

Un método de bajo coste computacional para la fusión de imágenes QuickBird-2 que tiene en cuenta las curvas de respuesta espectral de los sensores multispectral y pancromático.

María González-Audicana⁽¹⁾, Xavier Otazu⁽²⁾, Octavi Fors⁽³⁾ y Jesús Álvarez⁽¹⁾

⁽¹⁾Dep. Proyectos e Ingeniería Rural. Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadía s/n, 31006 Pamplona. maria.audicana@unavarra.es, jesus.alvarez@unavarra.es

⁽²⁾Centre de Visió per Computador. Campus Universidad Autónoma de Barcelona. Cerdanyola del Vallés, 08193 Barcelona. xotazu@cvc.uab.es

⁽³⁾Dep. Astronomía y Meteorología. Universidad de Barcelona. Diagonal 647, 08028 Barcelona. ofors@am.ub.es

Resumen

En este artículo se presenta un nuevo método de fusión basado en la transformación IHS rápida, que permite fusionar de forma rápida y sencilla imágenes multispectrales y pancromáticas del satélite QuickBird-2. El método propuesto tiene en cuenta las curvas o funciones de respuesta espectral de los dos sensores. Los resultados obtenidos son, tanto desde el punto de vista espacial como espectral, comparables a los obtenidos empleando métodos basados en las transformaciones wavelet.

1. Introducción

Debido a su naturaleza complementaria, la fusión de imágenes multispectrales (*Multi*) y pancromáticas (*Pan*) es una solución ampliamente utilizada para la obtención de imágenes de alta resolución espectral y espacial. Probablemente, los métodos de fusión más empleados sean los basados en las transformaciones Intensidad-Tono-Saturación (IHS) [1], el método de Brovey así como los basados en el análisis de componentes principales (ACP) [2]. El mayor inconveniente de estos métodos de fusión, es la distorsión espectral que presentan las imágenes fusionadas resultantes respecto a la imagen *Multi* original.

En los últimos años, distintos investigadores [3]-[6] han propuesto nuevos métodos de fusión basados en el análisis multirresolución y las transformaciones wavelet, que permiten minimizar el problema anteriormente citado.

El principal inconveniente de estos métodos de fusión es su elevado coste computacional, lo que los hace menos atractivos de cara a la fusión de grandes volúmenes de imágenes.

En este artículo se propone un nuevo método de fusión, basado en las transformaciones IHS rápidas, que teniendo en cuenta las curvas de

eficiencia espectral de los sensores Multi y Pan del satélite QuickBird-2, permite obtener de forma rápida y sencilla, imágenes con una calidad comparable a la de las obtenidas empleando métodos basados en transformaciones wavelet.

2. Fusión de imágenes empleando el método IHS rápido

Tal y como ya hemos comentado, uno de los métodos de fusión de imágenes más empleados es el basado en las transformaciones IHS. En este método, la componente Intensidad (*I*) obtenida a partir de la imagen *Multi* remuestreada al tamaño de píxel de la *Pan*, es sustituida por esta última y su información tanto radiométrica como espacial, se incorpora a la imagen *Multi* a través de la transformada IHS inversa.

Recientemente, Tu *et al.* [7] han propuesto un método de fusión sencillo y rápido basado en las transformaciones IHS que puede aplicarse con resultados aceptables tanto desde el punto de vista espacial como espectral y que se basa en

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I + (Pan - I) \\ vI \\ v^2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I + \delta \\ vI \\ v^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \delta \\ G + \delta \\ B + \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde $[R', G', B']$ representan la imagen fusionada, $[R, G, B]$ la imagen *Multi* original, *I* la componente intensidad, entendida como la media de los canales R, G, B y δ la diferencia entre la componente *I* y la imagen por la que se sustituye esta componente.

Tradicionalmente, la componente *I* es sustituida directamente por la imagen *Pan* y el

parámetro $\delta = Pan-I$ toma valores bastante altos por ser bastante diferente la información radiométrica de ambas imágenes.

Si se tiene en cuenta que el rango de longitudes de onda en el que capta radiancia el sensor Pan cubre las bandas B, G, R y NIR del sensor Multi, este método puede extenderse a la fusión de las 4 bandas multispectrales [7], de forma que:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \\ NIR' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \delta \\ G + \delta \\ B + \delta \\ NIR + \delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Los mismos investigadores han demostrado que al aplicar una transformación IHS de este tipo, la componente tono se mantiene tras la fusión y sólo cambia la componente saturación. Cuanto mayor sea este cambio, mayor es la distorsión espectral y radiométrica de la imagen fusionada. Este cambio depende directamente del valor de δ . Cuanto menor sea este valor, es decir, cuanto más se parezcan la componente I y la imagen por la que se sustituya esta componente, menor será el cambio en la componente saturación y por lo tanto, la distorsión espectral en la imagen fusionada.

