

文章编号: 0253-2239(2005)05-598-5

基于方向金字塔框架变换的遥感图像融合算法*

李振华¹ 敬忠良^{1,2} 孙韶媛¹ 刘刚¹

(1 上海交通大学电子信息与电气工程学院 航空航天信息与控制研究所, 上海 200030)
(2 上海交通大学空天科学技术研究院, 上海 200030)

摘要: 为了综合利用多光谱遥感图像与全色遥感图像之间的互补信息, 提出了一种方向金字塔框架变换 (SPFT), 并基于此变换提出了一种遥感图像融合算法。具体融合过程是将多光谱图像的每个波段分别与高分辨力全色图像进行融合, 首先将高分辨力全色图像与多光谱图像的待融合波段进行直方图匹配, 然后对该波段图像以及直方图匹配后的高分辨力全色图像分别进行方向金字塔框架变换分解, 融合过程就是对两图像方向金字塔框架变换分解后的系数进行组合, 最后对组合后的系数进行方向金字塔框架逆变换即可得到该波段图像与高分辨力全色图像的融合图像。实验结果表明该算法在性能上优于基于亮度-色调-饱和度 (IHS) 的彩色空间变换以及基于离散小波框架变换 (DWFT) 的遥感图像融合方法, 尤其对源图像之间存在配准误差的情况。

关键词: 遥感; 图像融合; 方向金字塔框架变换; 直方图匹配

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A

Remote Sensing Image Fusion Based on Steerable Pyramid Frame Transform

Li Zhenhua¹ Jing Zhongliang^{1,2} Sun Shaoyuan¹ Liu Gang¹

(1 *Institute of Aerospace Information and Control, School of Electrical and Information Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030*)
(2 *Institute of Aerospace Science & Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030*)

Abstract: In order to integrate two registered high spatial resolution panchromatic image and low spatial resolution multispectral image of the same scene, a new remote sensing image fusion algorithm based on a novel steerable pyramid frame transform (SPFT) is proposed. Each band of the multispectral image is combined with the panchromatic image. In the individual band fusion, histogram matching is first performed on the panchromatic image to obtain a new high spatial resolution image with a uniform histogram as the band to be fused of the multispectral image. Then, the histogram matched panchromatic image and the band to be fused of the multispectral image are both decomposed by the SPFT. The SPFT coefficients are combined to produce the composite coefficients. Finally, the fused image of the panchromatic image and the band to be fused of the multispectral image is obtained by performing inverse SPFT. Experimental results show that the proposed image fusion algorithm outperforms the traditional methods based on the intensity-hue-saturation (IHS) transform and discrete wavelet frame transform (DWFT), especially in situations where the source images are not perfectly registered.

Key words: remote sensing; image fusion; steerable pyramid frame transform; histogram matching

1 引 言

图像融合^[1]是多传感器信息融合中可视信息的融合, 它利用各成像传感器不同的成像方式, 为不同的影像提供互补信息, 增加图像信息量, 减少原始图像数据量, 提高对环境的适应性, 以获得更可靠、更

准确的有用信息供观察或进一步处理。在遥感应应用中, 多光谱成像传感器可获得多个光谱波段的遥感图像, 但成像分辨力低清晰度差, 而全色成像传感器可获得高分辨力的全色遥感图像, 但不具光谱信息。通过多光谱图像与高分辨力图像的融合可获得高分

* 国家自然科学基金 (60375008)、国家 863 计划 (2001AA135091)、航空科学基金 (02D57003)、上海市科技攻关重大项目 (02DZ15001)、高校博士点基金 (20020248)、航天支撑技术基金 (2003-1.3.02) 资助课题。

作者简介: 李振华 (1976~), 男, 山东泰安人, 上海交通大学博士研究生, 主要从事图像配准及融合方面的研究。

E-mail: randy_lee@sjtu.edu.cn

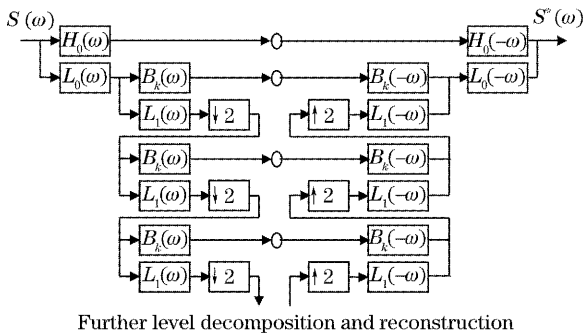
收稿日期: 2004-08-23; 收到修改稿日期: 2004-10-26

辨力的多光谱图像。

传统的像素级遥感图像融合方法为基于亮度-色调-饱和度 (Intensity-hue-saturation, IHS) 彩色空间变换、基于主成分分析 (Principal component analysis, PCA)、基于 Brovey 变换以及基于高通滤波的融合方法^[2~4]。基于亮度-色调-饱和度彩色空间变换的遥感图像融合方法是遥感领域应用较多的一种融合方法,该方法能较好地保留全色图像的地面高分辨力信息,但会引入较严重的光谱(彩色)畸变。最近多尺度分解方法被广泛应用于遥感图像融合处理中,典型的为基于离散小波变换 (Discrete wavelet transform, DWT) 以及基于离散小波框架变换 (Discrete wavelet frame transform, DWFT) 的遥感图像融合方法^[5~8]。基于多尺度分解的遥感图像融合方法在性能上优于传统的遥感图像融合方法。离散小波框架变换具有平移不变性,在源图像之间的配准存在小的位移误差时,基于离散小波框架变换的遥感图像融合方法的融合效果仍然较好。但由于离散小波框架变换不具有旋转不变性,当源图像之间的配准存在小的旋转误差时,该方法的融合效果会受到配准误差的较大影响。本文提出了一种方向金字塔框架变换,并将其用于遥感图像融合之中,克服了以上融合方法的不足。

