

文章编号: 0253-2239(2005)07-891-6

# 基于第二代小波的超谱遥感图像融合算法研究\*

赵春晖 刘春红 王克成

(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 超谱遥感图像包含了大量的波段, 波段之间的相关性较高, 采用信息融合技术可以降低超谱图像的分析难度。提出了一种结构新颖的第二代小波加权融合算法。首先将图像分解为两个序列, 用 2 阶 Neville 滤波器构造预测和更新算子, 对两个序列以矩形栅格和梅花形栅格的格式进行交替预测和更新; 再以各个波段的方差作为融合的特征, 进行特征级第二代小波加权融合, 最后对图像进行第二代小波重构。为了验证新方法的有效性, 采用机载可见光-红外成像光谱仪超谱遥感图像进行仿真, 并与典型融合方法主成分分析和离散小波变换的融合效果相比较。实验结果表明提出的第二代小波加权融合算法能够很好地保持图像的空间特性和光谱特性, 其熵值高于主成分分析融合结果 0.1949, 高于离散小波变换融合结果 0.7998。

**关键词:** 遥感; 图像加权融合; 第二代小波; Neville 滤波器

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A

## Research on Fusion of Hyperspectral Remote Sensing Image Based on Second Generation Wavelet

Zhao Chunhui Liu Chunhong Wang Kecheng

(School of Information and Communication, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

**Abstract:** There are hundreds of bands in hyperspectral remote sensing image and the bands are highly correlative, difficulty of analysis can be reduced by using fusion technology. A novel structure of second generation wavelet weighting fusion algorithm is proposed. Firstly, image is decomposed into two serials, which are predicted and updated by two-order Neville filter on rectangle and quincunx grid by turns. Secondly, feature level second generation wavelet fusion is carried on the updated serial by using the variance of each band as the feature of fusion. Finally the image is reconstructed by reverse second generation wavelet. In order to test the effect of the new method, hyperspectral remote sensing image of airborne visible and infrared imaging spectrometer is simulated on Pentium IV computer. Compared with typical fusion method such as principal component analysis and discrete wavelet transform, the result of the experiment shows that the proposed method can retain spatial and spectral feature, the entropy is bigger than principal component analysis 0.1949, and bigger than discrete wavelet transform 0.7998.

**Key words:** remote sensing; image weighting fusion; second generation wavelet; Neville filter

### 1 引 言

超谱成像光谱仪(Hyperspectral Spectrometer)的研制成功,使得人们能够获得高分辨率的遥感图像。与多光谱图像相比,超谱图像具有两个特点<sup>[1~3]</sup>: 1) 超谱图像的波段数目远远多于多光谱图像,提供了更为丰富的信息,可以解决许多在多光谱中不能解决的目标探测和分类问题。2) 超谱图像相邻波段间具有很高的相关性,谱间相关性要大于空间相关性。然而,上述特点也将给现有多光谱遥感图像处理办法应

用于超谱图像带来困难。

解决上述困难的方法之一是信息融合技术。信息融合针对不同环境条件,选择最佳的波段组合和分辨率,设计最适宜的时相叠加,这有利于提高遥感数据的使用效率,消除高波段数据的冗余性<sup>[4~6]</sup>;另一方面,多传感器的互补信息融合也提高了对影像的解译能力,为大规模的遥感应用研究提供一个良好的基础<sup>[7]</sup>。许多研究工作表明,进行多源影像融合,可以把不同传感器的优点结合在一起,提高对影

\* 哈尔滨学科后备带头人基金(2004AFXXJ)和哈尔滨工程大学基础科学研究基金(HEUF04098)资助课题。

作者简介: 赵春晖(1965~),男,黑龙江省汤原县人,教授,博士。主要从事信号与信息处理的研究。

E-mail: zhaochunhui@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2004-07-08; 收到修改稿日期: 2004-11-09

像的信息分析和提取能力,以广泛地应用于地形测绘和地图更新、土地资源调查、农业、森林资源点和保护、军事等领域<sup>[8]</sup>。

就国外超谱图像融合的研究进展来看<sup>[9~12]</sup>,效果都不太理想。目前国内对第二代小波的研究进展参见文献<sup>[13~16]</sup>,本文提出了基于第二代小波变换的超谱遥感图像加权融合算法。根据超谱图像信息表征层次的不同,融合可以在像素层、特征层和决策层上进行,本文提出的方法选取各波段的方差作为融合的特征,因而属于特征层融合。

