

文章编号: 0253-2239(2005)05-593-5

# 可调节自适应遥感影像融合方法研究\*

邓磊 陈云浩\*\* 李京 陈志军

(北京师范大学资源学院, 北京 100875)

**摘要:** 大部分常用的遥感影像融合方法都存在一个缺陷: 只能产生一个特定的融合结果, 用户无法控制最终的结果应该保留多少光谱信息或细节信息。提出了一种基于小波变换的可调节自适应遥感影像融合方法, 该方法首先分别将待融合影像进行小波分解, 然后, 通过引入 2 个可调节参量, 在小波域内融合, 最后通过小波逆变换得到融合结果。使用法国地球资源探测卫星 (SPOT) 图像和陆地资源卫星专题绘图仪 (landsat TM) 图像, 将该方法与传统的小波变换融合法、强度色散饱和变换融合法和主成分变换法进行对比试验, 结果表明, 该方法可以在细节保留和光谱保持两方面达到不同程度的平衡, 在合理的参量组合下, 融合图像的目视效果和统计指标优于传统融合方法。

**关键词:** 信息光学; 遥感图像融合; 小波变换; 可调节

中图分类号: TP751 文献标识码: A

## Study on Adjustable Image Fusion Method for Remote Sensing

Deng Lei Chen Yunhao Li Jing Chen Zhijun

(College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

**Abstract:** Most of the commonly used image fusion methods have the same limitation, only one fused result is possible by using each of the method, the users have no control over how much spatial detail or spectral information should be retained. A wavelet-based adjustable image fusion method is presented. The two images are decomposed into sub-images with wavelet transform, respectively. By introducing two parameters that can adjust the fused image, these sub-images are fused in wavelet space. A fused image is achieved by inverse wavelet transform. To compare the performances of the proposed method with those of the commonly used image fusion methods, such as the usual wavelet fuser, the intensity-hue-saturation (IHS) fuser, and the principal component analysis (PCA) fuser, the SPOT and the landsat thematic mapper (TM) images are used to perform the experiment. The results show that the balance between spectral characteristics preservation and high spatial resolution retention can be achieved at different levels in image fusion. With some combination of the parameters, the visual effects and the statistical parameters indicate that the fused results are slightly better than those of the commonly used image fusion methods.

**Key words:** information optics; remote sensing image fusion; wavelet transform; adjustable

## 1 引 言

随着遥感技术的发展, 光学、热红外和微波等大量不同卫星传感器对地观测的应用, 获取的同一地区的多种遥感影像数据越来越多。通过融合不同传感器、不同入射角、不同分辨力 (时间分辨力和空间分辨力) 的遥感影像, 可以获得比单源数据更丰富、

更可靠、更有用的信息, 并可提高传感器系统的有效性和信息的使用效率<sup>[1]</sup>。对高空间分辨力的全色影像与低空间分辨力的多光谱影像的融合一直是影像融合研究中的热点之一。

迄今为止, 人们已提出多种融合方法, 如强度色散饱和 (Intensity-hue-saturation, IHS) 变换法<sup>[2]</sup>、

\* 国家 863 计划 (2002AA130020, 2002AA134090); 测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金 [WKL(03)0102] 资助课题。

作者简介: 邓磊 (1976~), 男, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事遥感图像处理研究。E-mail: dengl@ires.cn

\*\* 通信联系人。E-mail: cyh@bnu.edu.cn

收稿日期: 2004-06-24; 收到修改稿日期: 2004-10-26

主成分分析(Principal component analysis, PCA)融合法<sup>[3]</sup>以及基于小波的融合方法等<sup>[4,5]</sup>。但绝大多数方法都有一个缺陷:用户无法根据影像的特点和实际应用的需要在高分辨力保留和光谱保持之间进行取舍。然而,不同的应用对这两个方面有不同的要求。对特征提取、纹理提取、地图绘制等应用来说,影像的细节信息较为重要;对于遥感影像分类,则更注重光谱信息的准确、完整。本文提出一种基于小波变换的可调节自适应遥感影像融合方法,通过调节参量,可以在光谱保持和高分辨力保留之间进行调整。在合理的参量组合下,该方法得到的结果优于传统的融合方法,并且可以得到单独使用某种方法所无法实现的效果。

