

MODELO DE DEFORMACIÓN GEOMÉTRICA. APLICACIÓN A IMÁGENES SPOT

A. BEL-LAN, S. FERNANDEZ, V. MORENO Y M.L. SALA.
INISEL ESPACIO. Madrid.

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo para la corrección geométrica de imágenes SPOT usando datos de órbita, actitud y geometría del sensor. Los parámetros que describen la posición del satélite, así como la desviación con respecto a la actitud nominal se modelan como polinomio. Esto permite ajustar el modelo utilizando la técnica de ajuste de observaciones indirectas con puntos de control y corregir la imagen usando un modelo digital del terreno.

ABSTRACT

In this work we present a model for the geometric correction of SPOT data using orbit, attitude and sensor geometry. The parameters describing the instantaneous position of the satellite are modelled as polynomial functions of time, so as the deviations from nominal attitude. This allows the improvement of the model using least squares adjustment of indirect observations (control points) and the correction of the data using a digital elevation model.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es presentar el diseño de un método para calcular la deformación geométrica de imágenes SPOT, sin que ello excluya la generalidad del caso para sensores ópticos del tipo push-broom.

Se ha desarrollado un algoritmo que modela la variación de parámetros orbitales, la variación de la orientación de la plataforma (actitud) y la dirección de apuntamiento de cada uno de los elementos de los CCD del sensor.

También se modela la superficie terrestre como uno de los elipsoides estándar, en nuestro caso el internacional de 1980.

El método permite también incorporar información de elevación del terreno en el cálculo.

El modelo paramétrico desarrollado permite también ajustar los valores de los parámetros a partir de puntos de apoyo conocidos e identificables en la imagen. El ajuste de estos parámetros deberá permitir reducir la cantidad de puntos de apoyo necesarios con respecto al método tradicional de ajuste de polinomios directamente a los puntos de apoyo, con respecto a una precisión establecida.

En nuestro caso, los parámetros físicos del modelo son los que se aproximan con polinomios en función del tiempo de adquisición de la imagen, y los coeficientes de estos polinomios son ajustables selectivamente, de manera que la cantidad de parámetros variables dentro del modelo se pueda reducir al mínimo que explique las distorsiones presentes.

Por otra parte, el modelo no tiene por qué estar restringido a una sola escena, con lo cual para un segmento se podrán tomar puntos de apoyo en la zona del mismo donde sean más precisos y abundantes. Esto implica que se podrá intentar georreferenciar imágenes de zonas con cartografía

deficiente o inexistente (a excepción hecha de la existencia de un modelo digital del terreno o la no necesidad del mismo en zonas de poca variación), siempre que se cuente con imágenes adquiridas sobre la misma órbita en la misma fecha.

2. LOS DATOS SPOT

Cada CCT del tipo IA, o sea sin correcciones geométricas realizadas por SPOTIMAGE, contiene varios datos que permiten calcular valores iniciales de los parámetros del modelo.

Estos datos son:

- Efemérides (posición y velocidad) de la plataforma cada 60 segundos. Esto implica que la adquisición de una escena cae entre dos de estas muestras (tiempo de adquisición aproximadamente 9 segundos).
- Derivas residuales de actitud, muestreadas cada 125 milisegundos. Estas son las velocidades de rotación (error) alrededor de los tres ejes de referencia de actitud. La integración de estos valores permitiría conocer el error de apuntamiento con respecto a la orientación nominal de la plataforma. En los datos SPOT no se encuentra sin embargo el valor inicial o constante de integración que sería necesaria. En nuestro trabajo este es un tema pendiente de análisis de los datos que deberemos aclarar.
- Los ángulos de apuntamiento de los píxeles extremos de la línea de imagen referidos al sensor, que por interpolación lineal permiten calcular el apuntamiento de cada píxel de la línea.
- El tiempo universal de la línea central de cada imagen. Este valor permite calcular el tiempo universal de cada línea de la imagen, pudiendo establecer así la posición de la plataforma para cada línea.

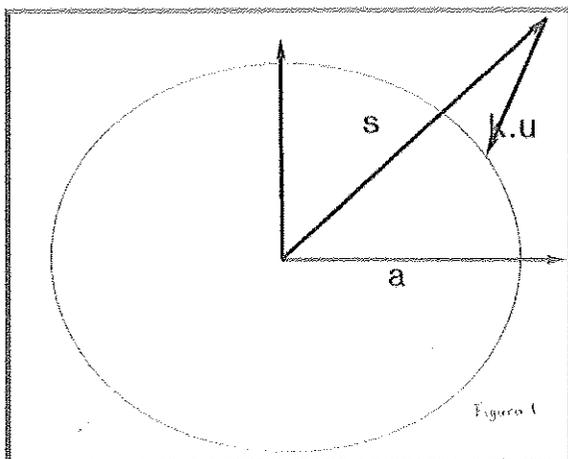


Figura 1.