## 2 第二代小波加权融合算法

### 2.1 算法原理

本文引进一种新颖的基于矩形栅格和梅花形栅格预测与更新的二维第二代小波构造算法<sup>[17]</sup>,该算

法在 Wim Sweldens 等<sup>[19]</sup>提出的提升算法上进行了发展,使人们更容易理解和构造二维第二代小波。算法的主要思想是对原始图像进行简单的多分辨率分割,然后交替地在矩形栅格和梅花形栅格上使用对偶提升(预测)和原始提升(更新)来改善其性能,向具有某一特性逐渐逼近(提升)。该算法构造第二代小波分为三个步骤:图像分割、水平/垂直提升和对角提升。

#### 步骤 1: 分割

分割的目的是将图像分割成相关联的两部分,本文采用间隔采样的方法将图像  $\lambda_{k+1}$  分解为  $\lambda_k$  和  $\gamma_k$ ,  $\lambda_k$  和  $\gamma_k$  可以形象地分别表示成一个棋盘格式红色样本点和黑色样本点,如图 1 所示。这种分割方式称为“棋盘”或“红-黑”分割<sup>[18]</sup>,它更为简单也非常接近于提升格式中的分裂步骤。

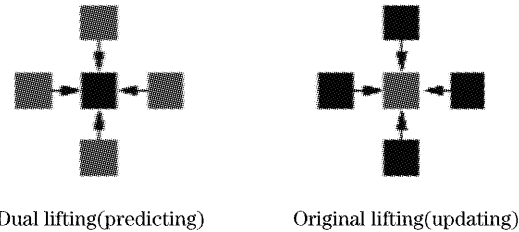
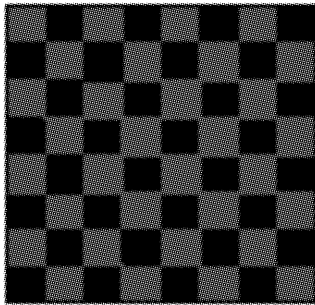


图 1 基于矩形栅格的预测与更新

Fig. 1 Predicting and updating based on rectangular grids

#### 步骤 2: 水平/垂直提升

红黑格式的样本点处于水平或垂直位置,在对红色样本点进行预测的时候,保持黑色样本点不变,利用 Neville 滤波器来预测红色样本点,预测的误差为  $e_k = \gamma_k - P(\lambda_k)$ ,式中  $P(\lambda_k)$  为预测算子,当图像的像素点表示为  $x_{i,j}$  时( $i, j$  为像素点的坐标),  $P(\lambda_k)$  是由 2 阶 Neville 滤波器来完成的:

$$P(\lambda_k) = \frac{x_{i-1,j} + x_{i,j-1} + x_{i+1,j} + x_{i,j+1}}{4}. \quad (1)$$

$$i \bmod 2 \neq j \bmod 2$$

其中 mod 是取余符号。更新是通过  $e_k$  来修正  $\lambda_k$ , 以使得修正后的  $\lambda'_k$  只包含图像  $\lambda_{k+1}$  的低频成分,即  $\lambda'_k = \lambda_k + U(e_k)$ , 这里  $U(e_k)$  为更新函数。在红黑格式变换中,

$$U(e_k) = \frac{x_{i-1,j} + x_{i,j-1} + x_{i+1,j} + x_{i,j+1}}{8}. \quad (2)$$

$$i \bmod 2 = j \bmod 2$$

#### 步骤 3: 对角提升

将步骤 2 获得的预测和更新后的红色样本点分解为紫色样本点  $\lambda_{k-1}$  和黄色样本点  $\gamma_{k-1}$ , 由于紫色样本点和黄色样本点处于对角的位置,因此在对其进行提升的时候,可将棋盘看作旋转  $45^\circ$  角,如图 2 所示。

