - p_{lon} \quad (20)$$

$$e_{lat} = \rho_{lat} - p_{lat} \quad (21)$$

$$e_h = \rho_h - p_h \quad (22)$$

donde el vector e nos da el error sobre cada una de los datos observados.

A la vez ese punto habrá sido identificado en imágenes, obteniéndose su posición (col,lin) que formará dos ecuaciones más de observación según el modelo geométrico para el tipo de imagen que tratemos:

$$e_{col} = f(\text{col}, S, I, D, p) \quad (23)$$

$$e_{lin} = g(\text{lin}, S, I, D, p) \quad (24)$$

donde S es el grupo de parámetros asociado a la órbita, I el grupo de parámetros asociado a la imagen, D el cambio de datum entre los puntos de efemérides y nuestro sistema de referencia, y p el punto.

Estos puntos son los que realmente permiten encajar el bloque de imágenes respecto del terreno y es necesario que estén bien distribuidos dentro del bloque.

Puntos de transferencia o puntos homólogos, que son puntos observados sobre un mínimo de dos imágenes y para los que desconocemos, a priori, sus coordenadas terreno.

Para cada uno de estos puntos se establece un grupo de parámetros p a resolver, tal como se ha definido anteriormente, aunque no formaremos ecuaciones de observación directa (20-22). Por otro lado sí podremos generar ecuaciones de observación imagen (23,24) para todas las imágenes donde haya sido identificado.

En el caso de que un punto haya sido identificado sobre un mínimo de dos imágenes con visión estereoscópica en dicha posición, podremos resolver su posición tridimensional. Si las únicas imágenes donde se observó forman segmento habrá que fijar alguna de las coordenadas, siendo la elevación h la más razonable y evidente.

Los puntos de transferencia obligan a que las imágenes *cosan* o ensamblen correctamente facilitando el posterior mosaico de las ortoimágenes.

6. Uso de los Modelos de Elevación del Terreno

De forma general podemos considerar dos tipos de recubrimiento entre imágenes de satélite: recubrimiento lateral desde dos órbitas diferentes, recubrimiento longitudinal formando segmento en una misma órbita. Para este último caso es necesario fijar alguna de las coordenadas, siendo la altura la más intuitiva. Para el

primero es recomendable utilizar también la información del relieve para obligar a que los parámetros de tipo punto se ajusten sobre el terreno.

Una forma de tratar de manera unificada los puntos de transferencia es mediante el uso de los Modelos de Elevación del Terreno (MET), generando ecuaciones de observación que no permitan a los puntos alejarse de la superficie. Como los parámetros de tipo punto evolucionarán para cada iteración del ajuste por mínimos cuadrados, la altura habrá que consultarla en base a las coordenadas longitud y latitud disponibles en cada momento. El mecanismo de consulta queda enormemente simplificado utilizando coordenadas geográficas.

7. Resultados

La triangulación espacial es, para el Institut Cartogràfic de Catalunya, una doble herramienta: para el desarrollo de modelos y para la explotación. A nivel experimental se han incluido modelos para los siguientes sensores: HRV de SPOT, MSS y TM de LANDSAT, MOMS, ERS-SAR y RADARSAT.

A nivel de explotación se está utilizando sistemáticamente para los proyectos de cartografía de imagen de satélite. En concreto se ha tratado un bloque de imágenes ERS1 que ha permitido generar el mapa radar 1:250000 sobre Catalunya, y se han ajustado bloques de imágenes LANDSAT y SPOT sobre Catalunya y sobre Argentina para elaborar mapas a escala 1:50000, 1:100000 y 1:250000.

A continuación esquematizamos algunas áreas de trabajo:

Área	Sensor	Imág.
Catalunya	SPOT.-HRV Pancro	6
Catalunya	ERS-1	14
Argentina (Bs.As.)	SPOT-HRV Pancro	19
Argentina (Bs. As.)	SPOT-HRV Pancro	21
Argentina (Norte)	LANDSAT-TM	10
Argentina (Norte)	LANDSAT-TM	7
Tierra del fuego	SPOT-HRV MSS	15

En todos los casos el error RMS sobre los puntos de control ha sido inferior a un píxel y sobre los puntos de registro inferior a 0.5 píxeles.

8. Bibliografía

[1] Beyer, E.P. 1983, Thematic Mapper Geometric Correction Processing. *Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of the Environment*, Ann Arbor, Michigan, pp.:319-334.

[2] Gagan, D.J. 1987, Practical aspects of topographic mapping from SPOT imagery. *Photogrammetric Record*, 12(69):349-355.

- [3] Kratky 1988, Rigorous stereophotogrammetric treatment of SPOT images. *Colloque International SPOT-1: Utilisation des images, bilan, résultats*, Paris, France, pp.1281-1288.
- [4] Konecny, G., P. Lohmann, H. Engel and E. Kruck 1987, Evaluation of SPOT Imagery on Analytical Photogrammetric Instruments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 53(9):1223-1230
- [5] Labovitz, M.L. and J.W. Marvin 1986, Precision in Geodetic Correction of TM Data as a Function of the Number, Spatial Distribution, and Success in Matching of Control Points: A Simulation. *Remote Sensing of the Environment*, 20:237-252.
- [6] Salamonowicz, P.H. 1986, Satellite Observation and Position for Geometric Correction of Scanner Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 52(4):491-499.
- [7] Palà, V., Pons, X. 1995. Incorporation of relief polynomial-based geometric corrections. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(7):935-944.
- [8] Raggam, J. 1990. SAR parameter adjustment and related modules for simulated ERS-1 data. *Third International Workshop on Image Rectification of Spaceborne Synthetic Aperture Radar*, Farnham Castle, U.K., pp.: 9-14.
- [9] Roth, A., Bayer, T., Schreier, G., Kosmann, D. 1990. Tuning the D-PAF operational SAR geocoding system for throughput enhancement. *Third International Workshop on Image Rectification of Spaceborne Synthetic Aperture Radar*, Farnham Castle, U.K., pp.: 87-93.
- [10] Palà, V., Corbera, J., 1993. ERS-1 SAR rectification based on orbital and elevation data. *GEOSAR Workshop*, Loipersdorf, Austria, pp.: 19-25.
- [11] Light, D.L. 1986, Satellite Photogrammetry. in Slama, C.C. (ed.) *Manual of Photogrammetry*. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, pp. 883-977.