

APPLICATION DE LA TRANSFORMÉE EN ONDELETTES À LA SIMULATION D'IMAGES SPOT MULTISPECTRALES DE RÉOLUTION 10 M

Thierry RANCHIN, Lucien WALD,
Marc MANGOLINI

Ecole des Mines de Paris, B.P. 207, 06904 Sophia Antipolis cedex, France

Aérospatiale SE/TO/T, B.P. 99, 06322 Cannes la Bocca cedex, France

RÉSUMÉ

ABSTRACT

On présente une méthode pour l'amélioration de la résolution géométrique des images multispectrales (XS) du satellite SPOT, à l'aide de l'image panchromatique associée (P). L'objectif recherché est la simulation d'images multispectrales à 10 m, notées XS-HR, dont les propriétés spectrales soient comparables à celles des images XS et les propriétés géométriques comparables à celles de P. Les outils utilisés pour réaliser cette fusion sont l'analyse multirésolution et la transformation en ondelettes.

A method is presented for increasing the spatial resolution of SPOT multispectral images (XS) from SPOT satellites by means of the corresponding panchromatic image (P). It aims at simulating 10 m resolution multispectral images, called XS-HR, that contain the same spectral information as the XS images. The change in geometrical information between XS and XS-HR is constrained by the high spatial frequencies in P. This fusion is performed by means of multiresolution analysis and the wavelet transform.

1 INTRODUCTION

Le satellite SPOT fournit des images panchromatiques (P) de résolution spatiale 10 m et multispectrales (XS) de résolution 20 m dans les bandes vert-jaune (XS1), rouge (XS2), et proche infrarouge (XS3). De nombreuses applications nécessitent à la fois la haute résolution spatiale de P et l'information spectrale fournie par XS. On voit donc émerger le besoin de fusionner ces données pour simuler des images multispectrales de haute résolution spatiale.

Une fois les images P et XS rendues géométriquement superposables, on simule des images multispectrales de haute résolution spatiale notées XS-HR.

2 MÉTHODES EXISTANTES

Ce type de fusion a déjà été envisagé et l'on trouve dans la littérature de nombreuses façons d'aborder le problème. Nous regrouperons les solutions proposées en deux catégories : celles qui combinent les radiométries (ou les luminances) des différentes bandes, et celles qui dissocient information

spectrale et information spatiale. Le cas particulier de la méthode P+XS développée par le CNES illustre la première catégorie, et sera pris comme référence pour la suite, car elle est commercialement utilisée par SPOT Image pour la réalisation de son produit nommé P+XS [1]. Cette méthode suppose que la bande P est spectralement la somme des bandes XS1 et XS2, approximation assez grossière. Les images multispectrales haute résolution, notées XP, sont synthétisées en répartissant la luminance de P entre les bandes XP1 et XP2, de telle sorte que le rapport des luminances entre les bandes 1 et 2 soit conservé. En notant L_k la luminance équivalente SPOT dans la bande k , ceci se traduit par :

$$L_{XP1} = 2 L_P \cdot \frac{L_{XS1}}{L_{XS1} + L_{XS2}}$$

$$L_{XP2} = 2 L_P \cdot \frac{L_{XS2}}{L_{XS1} + L_{XS2}}$$

L'ensemble des structures présentes dans la bande P ou la bande XS2 se retrouvent dans XP1, quelles que soient leurs échelles caractéristiques. On altère donc les structures d'échelles supérieures à 20 m initialement présentes dans XS1, modifiant



ainsi le contenu spectral de XP1 par rapport à celui de XS1. De même pour XP2. De plus, cette méthode ne permet pas de créer une image XP3, qui est obtenue par simple duplication des pixels de l'image XS3. Munechika *et al.* [2] affinent l'hypothèse précédente de recouvrement des bandes spectrales mais n'évitent pas l'altération spectrale.