黄色样本点可以通过其相邻的四个紫色样本点的线性差值来预测,预测的误差为  $e_{k-1} = \gamma_{k-1} - P(\lambda_{k-1})$ , 式中  $P(\lambda_{k-1})$  为预测算子,在紫黄格式变换中<sup>[19]</sup>:

$$P(\lambda_{k-1}) = \frac{x_{i-1,j-1} + x_{i-1,j+1} + x_{i+1,j-1} + x_{i+1,j+1}}{4}.$$

$$i \bmod 2 = 1 \text{ and } j \bmod 2 = 1 \quad (3)$$

更新是通过  $e_{k-1}$  来修正  $\lambda_{k-1}$ , 以使得修正后的  $\lambda'_{k-1}$  只包含图像  $\lambda_k$  的低频成分,即  $\lambda'_{k-1} = \lambda_{k-1} + U(e_{k-1})$ , 这里  $U(e_{k-1})$  为更新函数。在紫黄棋盘变换中,

$$U(e_{k-1}) = \frac{x_{i-1,j-1} + x_{i-1,j+1} + x_{i+1,j-1} + x_{i+1,j+1}}{8}.$$

$$i \bmod 2 = 0 \text{ and } j \bmod 2 = 0 \quad (4)$$

经过上述的矩形栅格和梅花形栅格预测与更新,得到的紫色样本点包含了原始图像的近似信息,而黄色样本点包含了图像的细节信息。在接下来的

步骤中,将对紫色样本重复步骤 2,从而产生进一步的多分辨率分解。

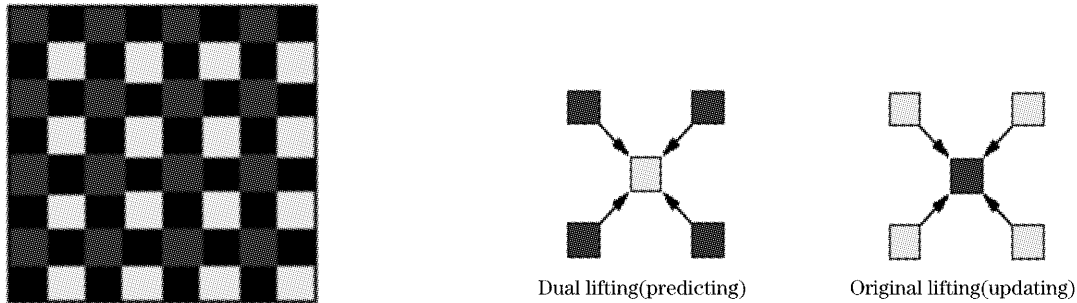


图 2 基于梅花形栅格的预测与更新

Fig. 2 Predicting and updating based on quincunx grids

在接下来的多层预测与更新中,Neville 预测和更新滤波器通常可完成如下:

$$P_x(i, j) = \sum_{(n, m) \in S_{\bar{N}}} a_{\bar{N}}(n, m)x(i + n, j + m), \quad i \bmod 2 \neq j \bmod 2, \quad (5)$$

$$U_x(i, j) = \sum_{(n, m) \in S_N} a_N(n, m)x(i + n, j + m)/2, \quad i \bmod 2 = j \bmod 2, \quad (6)$$

其中  $S_{\bar{N}}$  和  $S_N$  均为  $\{(n, m) \in Z^2 \mid (n + m) \bmod 2 = 1\}$  的一个子集,  $a_{\bar{N}}(s), s \in S_{\bar{N}}$  为实数域内的一组小波系数;  $S_N$  中的  $N$  值对应于所使用的滤波器原始的  $N$  阶消失矩,然后把  $S_N$  中含有相同系数的几个元素放在一起作为它的子集,如下式所示:

- $V_1 = \{(+1, 0), (0, +1), (-1, 0), (0, -1)\},$
- $V_2 = \{(+1, +2), (-1, +2), (-2, +1), (-2, -1), (-1, -2), (+1, -2), (+2, -1), (+2, +1)\},$
- $V_3 = \{(+3, 0), (0, +3), (-3, 0), (0, -3)\}$
- $V_4 = \{(+2, +3), (-2, +3), (-3, +2), (-3, -2), (-2, -3), (+2, -3), (+3, -2), (+3, +2)\}, \quad (7)$
- $V_5 = \{(+1, +4), (-1, +4), (-4, +1), (-4, -1), (-1, -4), (+1, -4), (+4, -1), (+4, +1)\},$
- $V_6 = \{(+5, 0), (0, +5), (-5, 0), (0, -5)\},$
- $V_7 = \{(+3, +4), (-3, +4), (-4, +3), (-4, -3), (-3, -4), (+3, -4), (+4, -3), (+4, +3)\}.$

