

基于小波变换的遥感图像融合方法研究

辛亚楠 邓磊*

(首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要 在针对同一地区低空间分辨率的多光谱图像与高空间分辨率的全色图像的融合方法中,传统的强度-色调-饱和度(IHS)变换容易出现颜色失真现象,而小波融合虽然能使融合图像在获得高空间分辨率的同时较好地保持原始光谱信息,但由于舍弃了高分辨率图像的低频分量,故很容易出现分块模糊现象。提出了一种基于IHS和小波变换融合的改进方法。提取多光谱图像强度分量并进行主成分分析(PCA),将变换得到的强度分量与全色图像进行小波融合,然后再进行IHS逆变换得到融合结果。经过主客观评价,实验证明,提出的融合方法不但充分表达了地物细节信息,而且很好地保留了原多光谱图像的光谱信息。

关键词 图像处理;图像融合;小波变换;强度-色调-饱和度变换;主成分分析

中图分类号 TP751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.021001

An Improved Remote Sensing Image Fusion Method Based on Wavelet Transform

Xin Yanan Deng Lei

(College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract For the researches on remote sensing image fusion of low-resolution multispectral image and high-resolution panchromatic image, traditional intensity-hue-saturation (IHS) transform faces a problem of color distortion while the traditional wavelet transform has a problem of blurring. To enhance the spatial resolution of fusion image as well as preserve spectral information of the original multispectral image, a novel efficient algorithm based on IHS and wavelet transform is presented. Firstly the intensity component of multispectral image is extracted. The intensity component is analyzed using principal component analysis (PCA) and the revised intensity component is merged with the panchromatic image based on wavelet transform. The fusion image is obtained via inverse IHS transform. Experiments prove that the proposed method quantitatively outperforms the traditional ones, in terms of geometric, radiometric, and spectral fidelity.

Key words image processing; image fusion; wavelet transform; intensity-hue-saturation transform; principal component analysis

OCIS codes 100.2980; 100.2960; 100.7410

1 引言

遥感图像融合可以将不同传感器、不同入射角和不同分辨率的遥感图像按照特定的算法进行处理,实现优势互补^[1],提高传感器系统和信息的使用效率^[2]。低空间分辨率的多光谱遥感影像与高空间分辨率的全色影像融合是其中的研究热点。为了使产生的新图像同时具有原来的多光谱特性以及高空间分辨率,以提高遥感图像的判读与分析精确度,众多研究者提出了行之有效的算法。传统的融合技术主要有加权平均融合、强度-色调-饱和度(IHS)变换^[3]、Brovey变换和主成分分析(PCA)等。此类方法虽然能有效提高融合图像的空间分辨率,但是当高分辨率图像与多光谱图像波段之间的光谱响应范围不一致时,会出现严重的频谱失真现象^[4]。

收稿日期: 2012-08-21; 收到修改稿日期: 2012-10-25; 网络出版日期: 2013-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(40801172)和首都师范大学大学生科学研究与创业行动项目资助课题。

作者简介: 辛亚楠(1990—),女,本科生,主要从事遥感图像处理方面的研究。E-mail: xinyanan31415@qq.com

* 通信联系人。E-mail: edenglei@139.com

小波变换凭借其良好的空域和频域的局域性^[5]在图像融合领域得到了广泛的应用。自从二维图像离散小波分解的快速算法被提出以来,小波分析得到了深入研究,涌现出一批基于小波变换的改进算法,其中包括小波变换与各种传统算法的组合^[6~8],并且这些算法已经应用到商业软件中,如 ERDAS 软件中的 IHS 与小波融合算法,PCA 与小波融合算法等^[9]。IHS 变换融合算法由于采用全色影像直接代替多光谱影像的强度(I)分量,虽然能够提升融合图像的空间分辨率,但是光谱失真较大。基于小波变换的融合方法正好能有效地增强多光谱图像的空间细节表现能力,保持融合前后图像的光谱特征,因此基于 IHS 和小波变换的融合方法取得了良好融合效果。传统组合方式是用多光谱影像经 IHS 变换后的 I 分量(或对应尺度小波分解后的 I 分量的低频分量)替代全色影像经小波分解之后的相应分辨率的低频分量。本文在此方法的基础上提出了一种改进算法,即对经过 IHS 变换之后的 I 分量进行主成分分析,再进行小波变换和逆 IHS 变换。实验表明,此方法充分表达了图像的细节信息并有效地保留了原多光谱图像的光谱信息。