## 2 传统的基于小波的融合方法

小波变换<sup>[6~9]</sup>是图像的一种多分辨分析方法。基于小波的影像融合法一般可以分为两类<sup>[8]</sup>:系数替换法(WR)和系数选择法(WS)。系数替换方法是使用部分高分辨力影像小波分解后的系数替换掉相应部分低分辨力多光谱影像的小波分解系数,然后进行逆变换,实现小波融合。而系数选择法方法是基于某种系数选取规则(如模极大值法),从两幅待融合影像相应的小波系数中进行选取,组成新的小波系数,然后进行逆变换得到融合图像。

## 3 基于小波的可调节自适应融合方法

本文提出一种可调节自适应的融合方法:将高分辨力影像 A 与低分辨力多光谱影像 B 分别作塔式小波变换,得到低频近似分量 $S_A(2^j; x, y)$ ,  $S_B(2^j; x, y)$ 和 高频细节分量 $W_{kA}(2^j; x, y)$ ,  $W_{kB}(2^j; x, y)$ , 其中 $k=1, 2, 3$ 表示 3 个方向; $j=1, 2, \dots, j$ 表示不同的分辨力。为描述方便,称 $S_A(2^j; x, y)$ ,  $S_B(2^j; x, y)$ ,  $W_{kA}(2^j; x, y)$ 与 $W_{kB}(2^j; x, y)$ 为子图像。

两幅待融合图像进行小波分解后,其每一个分解水平上各自相对应的子图像的细节信息不同,根据不同应用的需要,我们应该能够选择感兴趣的信息进行融合。为此,构造一个量 $R_k(2^j; x, y)$ ,其表达式如下:

$$R_k(2^j; x, y) = \frac{D_{kA}(2^j; x, y)}{D_{kB}(2^j; x, y)}, \quad (1)$$

其中 $D_{kA}(2^j; x, y)$ 与 $D_{kB}(2^j; x, y)$ 分别是 $W_{kA}(2^j; x, y)$ 与 $W_{kB}(2^j; x, y)$ 中以 $(x, y)$ 为中心像元的 $n \times n$ ,  $n = 3, 5, \dots, k$ 窗口内的方差。

利用(2)式将 $R_k(2^j; x, y)$ 进行归一化,得到 $R_k(2^j; x, y)$ 在 $0 \sim 1$ 之间的值:

$$R_{k\_normal}(2^j; x, y) = \frac{R_k(2^j; x, y) - R_{k\_min}(2^j)}{R_{k\_max}(2^j) - R_{k\_min}(2^j)}, \quad (2)$$

其中 $R_{k\_normal}(2^j; x, y)$ 是归一化的 $R_k(2^j; x, y)$ ,  $R_{k\_min}(2^j)$ 是 $R_k(2^j; x, y)$ 的最小值, $R_{k\_max}(2^j)$ 是 $R_k(2^j; x, y)$ 的最大值。最终我们使用(3)式进行融合,得到融合的细节子图像。

$$F_k(2^j; x, y) = q \times W_{kA}(2^j; x, y) + (1 - q) \times W_{kB}(2^j; x, y), \quad (3)$$

其中 $F_k(2^j; x, y)$ 是融合后的子图像的滑动窗口中心点 $(x, y)$ 的值, $q$ 值按照(4)式取值:

$$q = \begin{cases} 0, & R_{k\_normal} \leq a \\ \frac{R_{k\_normal} - a}{b - a}, & a < R_{k\_normal} < b \\ 1, & R_{k\_normal} \geq b \end{cases} \quad (4)$$

式中 $a$ 和 $b$ 是可调节参量( $0 \leq a \leq b \leq 1$ )。对于影像的低频近似分量 $[S_A(2^j; x, y)$ 和 $S_B(2^j; x, y)]$ 也采用同样的方法处理。最后,进行小波逆变换,得到融合结果。

$R_{k\_normal}$ 将决定最终的融合效果: $R_{k\_normal}$ 越大( $\leq 1$ ),融合影像的细节保留能力越强,而光谱保持能力下降;反之, $R_{k\_normal}$ 越小( $\geq 0$ ),融合影像的光谱保持能力越强,细节信息的保留则相对减弱。通过调节(4)式中的参量 $a$ 和 $b$ ,就可以达到在细节保留和光谱保持两方面进行调整的目的。若 $R_{k\_normal}$ 大于或等于 $b$ ,则 $R_{k\_normal}$ 等于1,中心点的值将完全由高分辨力影像所决定;若 $R_{k\_normal}$ 小于或等于 $a$ ,则 $R_{k\_normal}$ 等于0,融合影像中心点的值将取决于多光谱影像;否则,就使用高分辨力影像和多光谱影像的加权值作为融合结果。