图 3 所示为消失矩为  $N=4$  的 Neville 滤波器(记作 Neville4 滤波器),其中数字 1、2 分别对应于  $V_1$  和  $V_2$  相应位置的滤波器系数值,图 3(a)所示滤波器是矩形网格的图像分解滤波器,图 3(b)所示的

滤波器则是图 3(a)的滤波器经  $45^\circ$  旋转而成,可将矩形网格的信号转换为梅花形网格的信号。这种变换在水平方向和垂直方向都是对称的。

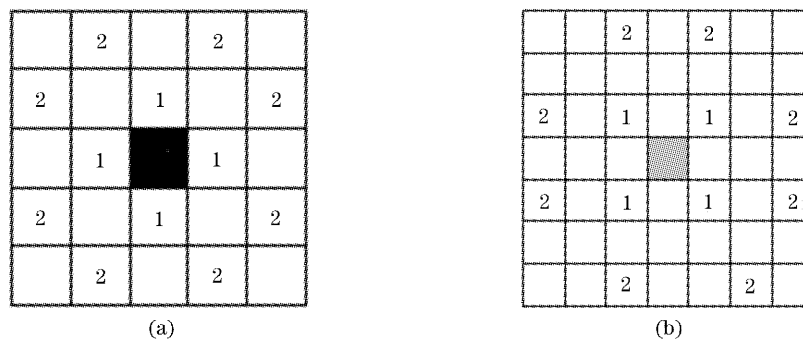


图 3 Neville4 滤波器。(a) 矩形网格, (b) 梅花形网格

Fig. 3 Neville4 filter. (a) Rectangular grids, (b) quincunx grids

### 2.2 超谱图像的第二代小波分解

超谱遥感图像的融合是在多光谱遥感图像融合的基础上发展起来的。由于几百幅超谱图像同成像时间、同分辨率、同传感器,因此对于超谱图像进行

融合分类不需要配准,直接对超谱图像的每一波段图像进行第二代小波分解即可。图4为本文算法的分解示意图。其中各符号的含义与2.1节算法原理中的符号含义相同。

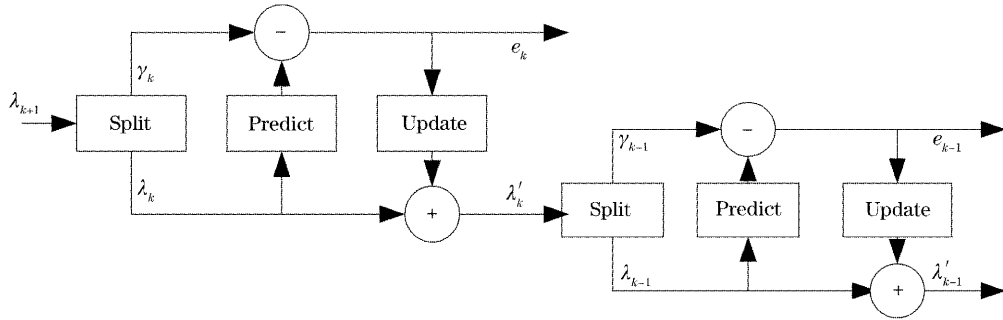


图4 第二代小波分解

Fig. 4 Decomposition of second generation wavelet

### 2.3 特征提取与权值确定

超谱图像不同波段含有不同的信息量,因而等权值融合是不合理的。要想充分利用上百个谱带,融合权值的选择就变得很重要。最简单的融合特征选择方式是根据专家的经验知识来挑选那些目视效果好的波段,另一个比较通用的方法就是对波段进行数理统计,找出最能代表图像信息的特征来。本文采用的是后一种方法。

经过反复实验比较发现方差是图像中最活跃的统计特征之一。它代表了图像中像元的灰度值与均值的偏离程度,是图像信息大小的一种度量。如果将方差作为特征提取的准则,那么其值越大,图像中所包含的信息就越丰富。因此定义第  $n$  个波段的方差  $\sigma_n^2$  为

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x_n(i, j) - \bar{x}_n]^2, \quad (8)$$

式中  $x_n(i, j)$  为第  $n$  个波段、 $(i, j)$  位置处的像素灰度值,  $\bar{x}_n$  为该波段图像的像素灰度均值,  $M$  和  $N$  是图像的横纵像元数。如果超谱图像共有  $L$  个波段,对于每幅分解后的子图像来说,最终归一化的权值系数为

$$W_n = \sigma_n^2 / \left( \sum_{n=1}^L \sigma_n^2 \right). \quad (9)$$

### 2.4 数据融合与图像重建

按照2.3节计算所得的融合权值将超谱图像融合成一幅图像,通过融合过程来降低超谱数据的维数并提取分类的特征。融合后的图像中包含了原来多幅图像的有效信息。图像重构的步骤与分解刚好相反。其步骤如图5。