2 基于 IHS 和小波变换的遥感融合新方法

2.1 IHS 变换

IHS 色彩空间从人的视觉系统出发,用强度(I)、色调(H)和色饱和度(S)来描述色彩。通常把色饱和度和色度,用来表示颜色的类别与深浅程度。人的视觉对亮度的敏感程度远强于对颜色浓淡的敏感程度,而 I 分量与色彩信息独立。为了便于色彩处理和识别,在图像识别和计算机视觉系统中大量算法都应用了 IHS 色彩空间系统^[10]。红绿蓝(RGB)色彩空间和 IHS 只是相同物理量的不同表达方式,它们之间的转换关系为

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = \frac{B}{R+G+B}; \quad (1)$$

$$h = \arccos \left\{ \frac{0.5[(r-g) + (r-b)]}{[(r-g)^2 + (r-b)(g-b)]^{1/2}} \right\}, \quad h \in [0, \pi] \text{ for } b \leq g \quad (2)$$

$$h = 2\pi - \arccos \left\{ \frac{0.5[(r-g) + (r-b)]}{[(r-g)^2 + (r-b)(g-b)]^{1/2}} \right\}, \quad h \in [\pi, 2\pi] \text{ for } b > g \quad (3)$$

$$s = 1 - 3\min(r, g, b), \quad s \in [0, 1] \quad (4)$$

$$i = (R+G+B)/(3 \times 255), \quad i \in [0, 1] \quad (5)$$

由以上可以看出,I 分量表达了 RGB 3 个数据的平均值,因此必存在三通道表达地物亮度信息的重叠冗余,不利于边界的辨识和纹理特征的表现。

2.2 主成分变换

主成分分析是建立在图像统计特征基础上的多维线性变换,具有方差信息浓缩\数据压缩的作用。变换后的第一主成分包含了总信息量的绝大部分(一般在 80% 以上),并且第一主成分相当于原来各波段的加权和,反映了地物总的辐射强度,而且降低了噪声,有利于细部特征的增强和分析^[11]。

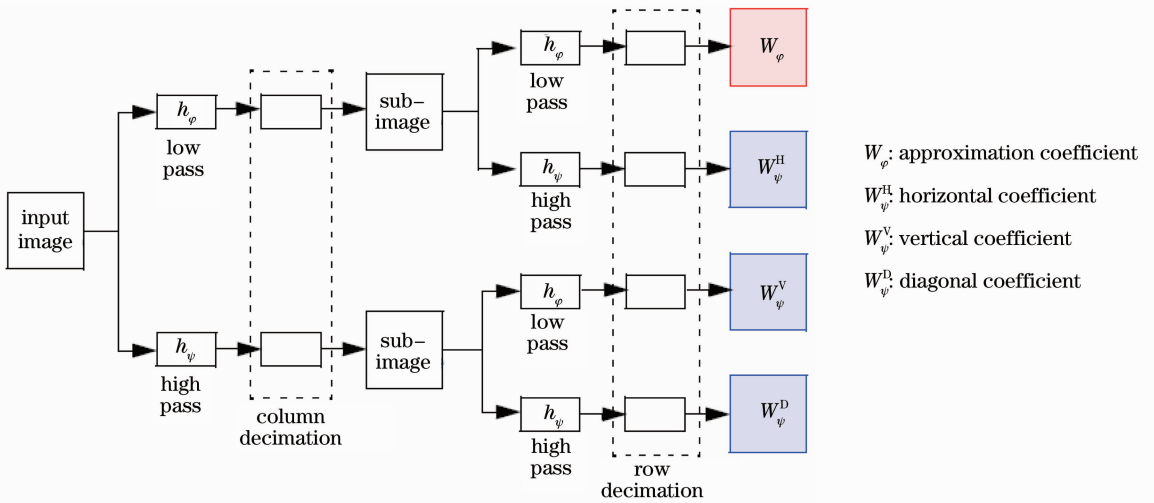
在图像处理中,对某一图像 \mathbf{X} 利用 PCA 变换矩阵 \mathbf{K} 进行线性组合,而产生一组新的图像 \mathbf{Y} ,表达式为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{KX}, \quad (6)$$