Les méthodes de changement de base entrent dans la première catégorie. On considère l'espace vectoriel défini par les trois bandes spectrales XS1, XS2, et XS3. Un changement de repère est effectué de telle sorte que l'un des nouveaux axes représente une information la plus proche possible de celle de la bande P, selon un critère donné. On substitue alors à la projection des images XS sur cet axe l'image P de haute résolution, avant d'appliquer un changement de repère inverse du premier fournissant 3 images spectrales haute résolution. Le repère utilisé peut être défini par analyse en composantes principales (ACP) [3], par la technique IHS (Intensity-Hue-Saturation) [3, 4], ou par d'autres combinaisons des bandes XS [5]. Toutes ces méthodes présentent l'inconvénient majeur de modifier le contenu spectral des bandes XS. En effet, chaque image spectrale haute résolution est obtenue à partir de l'image P et de deux composantes du nouveau repère dont l'information provient des 3 bandes spectrales. Il y a mélange de toutes les bandes donc altération spectrale des images haute résolution.

Les méthodes de la seconde catégorie extraient certaines structures géométriques de l'image haute résolution P, pour les injecter successivement dans chaque image spectrale XS. Chaque image spectrale haute résolution résulte donc du mélange de l'image XS correspondante et de l'image P, mais pas des autres bandes spectrales. Les hautes fréquences spatiales peuvent être extraites par un filtrage passe-haut de l'image P. Elles sont ensuite ajoutées, pixel à pixel, aux images multispectrales XS [3]. Outre la dépendance des résultats vis-à-vis du filtre, l'addition des structures aux images gomme toute relation entre compte numérique et luminance. Il y a donc modification du contenu spectral. Dans cette catégorie, la méthode de Pradines, affinée par Price [2], répartit la luminance du pixel 20 m XS dans les quatre pixels correspondants XP, en donnant à ces quatre pixels la même importance relative que dans P. Son inconvénient majeur est la nécessité d'une forte corrélation entre l'image P et chaque image

XS. De plus, chaque pixel XS étant traité indépendamment de ses voisins, l'image résultante peut être très bruitée.

3 MÉTHODE ARSIS

Nous proposons une nouvelle méthode, appelée ARSIS pour "accroissement de la résolution spatiale par injection de structures", élaborée dans le but de préserver l'information spectrale des images XS. Pour passer de l'image multispectrale XS à une image multispectrale haute résolution sans en altérer l'information, il faut lui ajouter uniquement les structures manquantes, dont l'échelle caractéristique est comprise entre 10 et 20 m. La méthode ARSIS propose une solution à l'aide de l'analyse multirésolution, qui est un outil permettant de décrire les approximations successives d'une même image à des résolutions de plus en plus grossières, et de la transformée en ondelettes (T.O.) qui permet de modéliser la différence d'information entre deux approximations successives. On réalise ainsi une analyse détaillée des échelles spatiales caractéristiques des différents phénomènes présents dans une image [6, 7, 8].

Le concept d'analyse multirésolution peut être illustré par une pyramide. A la base de la pyramide, se trouve l'image initiale, que l'on représente par des approximations à des résolutions de plus en plus grossières au fur et à mesure que l'on gravit cette pyramide. Au sommet, l'approximation n'est plus constituée que d'un seul pixel. La différence d'information entre deux approximations est représentée par les coefficients d'ondelettes spécifiques à ces résolutions. L'image P et chaque image XS peuvent être représentées par deux pyramides dont les bases diffèrent d'un facteur 2. Le but est de prolonger la pyramide XS à l'aide de la pyramide P. On va pour cela utiliser les coefficients d'ondelettes contenant l'information comprise entre les résolutions 10 et 20 m dans l'image P. Ces coefficients étant fortement liés aux caractéristiques dynamiques de l'image dont ils sont issus, il n'est pas satisfaisant de les associer directement à l'image XS. Nous établissons donc un modèle entre les coefficients connus de l'image P et de l'image XS à des échelles supérieures à 20 m. A partir de ce modèle et des coefficients précédents