3. LA FUNCIÓN DE CÁLCULO GEOMÉTRICO

Fundamentalmente, el cálculo de la posición geográfica de un píxel de la imagen se reduce a resolver el triángulo representado en la Figura 1.

En esta figura, el vector S define la posición de la plataforma, y el vector u es un vector unitario que define la dirección de apuntamiento del píxel que se quiere localizar.

La intersección de esta dirección, pasando la misma por el centro óptico del sensor, con el elipsoide terrestre, define el punto de intersección y por lo tanto, las coordenadas geográficas del punto en cuestión.

La resolución de la ecuación de intersección define la constante de proporcionalidad k .

La ecuación de intersección y la ecuación del elipsoide de revolución se representan en la Tabla 1.

En esta última también hemos incluido la altura h , desconocida a priori. Sin embargo, teniendo un modelo digital del terreno, esta ecuación se resuelve iterativamente, con el siguiente esquema:

- $h(i)=0$; $i=0$
- cálculo de la constante k
- cálculo de las coordenadas geográficas del píxel
- cálculo de la altura a partir de estas coordenadas usando el modelo de terreno $\rightarrow h(i+1)$
- verificar si la diferencia entre $h(i)$ y $h(i+1)$ es menor que la tolerancia, si lo es terminar, de lo contrario, volver al paso b.

4. CÁLCULO DEL VECTOR DE APUNTAMIENTO

Como se ha visto en el párrafo anterior, la solución de la referenciación exige expresar a los vectores de la ecuación de intersección en un único sistema de referencia.

El vector de posición del satélite se expresa en un sistema

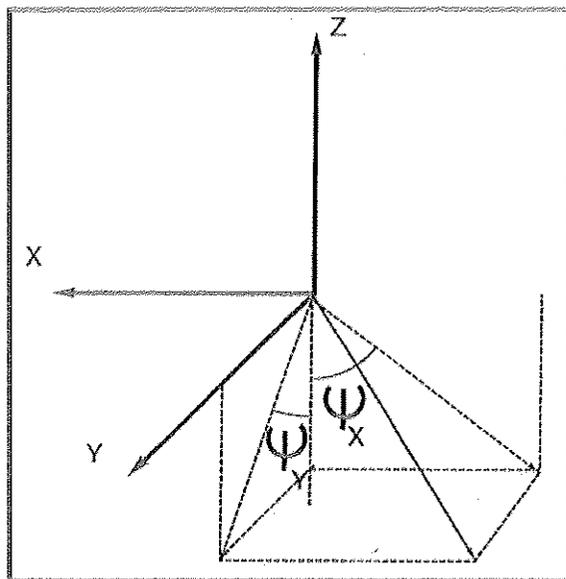


Figura 2.

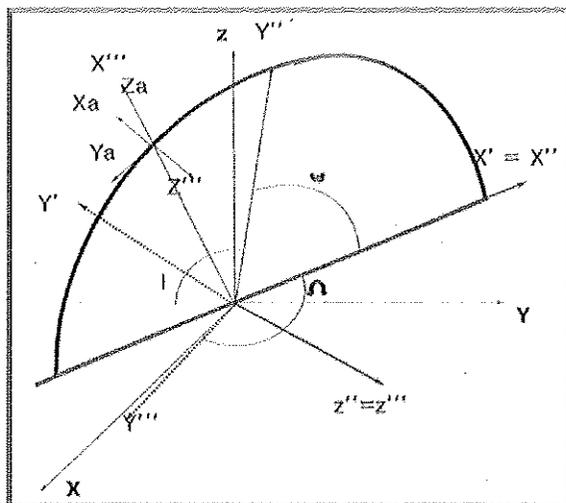


Figura 3.

fijo a la Tierra (no inercial), directamente a partir de los datos de efemérides, como aclararemos más adelante.

Para referenciar el vector de apuntamiento con respecto a este sistema, es necesario realizar dos cambios de sistemas de coordenadas. El vector de apuntamiento está inicialmente dado con respecto al sensor mismo, como queda definido en la Figura 2.