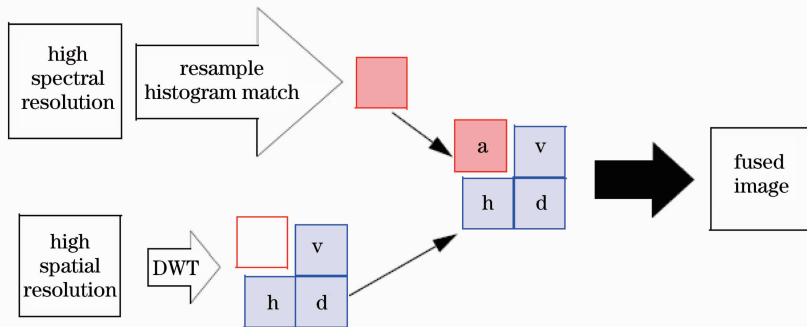
式中 \mathbf{X} 为变换前的多光谱空间的像元矢量, \mathbf{Y} 为变换后的主分量空间的像元矢量, \mathbf{K} 为变换矩阵。经过 PCA 变换后的几个主分量图像模式彼此之间是相互独立的,有利于应用变换后的主分量图像对于不同地物信息量做出全面的综合解译。本文就是利用主成分变换能极好地提取图像主要信息的能力,对 I 分量进行主成分变换,并提取变换之后的主分量,从而减少冗余信息,避免边界模糊。

2.3 小波融合

小波变换是空间、时间和频率的局部变换,可实现信号多尺度细化分析^[12],有效地提取信号的有用信息。凭借以上优势,小波变换在图像融合领域成为研究热点^[13,14]。小波变换理论建立在傅里叶变换理论之上,通过高频滤波器可以产生高频分量,相应地可以从源图像分离出低频分量。低频图像还可以逐级分解,分解的各子图像都包含着原始图像的空间结构信息,高频图像变化较剧烈,包含了原始图像的边缘信息。经过不同的低频-高频滤波器,可以产生不同的低频、高频分量。经过一级小波分解后,高频分量可包括水平、垂直和对角 3 个方向信息,极好表现了图像纹理,如图 1 所示。

图 1 离散小波变换过程示意图^[15]Fig. 1 Schematic diagram of the discrete wavelet transform (DWT) ^[15]

传统的小波融合方法主要分为以下 3 个步骤:1)将高光谱分辨率图像和高空间分辨率图像分别进行小波分解;2)用高光谱分辨率图像的近似子图像代替高空间分辨率图像经过小波分解的近似子图像;3)将合成的数据进行小波重构,获得融合图像。该过程如图 2 所示。

图 2 小波分解融合示意图^[9]Fig. 2 Schematic diagram of wavelet resolution fusion^[9]

小波融合结合其他融合的方法有单波段法、IHS 与小波融合法以及 PCA 与小波融合法。单波段法将多光谱影像的各波段依次与高空间分辨率影像进行小波融合,最后组合成一个多波段的影像。IHS 与小波融合法则首先将多光谱影像做 IHS 变换,得到的 I 分量和全色影像都进行小波变换并得到各自的 4 幅子图像,然后用全色影像经小波变换后得到的 3 个高频分量来替代 I 分量小波变换后得到的 3 个高频分量,对经过替代的亮度子图像做小波逆变换,最后对新的 I 分量和原来的色度、饱和度分量做 IHS 逆变换,得到融合后的彩色图像。PCA 与小波融合法原理类似于 PCA 融合,将多光谱影像进行主成分变换后得到的第一主成分与高分辨率全色影像进行小波融合,之后进行主成分逆变换得到融合影像。

2.4 新算法的图像融合步骤

考虑到 I 分量代表了 RGB 三通道像素的平均值,其中包括了重叠信息,易造成边界模糊,特别是对于地物丰富度高或交错性强以及 RGB 三通道反射亮度很相似的图像,这种现象更为严重,因此,对 I 分量进行主成分分析就显得尤为重要。本文提出的算法流程图如图 3 所示。