## 4 试验结果与讨论

本文采用北京附近的法国地球资源探测卫星(SPOT)全色影像和同一地区的陆地资源卫星专题绘图仪(landsat TM)(2, 3, 4 波段)影像进行试验。TM 影像空间分辨力为 30 m, SPOT 影像空间分辨力为 10 m。融合前,将 TM 影像配准到 SPOT 影像上,并将 TM 影像重采样到 10 m 分辨力。两幅影像的大小均为 256 pixel  $\times$  256 pixel。使用 tap-4 Daubechies 小波基,小波分解层数为 2,窗口尺寸为 3  $\times$  3。

图 1(a)是法国地球资源探测卫星全色彩像(SPOT PAN)影像,图 1(b)是 TM 波段 4(红), 3

(绿),2(蓝)的标准假彩色组合。图 1(c)和图 1(d)分别是使用强度色散饱和变换法和主成份变换法得到的融合影像,图 1(e)和图 1(f)分别是使用系数替

换法和系数选择法得到的结果。图 1(g)~图 1(l)是根据本文提出的方法,使用不同参量组合得到的融合结果。

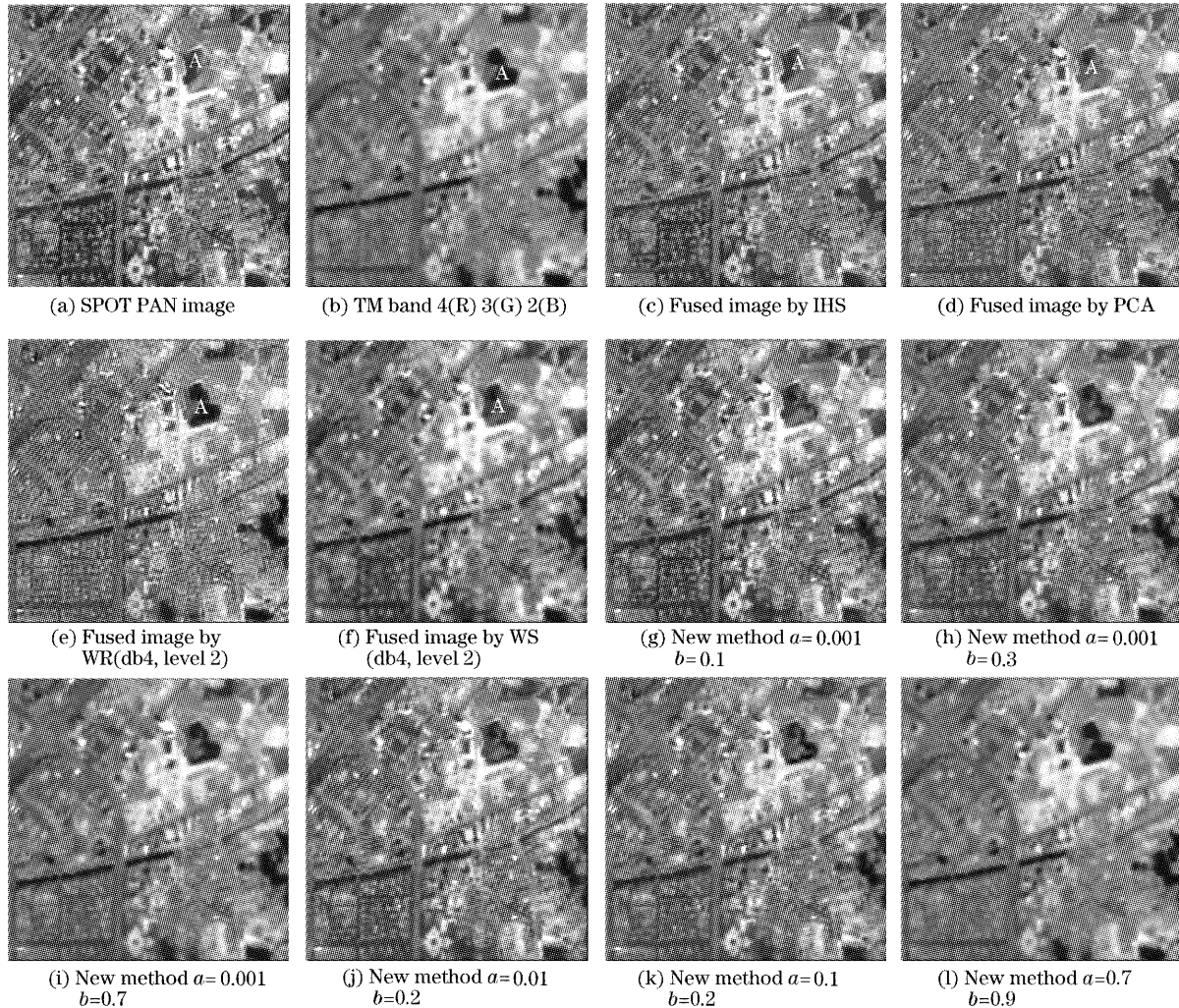


图 1 SPOT PAN 影像, TM 影像以及使用不同融合方法得到的影像

Fig. 1 SPOT PAN image, TM image, and the result images by different fusing methods

#### 4.1 目视比较与分析

强度色散饱和方法[图 1(c)]的细节信息保留能力较强,但是对光谱信息有较大的改变。主成分分析方法[图 1(d)]也可以较好地保留细节信息,且其色调与 TM 影像较为接近。系数替换法能够在保持光谱信息的同时,较好地保持细节信息,但产生了较严重的分块效应,使融合结果看起来不自然。系数选择法破坏光谱信息比较严重。

图 1(g)~图 1(l)是使用新方法的不同参量组合得到的融合图像。图 1(g)( $a=0.001, b=0.1$ )在色彩上看起来类似于图 1(f)(WS),但它却可以比系数选择法方法[图 1(f)]、系数替换法[图 1(e)]和

主成分变换法[图 1(d)]保留更多的细节信息。图 1(l)看起来在细节保留上不如其他方法,但它看起来依然比原始的 TM 影像要清晰。图 1(h)~图 1(k)是使用该方法得到的其他一些融合效果。图 1(i)和图 1(k)在细节保留和光谱保持上都比系数替换法图 1(e)和系数选择法图 1(f)好。而且,使用新方法得到的融合影像看起来更加平滑、自然。更为重要的是:新方法可以通过参量调节,实现不同的融合效果。比如, TM 影像中区域 A 是一片均匀水体,而 SPOT 影像中的相同区域并不均匀。图 1(c),图 1(d),图 1(f)中的 A 区都是不均匀的,而且,用户无法控制融合的程度。然而,通过调整参