issus de P, on peut synthétiser les coefficients de XS représentant l'information comprise entre les résolutions 10 et 20 m. Il ne reste plus qu'à appliquer une transformée en ondelettes inverse à ces coefficients et à l'image XS considérée pour obtenir une image haute résolution XS-HR. Notons que, par construction, l'approximation à 20 m de l'image XS-HR obtenue est identique à l'image XS de départ. Par ailleurs, le modèle utilisé de type linéaire permet de s'affranchir des fonctions de transfert des instruments.

L'ondelette mère utilisée dans l'algorithme de Mallat doit être orthogonale afin d'assurer la décorrélation inter-échelles des structures. Une ondelette de Daubechies de régularité 2 a été choisie pour la compacité de son support [9]. L'hypothèse faite par la méthode ARSIS est une similitude de la variabilité locale des bandes P et XS, représentée par les coefficients d'ondelettes. La validité physique d'une image XS-HR est donc d'autant plus forte que sa bande spectrale recouvre celle de P. L'image XS3-HR pourra donc présenter certaines structures issues de la bande P et normalement invisibles en proche-infrarouge. Cependant, aucune méthode visant à améliorer la résolution de l'image XS3 à l'aide de l'image P n'échappe à cette limitation.

4 EVALUATION DE LA QUALITÉ DES IMAGES XS-HR

La méthode ARSIS est comparée à la méthode P+XS à l'aide de critères visuels et numériques. La définition de critères numériques de qualité des images XS-HR et XP est ardue en raison de l'absence de vérité terrain à 10 m. On peut cependant évaluer chacune des méthodes en travaillant à une résolution deux fois moindre. Nous avons donc construit des pseudo-images XS* de résolution 20 m à partir de l'image P dégradée à 20 m et des images XS dégradées à 40 m, en utilisant successivement les deux méthodes. Il est alors possible de comparer les images construites XS* aux images réelles XS. L'image XS3* réalisée par la méthode P+XS résulte d'une simple duplication des pixels de l'image XS3 dégradée à 40 m. Le tableau 1 rassemble quelques résultats statistiques.

Le biais indique une erreur systématique, alors que la différence des variances ou des entropies traduit une modification du contenu

informationnel. Le coefficient de corrélation indique la similitude globale des images XS* et XS. Enfin, l'écart-type de l'image différence (XS* - XS) permet d'évaluer la précision de l'estimation. Quelque soit le critère considéré, la méthode ARSIS fournit de meilleurs résultats que la méthode P+XS. La méthode P+XS accroît très fortement la quantité d'information pour les deux premières bandes, contrairement à la méthode ARSIS qui n'injecte que les petites structures. On peut remarquer la diminution d'entropie pour la bande 3. Pour la méthode P+XS, l'image XS3* contient la même information que l'image XS3 dégradée à 40 m, qui est inférieure à celle de XS3. En revanche, dans le cas d'ARSIS, cette diminution d'entropie est due à des anticorrélations locales relevées entre les images P et XS3.

Le tableau 2 donne la probabilité d'avoir, en un pixel, une erreur relative en valeur absolue inférieure à un seuil donné. On voit qu'avec la méthode ARSIS, la quasi totalité des pixels de l'image présentent une erreur relative inférieure à 10 %. On notera aussi que par cette méthode, le pourcentage de pixels présentant une erreur nulle (inférieure à 0,001%) est assez élevé (environ 20 %).

5 CONCLUSION

La méthode ARSIS permet donc de réaliser des images multispectrales haute résolution XS-HR de bonne qualité. L'utilisation de ces images pour des applications de classification apportera un résultat plus précis qu'avec les images XS. On peut améliorer la méthode en affinant le modèle de transformation spectrale des coefficients d'ondelettes, qui synthétise la physique du comportement spectral des hautes fréquences spatiales.