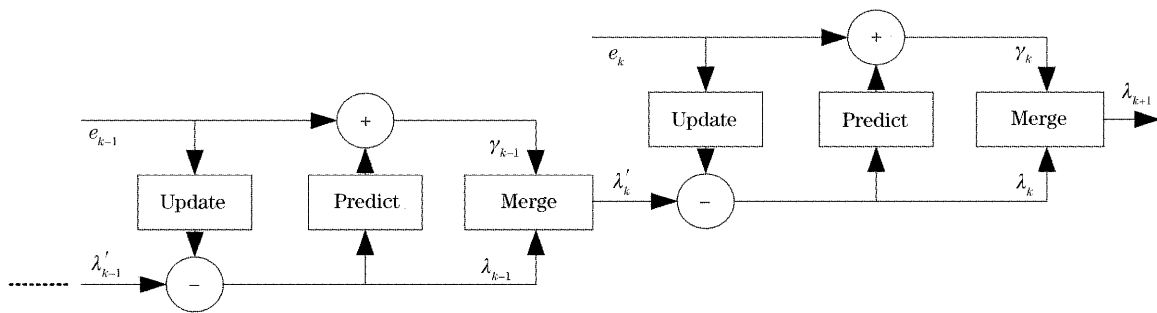


图5 第二代小波重建

Fig. 5 Reconstruction of second generation wavelet

### 2.5 第二代小波的优点

与第一代小波相比,本文引入的基于矩形和梅花形栅格预测与更新的第二代小波具有的主要优点是:

1) 构造简单,不依赖于傅里叶变换,所有的运算都在空间域进行,从而摆脱了对频域的依赖,易于

推广到一般性应用领域;

2) 所有运算都可作本位操作,节省内存;

3) 逆变换比较简单,只需改变代码执行的先后顺序,具有与正向变换相同的计算复杂性;

4) 易于构造非线性小波变换(如整数变换)。

### 3 实验仿真与结果分析

为了验证本文提出的融合算法的有效性,采用了机载可见光-红外成像光谱仪原始超谱遥感图像(图6)进行仿真分析。该图像取自1992年6月拍摄的美国印第安纳州西北部印第安遥感试验区的一部分,它包含了农作物和森林植被的混合区。图像的特点如表1所示。

对上述图像分别进行4层的第一代小波和第二代小波分解,并分别采用平均值(Average)加权和方差(Variance)加权的方法对分解后的图像进行融合。

为说明小波分解的多分辨率特性,本文还对该超谱图像进行了传统的主成分分析变换。图7(a)~图7(d)为各算法融合的结果。

表1 实验图像特点

Table 1 Characteristics of experimental image

Characteristics	Parameter
Spatial resolution	20 m×20 m
Image size	145 pixel×145 pixel
Pixel depth	16 bits
Spectral number	220
Bandwidth	400~2500 nm
Spectral resolution	Approximate to 10 nm

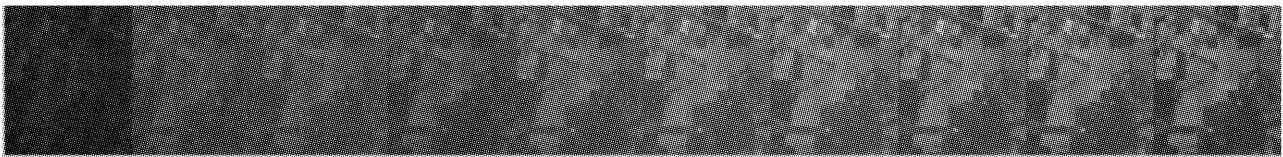


图6 机载可见光-红外成像光谱仪原始图像 (band1~band10)

Fig. 6 Original image of airborne visible and infrared imaging spectrometer (band1~band10)