具体的图像融合步骤如下:

- 1) 对多光谱低分辨率影像进行 IHS 变换,并提取 I 分量;
- 2) 依据全色影像对多光谱图像的 I 分量进行直方图匹配,并进行主成分变换(PCA 变换);

3) 将修正后的 I 分量和全色影像进行小波融合;

4) 将小波融合后的 I 分量与原多光谱影像的 H 和 S 分量进行 IHS 逆变换, 得到融合后影像。

为了验证本算法的特性, 对北京地区 SPOT5 多光谱影像数据(分辨率为 10 m)和 SPOT5 全色影像数据(分辨率为 2.5 m)进行了融合实验。实验中小波分解方法均采用二维离散小波变换(2DWT), 小波基选用双正交样条小波 bior 3. 1, 将全色影像进行 2 层分解。用来进行融合效果对比的其他方法包括单波段法小波融合^[9]、IHS 小波融合^[16]以及 PCA 小波融合方法^[9]。

3 实验结果分析

3.1 主观评价

主观评价是观察者根据事先规定的评价尺度、自己的经验或参照一组标准图像对被评价的图像进行目视解释, 做出质量判断。

通过对比图 4 所示各种算法的融合结果可以明显看出, 利用本文提出的算法融合后的影像在图像细节表现上有显著优势, 同时又较好地达到了光谱保持的目的。

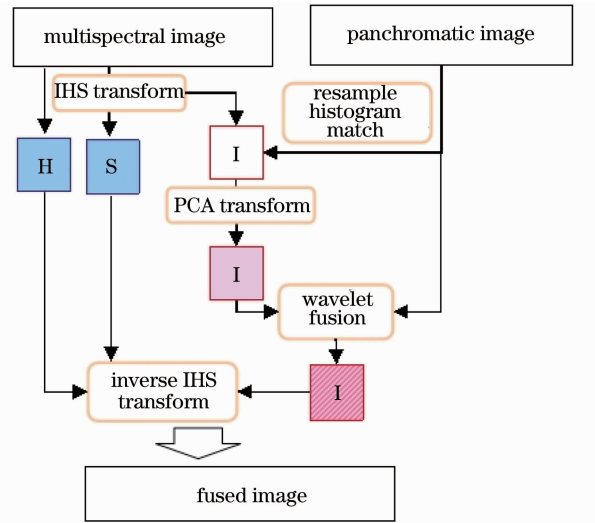


图 3 融合流程图

Fig. 3 Flow chart of image fusion

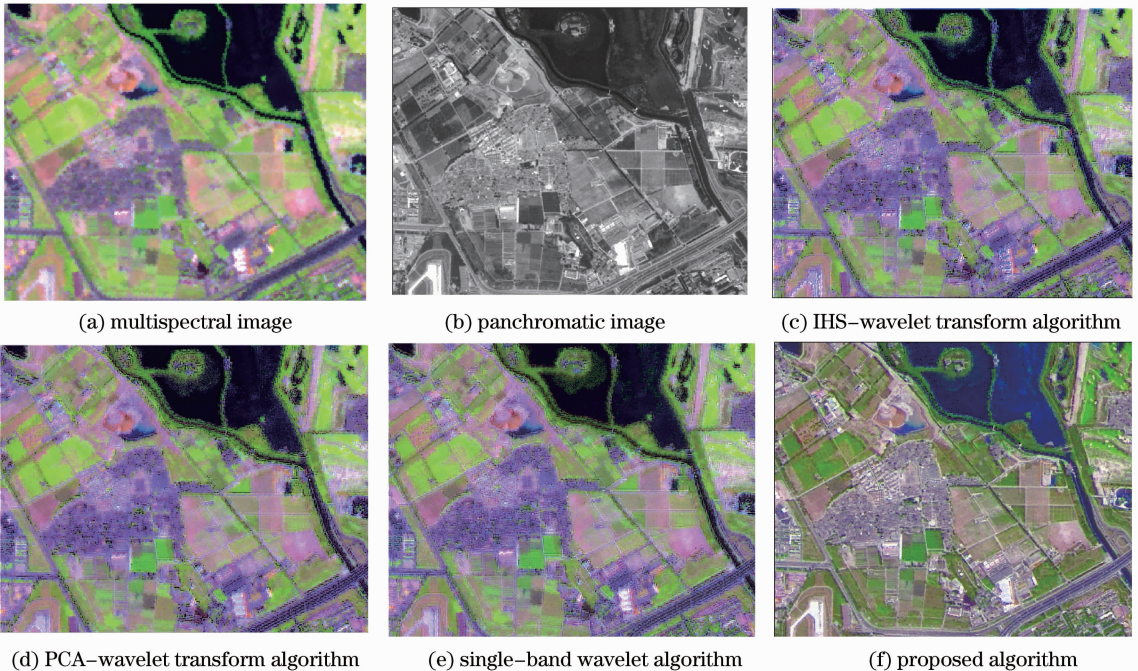


图 4 图像不同算法融合图像对比

Fig. 4 Comparison of image fusion result by different algorithms

3.2 客观评价

3.2.1 信息熵

融合图像的熵值大小反映了其包含的信息量的多少, 熵值越大, 说明融合效果越好。熵计算公式为^[17]

$$H = - \sum_{i=1}^n p_i \lg p_i, \quad (7)$$

式中 p_i 为融合后各灰度频率, n 为图像灰度阶。

3.2.2 平均梯度

平均梯度反映了图像细节反差程度和纹理变化特征,一般来说,平均梯度值越大,表明图像越清晰,融合效果越好。平均梯度计算公式为^[17]

$$\nabla \bar{G} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\Delta_x f(i,j)^2 + \Delta_y f(i,j)^2}, \quad (8)$$

式中 $\Delta_x f(i,j), \Delta_y f(i,j)$ 分别为 $f(i,j)$ 沿 x 和 y 方向的差分。

3.2.3 标准差

标准差反映了图像纹理信息的大小,图像的标准差越大,说明图像的灰度级越分散,图像的纹理越清晰。标准差计算公式为^[8]