El sistema representado en esta figura es solidario con la plataforma. Los otros dos sistemas en juego son el orbital local, con respecto al cual se miden los ángulos de actitud, y el

Tabla 1

INTERSECCION CON EL ELIPSOIDE

$$S(\rho) + K U = P(h,a,b)$$

$$S(\rho) = \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix}$$

$$U_{ST} = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix}$$

$$P(h,a,b) = \frac{1}{1-e^2} \begin{Bmatrix} (a+h) \cos \phi \cos \lambda \\ (a+h) \cos \phi \sin \lambda \\ (b+h)^2 \sin \phi / (a+h) \end{Bmatrix}$$

Tabla 2

$\cos \omega \cos \Omega - \sin \omega \sin \Omega \cos i$	$\cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos \Omega \cos i$	$\sin \omega \sin i$
$-\sin \omega \cos \Omega - \cos \omega \sin \Omega \cos i$	$\sin \omega \sin \Omega + \cos \omega \cos \Omega \cos i$	$\cos \omega \sin i$
$\sin \Omega \sin i$	$-\cos \Omega \sin i$	$\cos i$

MATRIZ DE TRANSFORMACION DEL SISTEMA ORBITAL LOCAL AL TERRESTRE

terrestre arriba mencionado.

Con los ángulos de actitud se construye la matriz de rotación correspondiente, pasando así del sistema fijo de la plataforma al sistema orbital local.

A su vez, la orientación de este último con respecto al terrestre queda definido por las efemérides del satélite. En la Figura 3 se representa el sistema orbital local y el de orientación nominal de la plataforma (Xa, Ya, Za). Como se puede ver, la orientación de este sistema con respecto al terrestre queda definida por los parámetros orbitales siguientes:

- Distancia del centro del sistema terrestre al satélite (rho)
- Argumento del nodo ascendente (omega mayúscula)
- Argumento de satélite (omega minúscula)
- Inclinação del plano orbital (i)

Estos parámetros orbitales se calculan directamente a partir de las efemérides (posición y velocidad) del satélite.

A las muestras obtenidas a partir de las efemérides se les ajustan polinomios, que definen los valores iniciales de los parámetros del modelo.

Estos parámetros poseen menos correlación entre sí que las componentes cartesianas de los vectores de posición y

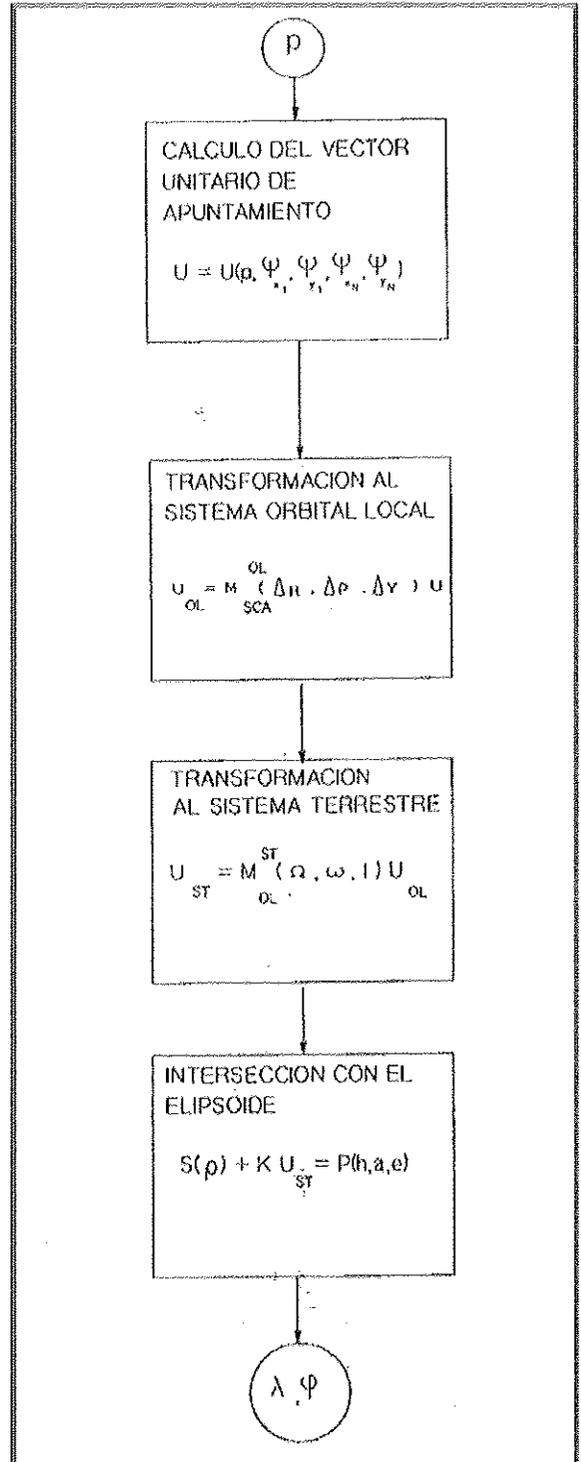


Figura 4.