量,使用本文方法得到的融合结果可以从最不均匀[图 1(g)]到最均匀[图 1(l)]。

#### 4.2 统计分析与评价

分析与评价统计参量一般分为两类<sup>[10]</sup>:一类反映空间细节信息,如方差、信息熵和清晰度;另一类反映光谱信息,如:扭曲程度、偏差指数与相关系数。

限于篇幅,表 1 仅列出了各种方法得到的融合图

表 1 各融合方法得到的融合影像第 2 波段统计特性

Table 1 The statistical properties of the fused band 2 of images by different methods

Images	Mean	Entropy	Average gradient	Spectral distortion	Correlation coefficient
SPOT	102.832	5.8888	5.026		
TM	93.771	5.3640	2.185		
IHS	104.610	5.7012	5.107	13.428	0.61288
PCA	110.530	5.7558	4.767	16.858	0.89350
WR	121.842	5.9328	5.825	28.089	0.92808
WS	125.013	5.9758	3.843	31.245	0.96708
New method					
( $a=0.001, b=0.1$ )	102.692	5.901	4.867	9.520	0.904
( $a=0.001, b=0.3$ )	99.824	5.747	3.834	6.470	0.930
( $a=0.001, b=0.7$ )	96.510	5.537	2.851	2.952	0.969
( $a=0.01, b=0.2$ )	101.694	5.856	4.366	8.413	0.917
( $a=0.1, b=0.2$ )	100.810	5.849	4.176	7.598	0.917
( $a=0.7, b=0.9$ )	93.785	5.365	2.205	0.039	0.999

2) 与强度色散饱和方法和主成分分析方法相比, i)  $a$  和  $b$  接近于 0 时, 新方法的标准差、熵和相关系数均高于强度色散饱和和主成分分析方法, 而光谱扭曲度却比强度色散饱和和主成分分析方法小得多。这表明新方法在保持光谱信息的同时, 可以达到与强度色散饱和方法相近的细节保留能力; ii) 新方法的光谱偏移度都小于强度色散饱和方法, 而相关系数都高于强度色散饱和方法, 这表明新方法能比强度色散饱和方法更好地保持光谱信息; iii) 通过调整  $a$  和  $b$  的值, 新方法得到的影像的清晰度能够达到甚至超过强度色散饱和方法和主成分分析方法。