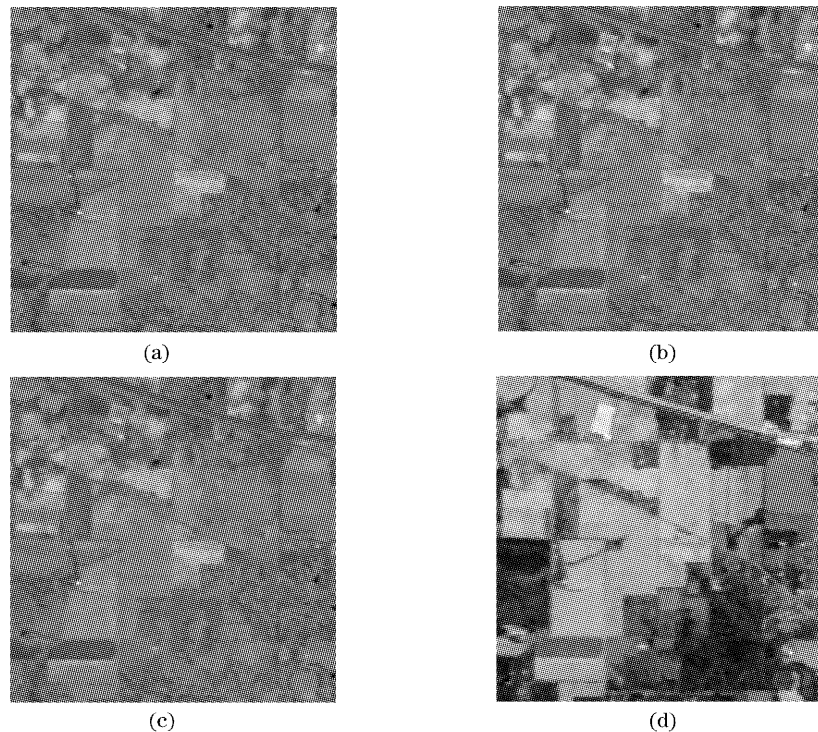


图7 (a)第二代小波平均值加权融合,(b)第二代小波方差加权融合,  
(c)第一代小波平均值加权融合,(d)主成分分析融合

Fig. 7 (a) Average weight fusion of second generation wavelet, (b) variance weight fusion of second generation wavelet, (c) average weight fusion of first generation wavelet, (d) Principal component analysis fusion

本文从图像目视效果比较和图像质量的定量分析两个方面来评价融合图像的质量。首先从目视效果上来看,主成分分析融合后的方差较大,因而图像的空间信息较为丰富,图像对比度好,但其光谱信息主要包含在其他主成分融合图像里。加权的小波融

合图像与主成分分析融合图像相比纹理层次更为丰富,既保持了光谱特性,又具有高的空间分辨率。

对图像的定量分析主要是基于数理统计方法的比较,本文采用了均值、方差和图像熵来评价融合后的图像。均值和方差描述了图像的动态范围,其值

越大,图像的信息量越丰富。图像熵也是一个能够更为准确度量图像信息量的函数。一般来说,图像的融合效果越好,信息量越丰富,熵值就越大。各种融合方法的定量分析见表 2。

表 2 各种融合方法的效果比较

Table 2 Comparison of various fusion methods

Fusion algorithm	Average	Variance	Entropy
Average weight second generation wavelet	2522.8	159.3512	9.2779
Variance weight second generation wavelet	3754.0	284.0239	10.0775
Average weight first generation wavelet	2522.8	159.3512	9.2777
Principal component analysis	3607.0	5038.200	9.8826

## 4 结 论

本文研究了基于第二代小波的超谱遥感图像融合算法。通过将图像分解为两个序列,在矩形栅格和梅花形栅格上分别对子序列进行预测和更新,达到了对图像进行多分辨率分解的目的。仿真实验表明,该算法既降低了超谱遥感图像的维数,又很好地保持了原始图像的空间特性和光谱特性,其融合效果在图像信息量和光谱保持能力上均优于传统的主成分分析和离散小波变换算法。该算法不仅适用于超谱图像,而且适用于多光谱图像融合以及不同分辨率的多光谱和全色图像的融合。

现有的很多评价标准都是对于两幅图像的融合进行评价,比如求原图像和融合后图像的信噪比(SNR)、相关系数、光谱扭曲度、均方根误差(RMSE)等。由于超谱图像波段众多,将其融合之后,所有的信息都集中到一幅图像中,若对融合图像和原始图像利用上述标准进行评价,显然不适合。因此,在超谱遥感图像的融合研究中,除了要研究更好的融合算法,还要研究适合超谱图像融合的评价标准。