3. Incorporación de la información de las curvas de respuesta espectral de los sensores a los procedimientos de fusión

En este apartado trataremos de demostrar que teniendo en cuenta la información contenida en las curvas de funciones de respuesta espectral (FRS) de los sensores Multi y Pan, es posible sintetizar, a partir de la imagen *Pan*, la imagen I' que hubiera captado el sensor Multi si trabajase a la resolución espacial del sensor Pan.

De este modo, al sustituir la componente I por la nueva imagen sintetizada I' , el parámetro $\delta = I'-I$ tomará valores absolutos altos sólo en aquellos píxeles en los que realmente haya una diferencia de información espacial, es decir, de información de detalle.

La FRS de un sensor define la probabilidad de que un fotón emitido a una determinada frecuencia (ν) o a una determinada longitud de onda, sea detectado por éste. Sea $\phi(\nu)$ la FRS del sensor Pan y $\varphi_i(\nu)$ la FRS de la banda i del sensor Multi.

Sea m_i el evento detección de un fotón por el sensor Multi $_i$. La probabilidad del evento m_i es

$$P(m_i) = \int \varphi_i(\nu) d\nu \quad (3)$$

Sea p el evento detección de un fotón por el sensor Pan. La probabilidad del evento p es

$$P(p) = \int \phi(\nu) d\nu \quad (4)$$

Desde el punto de vista geométrico, las probabilidades de los eventos m_i y p pueden entenderse como las áreas bajo las correspondientes FRS (Fig. 1).

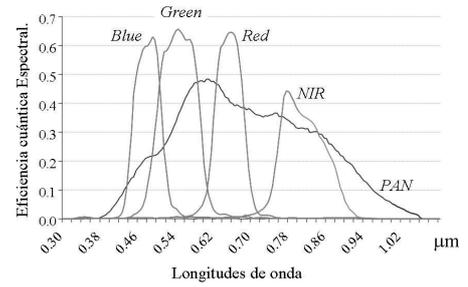


Figura 1: FRS del sensor multispectral y pancromático del satélite QuickBird-2.

Dado el evento p , la probabilidad del evento m_i se define como

$$P(m_i|p) = \frac{P(m_i \cap p)}{P(p)} \quad (5)$$

siendo

$$P(m_i \cap p) = \int \min(\varphi_i, \phi) d\nu \quad (6)$$

Esto implica que si un fotón es detectado por el sensor Pan, la probabilidad de que también sea detectado por el sensor Multi $_i$ es igual al cociente entre el área común entre $\varphi_i(\nu)$ y $\phi(\nu)$ y el área definida por $\phi(\nu)$. De la misma manera, si un fotón es detectado por el sensor Multi $_i$, la probabilidad de que también sea detectado por el sensor Pan es

$$P(p|m_i) = \frac{P(m_i \cap p)}{P(m_i)} \quad (7)$$

Sean n_p y n_i el número de fotones detectados por los sensores Pan y Multi $_i$, respectivamente. El número total de fotones simultáneamente detectados por los sensores Pan y Multi $_i$ ($n_{p,i}$) puede definirse por

$$n_{p,i} = P(m_i|p) \cdot n_p \quad (8)$$

o por

$$n_{p,i} = P(p|m_i) \cdot n_i \quad (9)$$

La ecuación 8 sólo se cumple cuando $\bigcup_{i=1}^{n_c} P(m_i \cap p) = P(p)$, es decir, cuando el área bajo la función $\phi(\nu)$ está contenida bajo todas las funciones $\varphi_i(\nu)$. Puede observarse en la Fig. 1 que hay áreas bajo la función $\phi(\nu)$ que no están bajo el

área de ninguna de las funciones $\phi_i(v)$. Hablando en términos de fotones esto implica que existen fotones detectados por el sensor Pan que no son detectados por el sensor Multi. Con el objeto de corregir este error, introducimos el factor

$$\alpha_p = \frac{\int \min(\phi, \max(\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n)) dv}{\int \phi(v) dv} \quad (10)$$

que representa la fracción de fotones detectados por el sensor Pan que también pueden ser detectados por el sensor Multi, es decir, la fracción del área bajo la función $\phi(v)$ que también está bajo alguna de las funciones $\phi_i(v)$.