3) 与系数替换法和系数选择法方法相比, i) 新方法的性能指标能够达到系数替换法和系数选择法方法的水平, 在某些方面高于系数替换法和系数选择法方法; ii) 更重要的是: 通过参量调节, 新方法可以得到单独使用某种小波融合方法所不能达到的效果。

图 2 是各种融合方法得到的融合图像在所有波段(2, 3, 4)的统计值的图形表示。

图 2(a) 显示了不同融合方法得到的结果在不同波段上的均值: 1) 使用新方法得到的影像在各个

像在第 2 波段的统计值。由表 1 可以看出:

1) 与原始影像相比, i) 新方法的清晰度均高于 TM 影像,  $a$  和  $b$  的值越小, 清晰度越高; ii)  $a$  和  $b$  增大, 新方法得到的融合影像与 TM 影像的均值不断接近, 相关系数增加。同时, 影像的清晰度依然略高于 TM, 这说明, 通过参量调节, 新方法在增强空间细节表现力的同时, 具有较强的光谱保留能力。

波段的均值都更接近于 TM 影像; 2) 随着  $a$  和  $b$  的增加, 融合影像的均值越来越接近于 TM。即当  $a=1, b=1$  时, 融合结果就是 TM 影像; 相反, 当  $a=0, b=0$  时, 融合结果就是 SPOT 影像。

图 2(b) 为使用不同方法所得图像的信息熵: 1) 使用任何  $a$  和  $b$  组合得到的影像的信息熵都高于 TM 影像; 2)  $a$  和  $b$  越小, 融合结果的熵越低。

图 2(c) 表示清晰度的情况: 1) 新方法融合影像的清晰度可以从低(TM 的平均梯度)变化到高(SPOT 的平均梯度); 2) 使用系数替换法方法的影像的清晰度很高, 这是由于该方法产生了分块效应, 导致统计值升高; 3) 在某些波段, 新方法超过主成分分析方法和强度色散饱和方法。

光谱扭曲程度和相关系数可以用来评价融合方法保留光谱信息的能力。从图 2(e) 和图 2(f) 可以看出: 1)  $a$  和  $b$  接近 0 时, 新方法的光谱扭曲度是所有方法中最小的, 而相关系数接近于 1; 2) 新方法的所有融合影像的光谱扭曲程度均低于其他方法, 说明新方法可以比其他方法更好地保持光谱信息。

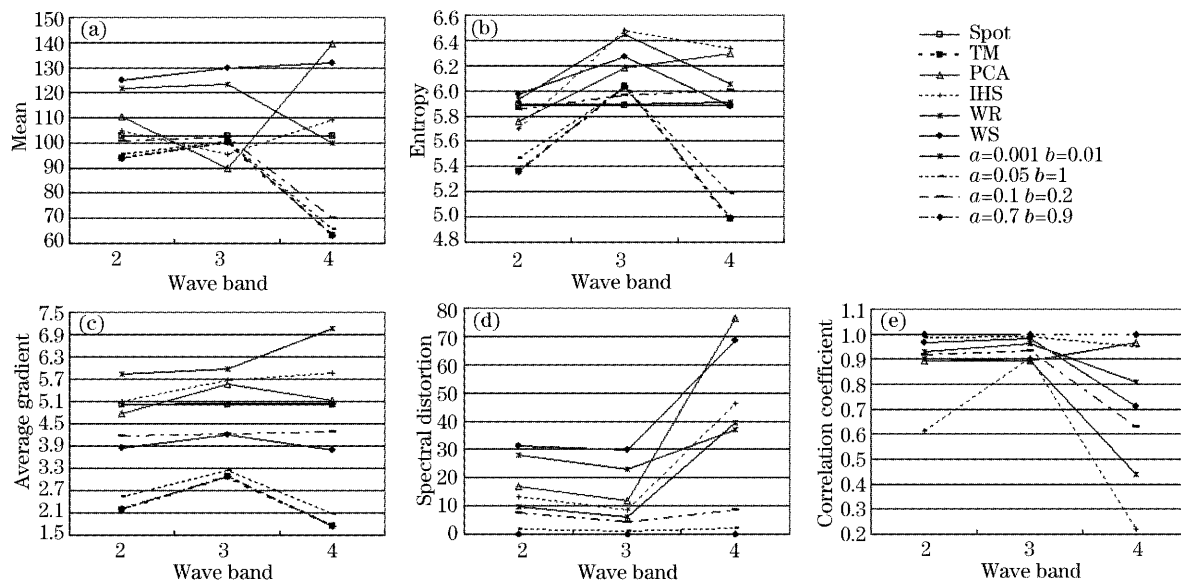


图 2 不同方法得到的融合结果在不同波段上的性能统计参量

Fig. 2 The graphs of statistical properties of different bands of the fused image by different method