6 REFERENCES

- [1] ANONYMOUS, *Guide des utilisateurs de données SPOT*, 3 tomes, Editeurs CNES et SPOT Image, Toulouse, France, 1986.
- [2] C. K. MUNESHIKA, J. S. WARNICK, C. SALVAGGIO, J. R. SCHOTT, Resolution enhancement of multispectral image data to improve classification accuracy, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59, 1, 67-72, 1993.



- [3] P. S. CHAVEZ Jr., S. C. SIDES, J. A. ANDERSON, Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT Panchromatic, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **57**, 3, 265-303, 1991.
- [4] W. J. CARPER, T. M. LILLESAND, R. W. KIEFER, The use of Intensity-Hue-Saturation transformations for merging SPOT Panchromatic and multispectral image data, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **56**, 4, 459-467, 1990.
- [5] A. H. PELLEMANS, R. W. JORDANS, R. ALLEWIJN, Merging multispectral and panchromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **59**, 1, 81-87, 1993.
- [6] Y. MEYER, S. JAFFARD, O. RIOUL, L'analyse par ondelettes, *Pour la Science*, **119**, 28-37, 1987.
- [7] S. G. MALLAT, A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **11**, 7, 674-693, 1989.
- [8] T. RANCHIN, L. WALD, The wavelet transform for the analysis of remotely sensed images, *International Journal of Remote Sensing*, **14**, 3, 615-619, 1992.
- [9] I. DAUBECHIES, Orthonormal bases of compactly supported wavelets, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, **41**, 909-996, 1988.

	XS1		XS2		XS3	
	CNES	ARSIS	CNES	ARSIS	CNES	ARSIS
Biais (idéal : 0) relativement à la moyenne de XS	0,38 0,7 %	0,00 0,0 %	0,28 0,6 %	0,00 0,0 %	0,03 0,1 %	0,00 0,0 %
Variance XS* - variance vraie (valeur idéale : 0) relativement à la variance vraie	50 35 %	4 3 %	42 19 %	7 3 %	8 10 %	6 7 %
Entropie XS* - entropie vraie (valeur idéale : 0) relativement à l'entropie vraie	0,145 3,6 %	0,013 0,3 %	0,077 1,8 %	0,013 0,3 %	- 0,053 - 1,4 %	- 0,036 - 0,9 %
Coefficient de corrélation entre XS et XS* (valeur idéale : 1)	0,97	0,99	0,98	0,99	0,86	0,95
Ecart-type des différences (valeur idéale : 0) relativement à la moyenne de XS	3,76 6,5 %	2,03 3,5 %	3,10 6,4 %	2,23 4,6 %	4,65 8,5 %	2,84 5,1 %

Tableau 1. Statistiques sur les différences entre XS et XS* (en luminance ou valeur relative) pour une scène SPOT de la région de Barcelone du 11/09/90.

Seuils (%)	XS1		XS2		XS3	
	CNES	ARSIS	CNES	ARSIS	CNES	ARSIS
0,001	8,8	25,3	11,4	23,0	8,8	15,2
0,1	8,8	25,3	11,4	23,0	8,8	15,2
0,5	8,8	25,3	11,4	23,0	8,8	15,2
1	9,2	26,1	11,7	23,5	9	15,4
2	26,6	59,5	26,0	42,7	25,8	41,6
5	57,7	89,5	60,0	81,5	54	74,9
10	90,3	98,9	91,1	97,2	81,3	94,3
20	99,6	100	99,7	99,9	96,8	99,5
50	100	100	100	100	99,9	100
100	100	100	100	100	100	100

Tableau 2. Probabilité (en pour cent) d'avoir en un pixel une erreur relative (en valeur absolue et en pour cent) inférieure ou égale aux bornes indiquées. La valeur idéale est 100 pour le seuil de 0,001 %.