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[xi - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi \right]^2}. \quad (9)$$

3.2.4 均值

均值反映了图像的平均亮度,均值在 128 附近说明图像亮度适中,视觉效果较好。公式如下:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n xi. \quad (10)$$

统计结果如表 1 所示。

表 1 图像客观评价数据统计

Table 1 Objective evaluation of fusion performance

		Entropy	Average gradient	Standard deviation	Mean
Multispectral image	R	7.24	17.35	56.98	129.77
	G	7.41	18.67	56.56	129.45
	B	7.72	21.28	54.73	126.75
Panchromatic image		3.75	22.25	58.52	127.08
IHS-wavelet transform algorithm	R	7.34	18.61	57.88	129.22
	G	7.49	19.54	58.37	129.11
	B	7.75	20.66	56.28	126.88
PCA-wavelet transform algorithm	R	7.33	18.57	56.13	129.54
	G	7.44	19.15	57.80	129.56
	B	7.80	20.52	58.65	126.57
Single-band wavelet algorithm	R	7.44	20.70	56.90	129.76
	G	7.50	21.48	57.49	129.44
	B	7.79	22.45	57.69	126.76
Proposed algorithm	R	7.65	21.31	60.26	128.23
	G	7.54	22.50	56.02	129.23
	B	7.79	21.79	57.92	127.97

由统计数据可以看出本文提出的融合方法在信息熵、平均梯度、标准差和均值指标对比上都具有明显优势。

4 结 论

提出了一种针对低空间分辨率多光谱影像和高空间分辨率全色影像的融合新算法。对多光谱图像进行 IHS 变换,提取 I 分量与全色影像进行直方图匹配。然后对匹配后的 I 分量进行主成分分析与全色影像进行小波融合,最后通过 IHS 逆变换得到融合后图像。经过主、客观评价,表明新方法是行之有效的,在处理低空间分辨率多光谱图像和高空间分辨率全色图像的融合中,既增加了图像解析性,突出了目标的特征信息,又较好地保留了原多光谱影像的光谱信息,达到了优势互补的效果。