## 5 结 论

本文提出了一种基于小波变换的可调节自适应遥感影像融合方法,与以往的融合方法不同,该方法提供可调节参量。通过参量的调节,所获得的融合影像可以在细节保留和光谱保持之间达到不同程度的平衡。实践表明:该方法的融合结果在引入纹理信息的同时,抑制了噪声的产生。当  $a$  和  $b$  较小时,得到的融合图像能够较好地表现细节信息,而光谱保持能力有所下降, $a$  和  $b$  值越小( $a, b \geq 0$ ),融合结果越接近于高分辨力影像;当  $a$  和  $b$  增大时,可以极大地保持融合图像的光谱信息,而细节信息受到一定程度的损失, $a$  和  $b$  的值越大( $a, b \leq 1$ ),融合影像越接近于多光谱影像。

由于引入了可调节参量,新方法可以得到单独使用某种传统的融合方法所无法实现的效果。在合理的参量组合下,新方法的融合图像在细节保留和光谱保持方面均要超过某些传统的融合方法,从而可以满足不同的应用需求,为增强遥感影像的信息清晰度、改善解译的精度以及提高信息的可靠性和使用效率,提供了技术上的支持。

## 参 考 文 献

- 1 Li Qin, Yu Xin. Study of image fusion methods appropriated to biological images[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4): 494~500 (in Chinese)  
李 勤,俞 信. 适合于生物图像的图像融合算法研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(4): 494~500
- 2 Jia Yonghong, Li Deren, Sun Jiabing *et al.*. Comparison of IHS

- transformation for integrating SAR and TM images [J]. *J. Remote Sensing*, 1998, **2**(2): 103~106 (in Chinese)
- 贾永红,李德仁,孙家炳等. 四种 IHS 变换用于 SAR 与 TM 影像复合的比较[J]. *遥感学报*, 1998, **2**(2): 103~106
- 3 Yang Cunjian, Xu Jun, Zhang Zengxiang. Comparison of substituting the different principle component in the fusion of TM and SAR image principle component change[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2001, (3): 30~35 (in Chinese)
- 杨存建,许 珺,张增祥. SAR 和 TM 图像主成分变换融合中不同主分量替换的比较[J]. *国土资源遥感*, 2001, (3): 30~35
- 4 J. Zhou, D. L. Civco, J. A. Silander. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data[J]. *INT. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(4): 743~757
- 5 Wu Yan, Yang Wanhai, Li Ming. Image fusion based on wavelet decomposition and evolutionary starategy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 671~676 (in Chinese)
- 吴 艳,杨万海,李 明. 基于小波分解和进化策略的图像融合方法[J]. *光学学报*, 2003, **23**(6): 671~676
- 6 S. G. Mallat. A theory for multiresolution signal decomposition; The wavelet representation[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(7): 674~693
- 7 J. Núñez, X. Otazu, O. Fors *et al.*. Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, **37**(3): 1204~1211
- 8 Zhu Jianping. Limitation of the scale factor in the optical-wavelet transformation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(11): 1025~1028 (in Chinese)
- 朱建平. 光学小波变换中尺度因子的极限[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(11): 1025~1028
- 9 Ni Ming, Jiang Zhiping, Lu Qisheng. Improvement of an optical wavelet transform[J]. *Chin. J. Lasers*, 1997, **A24**(3): 231~236 (in Chinese)
- 倪 明,蒋志平,陆启生. 一种光学小波变换的改进[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(3): 231~236
- 10 Cao Wen, Li Bicheng, Peng Tianqiang. A remote sensing image fusion method based on wavelet packet transform[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, **18**(4): 248~253 (in Chinese)
- 曹 闻,李弼程,彭天强. 一种基于小波包变换的遥感影像融合方法[J]. *遥感技术与应用*, 2003, **18**(4): 248~253