Tabla 3

MODELIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS	
$\rho = \rho(t)$	$\Delta \rho = \Delta \rho(t)$
$\Omega = \Omega(t)$	$\Delta \rho = \Delta \rho(t)$
$\omega = \omega(t)$	$\Delta \gamma = \Delta \gamma(t)$
$I = I(t)$	

Tabla 4

$\left. \frac{\partial F(x)}{\partial x} \right _{x=x^0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_2} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_2} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_2} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_1} & \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_2} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_1} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_2} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_1} \\ \frac{\partial \phi}{\partial \alpha_2} \end{bmatrix}$	DERIVADA PARCIAL RESPECTO AL PARAMETRO α_i EN EL PUNTO J		
			$\Delta x = \begin{Bmatrix} \Delta \alpha_1 \\ \Delta \alpha_2 \\ \vdots \\ \Delta \alpha_i \end{Bmatrix}$	
				DE (3)
LA SOLUCIÓN QUE MINIMIZA EL ERROR CUADRÁTICO PONDERADO				
$N \cdot \Delta = L$	$L = B^T \cdot W \cdot f$	$N = B^T \cdot W \cdot B$		
	$f = d - l$			

Tabla 5

$F(x) + \left. \frac{\partial F(x)}{\partial x} \right _{x=x^0} \Delta x = l + v \quad (1)$	
$F(x)$	FUNCIÓN DE CÁLCULO
x	PARAMETROS
l	MEDICIONES
v	DESVIACIONES DE LA MEDICIONES
Δx	AJUSTE DE LOS PARAMETROS
$l = \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \lambda_1 \\ \phi_2 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \phi_p \\ \lambda_p \end{Bmatrix}$	$v = \begin{Bmatrix} v_0^1 \\ v_\lambda^1 \\ v_0^2 \\ v_\lambda^2 \\ \vdots \\ v_0^p \\ v_\lambda^p \end{Bmatrix}$

velocidad, además de tener una interpretación física inmediata y claramente visible.

Con estos polinomios se puede calcular para cada instante de tiempo especificado la matriz de rotación correspondiente, que se representa en la Tabla 2.

El proceso de cálculo se representa en la Figura 4, indicando cada una de las transformaciones y su aplicación secuencial.

5. MODELIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS

Los parámetros físicos (o si se quiere geométricos) del modelo se aproximan con polinomios, como se ha descrito más

arriba.

Un resumen de los parámetros utilizados se da en la Tabla 3.

Con respecto a los parámetros de actitud, los polinomios indicados pretenden ajustar las variaciones residuales de actitud una vez contempladas las que se pueden calcular a partir de las derivas de actitud contenidas en las cintas SPOT. Los valores iniciales de los coeficientes de estos polinomios que representan los errores de actitud no medibles por el sistema de control de actitud serán nulos.

6. AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO

Como se mencionó más arriba, los parámetros iniciales del modelo pueden ajustarse con puntos de apoyo de coordenadas conocidas.

El ajuste se realiza resolviendo las ecuaciones normales planteadas en las Tablas 4 y 5. Como la función de cálculo no es lineal, se linealiza introduciendo las derivadas parciales con respecto a los parámetros que se consideren variables.

Dada la dificultad de expresar las derivadas parciales en forma explícita, la diferenciación se realiza numéricamente.

Al momento actual el modelo ha sido implementado y se encuentra en la etapa de verificación numérica de los resultados. Una primera prueba con una escena SPOT permitió determinar que el error cometido calculando las coordenadas geográficas con los coeficientes iniciales era de 100 metros en sentido Norte-Sur y de unos 1000 metros en sentido Este-Oeste.

Como el error mayor se produce según la longitud geográfica, se ajustó simplemente el coeficiente del término constante del polinomio que representa la posible variación de la longitud del nodo ascendente. Con el nuevo valor ajustado de este parámetro se obtuvieron errores del orden de 50 metros, esto sin considerar aún un modelo digital del terreno.

Naturalmente en el curso de las pruebas que se están realizando se intentará determinar cuáles son los coeficientes de variación más significativa con respecto al error resultante, y si la selección debe ser diferente para cada escena.

También se determinará la cantidad mínima de puntos de apoyo necesarios para alcanzar la precisión exigida.

7. BIBLIOGRAFIA

- ✓ MIKHAIL, E.M. (1976): *Observations and Least Squares*, IEP.
 - ✓ SPOT/IMAGE, (1986): *Guide des utilisateurs de données SPOT SI/MR/66.0004 f.*
 - ✓ FERNÁNDEZ, S. (1987): *Geometric Correction of Landsat TM Raw data using Orbital and Attitude Parameters*, Informe Interno, DLR
-