参 考 文 献

- 1 Deng Lei, Chen Yunhao, Li Jing *et al.*. Study on adjustable image fusion method for remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 593~597
邓磊, 陈云浩, 李京等. 可调节自适应遥感影像融合方法研究[J]. 光学学报, 2005, **25**(5): 593~597
- 2 Li Qin, Yu Xin. Study of image fusion methods appropriated to biological images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(4): 494~500
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
- 3 W. J. Carper, T. W. Lillesand, R. W. Kieffer. The use of intensity hue saturation transformation for merging SPOT panchromatic and multispectral image data [J]. *Programm. Eng. Remote Sensing*, 1990, **56**(4): 459~467
- 4 Zhu Kang, He Xinguang. Selective remote sensing image fusion method based on the local feature of contourlet coefficients [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(2): 021001
朱康, 贺新光. 基于Contourlet系数局部特征的选择性遥感图像融合算法[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(2): 021001
- 5 Li Huihui, Guo Lei, Liu Hang. Research on image fusion based on the second generation curvelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 657~662
李晖晖, 郭雷, 刘航. 基于二代Curvelet变换的图像融合研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(5): 657~662
- 6 Yu Sen, Chen Chunxiang. Image fusion based on KPCA and wavelet transform[J]. *J. Guilin University of Technology*, 2009, **29**(4): 555~560
于森, 陈春香. 一种基于KPCA与小波变换的遥感图像融合算法[J]. 桂林工学院学报, 2009, **29**(4): 555~560
- 7 M. Gonzalez-Audicana, J. L. Saleta, R. G. Catalan *et al.*. Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2004, **42**(6): 1291~1299
- 8 Chang Huawen, Chen Chunxiang. Image fusion based on HSV color space model and wavelet transform [J]. *Computer Engineering and Design*, 2007, **28**(23): 5682~5684
常化文, 陈春香. 基于HSV变换与小波变换的遥感图像融合[J]. 计算机工程与设计, 2007, **28**(23): 5682~5684
- 9 ERDAS. ERDAS Field Guide[EB/OL]. http://geospatial.intergraph.com/Libraries/Tech_Docs/ERDAS_Field_Guide.sflb.ashx, 2010
- 10 Liu Zhe. Research on Remote Sensing Image Processing Based on Information Fusion [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002. 31~32
刘哲. 基于信息融合的遥感图像处理方法研究[D]. 西安:西北工业大学, 2002. 31~32
- 11 Luo Yan, Liu Rong, Zhu Yufeng. Remote sensing image fusion based on PCA+astrous wavelet transform[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, **34**(6): 108~109
罗艳, 刘荣, 朱煜峰. 基于PCA+astrous小波融合方法[J]. 测绘科学, 2009, **34**(6): 108~109
- 12 Zhang Lili, Fu Wei, Zhao Na. The application of multi-wavelet transform in remote sensing image fusion [J]. *Application of Electronic Technique*, 2006, (11): 28~30
张丽丽, 付炜, 赵娜. 多小波变换在遥感图像融合中的应用[J]. 电子技术应用, 2006, (11): 28~30
- 13 Liu Bin, Peng Jiexiong. Image fusion based on non-separable orthogonal compact supported wavelet [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1214~1218
刘斌, 彭嘉雄. 具有紧支撑正交非张量积小波的图像融合[J]. 光学学报, 2004, **24**(9): 1214~1218
- 14 Wang Xiaojun, He Tongdi. Multisensor image fusion using wavelet based on Contourlet transform [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(9): 68~72
王小军, 何同弟. 基于小波-Contourlet变换的多传感器图像融合[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(9): 68~72
- 15 R. Gonzalez, R. Woods. Digital Image Processing [M]. New Jersey: Prentice Hall, 2001
- 16 Roger L. King, Jianwen Wang. A wavelet based algorithm for pan sharpening landsat 7 imagery[C]. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001, 849~851
- 17 Yang Fanglin, Guo Hongyang, Yang Fengbao. Study of evaluation methods on effect of pixel-level image fusion[J]. *J. Test and Measurement Technology*, 2002, **16**(4): 276~279
阳方林, 郭红阳, 杨风暴. 像素级图像融合效果的评价方法研究[J]. 测绘技术学报, 2002, **16**(4): 276~279