Considerando lo anteriormente expuesto, la ecuación 8 puede describirse como

$$n_{p,i} = P(m_i|p) \cdot n_p \cdot \alpha_p \quad (11)$$

Si combinamos esta ecuación con la ecuación 9, conocido el número de fotones detectados por el sensor Pan (n_p), es posible predecir el número de fotones n'_i que detectaría el sensor Multi si trabajase a una resolución espacial igual a la del sensor Pan [8]

$$n'_i = \frac{\alpha_p \cdot P(m_i|p)}{P(p|m_i)} \cdot n_p \quad (12)$$

Si definimos la componente I como

$$I = \sum_{i=1}^{n_c} n_i / 4 \quad (13)$$

y conocemos cual es el número de fotones detectados por el sensor Pan, es posible obtener la imagen I' que el sensor Multi hubiera captado si trabajase a una resolución espacial igual a la del sensor Pan empleando la siguiente fórmula:

$$I' = \sum_{i=1}^{n_c} n'_i / 4, \quad (14)$$

$$I' = \sum_{i=1}^{n_c} \frac{P(m_i|p)}{P(p|m_i)} \alpha_p \cdot \frac{n_p}{4} \quad (15)$$

La ecuación 15 sólo se cumple cuando

$\bigcap_{i=1}^{n_c} P(m_i \cap p) = 0$, es decir, cuando no existe

solapamiento entre las áreas de las funciones $\phi_i(v)$ bajo la curva definida por la función $\phi(v)$. En la Fig. 1 puede observarse que, bajo la FRS del sensor Pan existen áreas de las FRS del sensor Multi; que se solapan con sus adyacentes. Para corregir este efecto, se introduce en la ecuación 15 el siguiente factor de corrección

$$I' = \sum_{i,j=1}^{n_c} \left(\frac{P(m_i|p)}{P(p|m_i)} \cdot \left(1 - \frac{\beta_{i,j}}{2}\right) \right) \cdot \alpha_p \cdot \frac{n_p}{4} \quad (16)$$

donde β_i representa el área de $\phi_i(v)$ bajo $\phi(v)$ solapada con el área de la banda adyacente $\phi_j(v)$.

Los dos primeros términos de la ecuación 16 no dependen de la imagen sino que dependen únicamente de las FRS de los sensores cuyas imágenes se desean fusionar. A partir de las FRS de los sensores Pan y Multi, puede definirse el parámetro γ

$$\gamma = \sum_{i,j=1}^{n_c} \frac{P(m_i|p)}{P(p|m_i)} \cdot \left(1 - \frac{\beta_{i,j}}{2}\right) \cdot \alpha_p \quad (17)$$

que en el caso del satélite QuickBird-2 tiene un valor aproximado de 0.8. Este valor es válido sólo para aquellas imágenes que no hayan sufrido ninguna modificación radiométrica durante su procesamiento, en cuyo caso, las relaciones de la ecuación 17 no se cumplirán.

4. Método de fusión propuesto

Hemos demostrado en el apartado anterior, que teniendo en cuenta las FRS de los sensores Multi y Pan del satélite QuickBird-2 es posible, de forma sencilla y rápida, sintetizar a partir de la imagen Pan , la imagen I' que se obtendría si el sensor M trabajase a la misma resolución espacial que el sensor P.

$$= \gamma \cdot p / \quad (18)$$

$$I = (n_B + n_G + n_R + n_{NIR}) / 4 \quad (19)$$

donde $n_p, n_B, n_G, n_R, n_{NIR}$ representan el número de fotones, es decir, la radiancia detectada por el sensor en cada banda y γ el parámetro multiplicativo obtenido a partir de las FRS de los sensores de QuickBird-2.

Esta nueva componente I' tendrá la misma información espacial que la imagen Pan y la diferencia de esta componente I' con la componente I , obtenida a partir de la imagen $Multi$, contendrá el detalle espacial que hay que inyectar a cada banda.