## 参 考 文 献

- 1 Terry A. Wilson, Steven K. Rogers, Matthew Kabrisky. Perceptual-based image fusion for hyperspectral data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**(4): 1007~1017
- 2 Jiang Qingsong, Wang Jianyu. Study on signal-to-noise ratio estimation and compression method of operational modular imaging spectrometer multi-spectral images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1335~1340 (in Chinese)  
蒋青松, 王建宇. 实用型模块化成像光谱仪多光谱图像的信噪比估算及压缩方法研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(11): 1335~1340
- 3 Xiao Lifeng, Hu Hongzhang, Zhang Mei *et al.*. A near-infrared

spectrometer based on an integrated optical AOTF[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(3): 269~272 (in Chinese)  
肖立峰, 胡鸿璋, 张 梅 等. 一种基于集成光学声光可调谐滤波器的近红外光谱仪[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3): 269~272

- 4 Lori Mann Bruce, Cliff H. Koger, Jiang Li. Dimensionality reduction of hyperspectral data using discrete wavelet transform feature extraction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(10): 2331~2338
- 5 Susan M. Schweizer, José M. F. Moura. Efficient detection in hyperspectral imagery [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, **10**(4): 584~597
- 6 Zhong Zhang, Rick S. Blum. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application[J]. *Proc. IEEE*, 1999, **87**(8): 1315~1326
- 7 S. Das, W. K. Krebs. Sensor fusion of multispectral imagery [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(13): 1115~1116
- 8 Mahta Moghaddam, Jennifer L. Dungan, Steven Acker. Forest variable estimation from fusion of SAR and multispectral optical data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, **40**(10): 2176~2187
- 9 Alexander Toet, Eric M. Franken. Perceptual evaluation of different image fusion schemes[J]. *Displays*, 2003, **24**(1): 25~37
- 10 Zhang Ye, Zhang Junping. Wavelet-based fusion classification for hyperspectral images [J]. *Chin. J. Electron.*, 2002, **11**(4): 515~518
- 11 C. M. Chen, G. F. Hepner, R. R. Forster. Fusion of hyperspectral and radar data using the IHS transformation to enhance urban surface features [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003, **58**(1~2): 19~30
- 12 Chang Yang-lang, Chen Chia-Tang, Han Chin-Chuan. Hyperspectral and SAR imagery data fusion with positive boolean function[C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5093**: 765~776
- 13 Deng Jifeng. The 2nd generation wavelet transform and its application to remote sensing images [J]. *J. Image and Graphics*, 1998, **3**(2): 100~104 (in Chinese)  
邓集锋. 第二代小波变换及其遥感图像应用[J]. *中国图象图形学报*, 1998, **3**(2): 100~104
- 14 Tang Yan, Mo Yulong. Second generation wavelet applied to lossless compression coding of image [J]. *J. Image and Graphics*, 2000, **5A**(8): 699~702 (in Chinese)  
汤 焱, 莫玉龙. 第二代小波变换应用于图象的无损压缩编码[J]. *中国图象图形学报*, 2000, **5A**(8): 699~702
- 15 Quan Haiying, Yang Yuan, Zhang Yi *et al.*. An image fusion approach based on second generation wavelet transform [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2001, **23**(5): 74, 75, 79 (in Chinese)  
全海英, 杨 源, 张 懿 等. 一种基于第二代小波变换的图像融合算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2001, **23**(5): 74, 75, 79
- 16 Hu Xuelong, Lu Feng. An image compression system based on second generation wavelet transformation [J]. *J. Electronic Measurement and Instrument*, 2003, **17**(4): 37~42 (in Chinese)  
胡学龙, 陆 峰. 一种基于第二代小波变换的图像压缩方案[J]. *电子测量与仪器学报*, 2003, **17**(4): 37~42
- 17 Jelena Kovacic, Martin Vetterli. Nonseparable multidimensional perfect reconstruction filter banks and wavelet bases for  $R^n$  [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*. Part II, *Special Issue*, 1992, **38**(2): 533~555
- 18 Uytterhoeven Geert, Bultheel Adhemar. The red-black wavelet transform[C]. *IEEE Signal Processing Symposium*, Benelux. 1998. 191~194
- 19 Jelena Kovačević, Wim Sweldens. Wavelet families of increasing order in arbitrary dimensions[J]. *IEEE Transactions on Imaging Proceeding*, 2000, **9**(3): 480~496