Si aplicamos el método IHS rápido propuesto por [7], la imagen fusionada la obtendremos utilizando la ecuación 2, donde

$$\begin{aligned} \delta &= (\gamma \cdot p /) - ((n_B + n_G + n_R + n_{NIR}) /) \\ &= (\gamma \cdot p) - (n_B + n_G + n_R + n_{NIR}) \end{aligned} \quad (20)$$

De este modo, se inyectará a cada una de las bandas de la imagen multispectral la información contenida en la imagen $I'-I$, es decir, el detalle espacial de la imagen Pan que le falta a la imagen $Multi$.

La base teórica de este método es la misma que la de los métodos AWL [4] y IHS mejorado

propuesto por [9], es decir, generar una imagen I' que contenga la información radiométrica y espectral de la imagen *Multi* y la información espacial de la *Pan*. Estos métodos emplean las transformaciones wavelet para extraer el detalle espacial de la imagen *Pan* que le falta a la imagen I .

El método propuesto en este trabajo es mucho más sencillo y rápido de aplicar y los resultados a los que da lugar son similares a los obtenidos empleando métodos basados en transformaciones wavelet, tal y como se comprobará en el siguiente apartado.

5. Resultados

Las imágenes QuickBird-2 que se fusionan en este trabajo, captadas en octubre de 2002, corresponden a la provincia de Sevilla y cubren tanto zonas urbanas como agrícolas.

Las imágenes fusionadas obtenidas empleando el método propuesto en este trabajo se comparan con las imágenes obtenidas aplicando el método IHS clásico (a las 4 combinaciones posibles de tres bandas) y el método wavelet AWLP, que es la extensión del método AWL a 4 bandas y que está explicado en detalle en [8].

La resolución espacial de la imagen QuickBird-2 pancromática y multiespectral es de 0.7m y 2.8m respectivamente. Las imágenes resultantes de la fusión tendrán una resolución espacial de 0.7m. Para poder analizar la calidad de estas imágenes, deberían compararse con la imagen que teóricamente adquiriría el sensor *Multi* si trabajase a la resolución espacial de *Pan*. Como esto no es posible, se decide trabajar con imágenes degradadas. Como paso previo a la fusión, las imágenes *Pan* y *Multi* se degradan a 2.8m y 11.2m. De este modo, la calidad de las imágenes fusionadas se obtiene comparando éstas con la imagen *Multi* original.

Esta comparación se basa tanto en características espectrales como espaciales

5.1. Calidad espectral

Un buen método de fusión debe poder garantizar que se mantendrá la información espectral de la imagen multiespectral de partida al aumentar su resolución espacial. Para medir la distorsión espectral debida al proceso de fusión, la información espectral de cada imagen fusionada se compara con la multiespectral original, empleando los siguientes indicadores

- El coeficiente de correlación (CC) entre cada banda de la imagen original y fusionada. Valor ideal, 1.

- Índice ERGAS [10], calculado como

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{RMSE^2(B_i)}{M_i^2} \right)} \quad (21)$$

donde N es el número de bandas de la imagen *Multi*, h la resolución espacial de la imagen *Pan*, l la resolución espacial de la imagen *Multi*, M_i la radiancia media de cada banda de la imagen *Multi* y $RMSE(B_i)$ el error medio cuadrático de cada banda fusionada comparada con la original. Cuanto menor sea el valor de *ERGAS* de las imágenes fusionadas, mayor será su calidad espectral.

Tabla 1: *Calidad espectral de las imágenes fusionadas*

		IHS	AWLP	Propuesto
CC	B	0.9135	0.9543	0.9208
	G	0.9431	0.9702	0.9584
	R	0.9517	0.9736	0.9592
	N	0.8898	0.9403	0.9435
ERGAS		3.487	2.227	2.734

Los resultados obtenidos empleando el método de fusión propuestos son, desde el punto de vista espectral, mejores que los obtenidos empleando el método IHS y casi tan buenos como los obtenidos al emplear métodos basados en transformaciones wavelet.

5.2. Calidad espacial

Desde el punto de vista espacial, puede observarse en la Fig.2 que la calidad de la imagen obtenida aplicando el método propuesto en este trabajo es tan buena como la obtenida empleando los métodos IHS y AWLP.

6. Referencias

- [1] R. Haydn, G. W. Dalke, J. Henkel, and J. E. Bare, "Application of HIS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement", *Proc. Int. Symp. Remote Sensing of Arid and Semi-Arid Lands*, Cairo, Egypt, 599-616, 1982.
- [2] P. S. Chavez Jr, S. C. Sides, and J. A. Anderson, "Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic", *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 57(3), 295-303, 1991.