2 方向金字塔框架变换

图 1 为频域内的方向金字塔变换分解和重构示意图^[9,10],其中 $S(\omega)$ 和 $S^*(\omega)$ 为原始图像和重构后的图像, $H_0(\omega)$ 、 $L_0(\omega)$ 和 $L_1(\omega)$ 分别为高通、低通和窄带低通滤波器, $\{B_k(\omega) | (k=1, 2, \dots, K)\}$ 是具有方向选择特性的带通滤波器组。图 1 中“ $\downarrow 2$ ”和“ $\uparrow 2$ ”分别表示降 2 采样和升 2 采样。在第一级方向金字塔变换中通过使用滤波器 $L_0(\omega)$ 和 $H_0(\omega)$, 一幅图像首



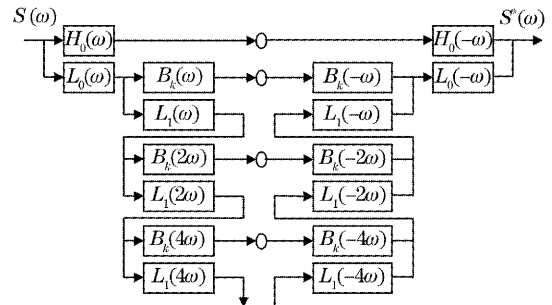
Further level decomposition and reconstruction

图 1 方向金字塔变换分解和重构示意图 ($k=1, 2, \dots, K$)

Fig. 1 The decomposition and reconstruction processes of the steerable pyramid transform ($k=1, 2, \dots, K$)

先被分解成低通和高通两个子带,图像的低通子带被继续分解成一系列具有方向选择特性的带通子带和一个更低频子带。下一级方向金字塔变换就是采用 $\{B_k(\omega) | (k=1, 2, \dots, K)\}$ 和 $L_1(\omega)$ 分别对上一级降 2 采样后的更低频子带进行滤波。图 1 中的椭圆代表各级方向金字塔变换分解后的子带系数。方向金字塔逆变换就是以上过程的逆过程。

根据等效易位定理,如果某传递函数 $H(\omega)$ 之前有一个降 2 采样环节,我们可以将这个降 2 采样环节移到该传递函数之后,但要将该传递函数 $H(\omega)$ 修改为 $H(2\omega)$, 变换前后的两个系统等价;同样如果某传递函数 $H(\omega)$ 之后有一个升 2 采样环节,我们可以将这个升 2 采样环节移到该传递函数之前,但也要将该传递函数 $H(\omega)$ 修改为 $H(2\omega)$ 。我们将图 1 中降采样环节和升采样环节的位置进行后移或前移并相应修改与之相邻的滤波器的系数,从而可将图 1 变换为图 2 (方向金字塔框架变换分解和重构示意图)。在图 2 中我们去掉了降采样与升采样环节,因为先降采样再接着升采样的效果只是增加信号分解和重构过程中的频率混叠效应。



Further level decomposition and reconstruction

图 2 方向金字塔框架变换分解和重构示意图 ($k=1, 2, \dots, K$)

Fig. 2 The decomposition and reconstruction processes of the steerable pyramid frame transform ($k=1, 2, \dots, K$)

在第一级方向金字塔框架变换分解中通过使用滤波器 $L_0(\omega)$ 和 $H_0(\omega)$, 一幅图像首先被分解成低通和高通两个子带,图像的低通子带被继续分解成一系列具有方向选择特性的带通子带和一个更低频子带。下一级方向金字塔框架变换分解就是采用 $\{B_k(\omega) | (k=1, 2, \dots, K)\}$ 和 $L_1(\omega)$ 分别对上一级更低频子带进行滤波。方向金字塔框架变换重构过程是分解过程的逆过程。为避免信号的幅度失真,滤波器系数有以下限制:

$$|H_0(\omega)|^2 + |L_0(\omega)|^2 = 1, \quad (1)$$

$$|L_1(\omega)|^2 + \sum_{k=1}^K |B_k(\omega)|^2 = 1. \quad (2)$$

对于具有方向选择特性的带通滤波器 $\{B_k(\omega) | (k = 1, 2, \dots, K)\}$ 有以下幅角限制^[10]:

$$B_k(\omega) = B(\omega)[-j \cdot \cos(\theta - \theta_k)]^{K-1}, \quad (3)$$

其中 $\theta = \arg(\omega)$, $\theta_k = \frac{(k-1)\pi}{K}$ 对于 $k = 1, 2, \dots, K$,

$$B(\omega) = \sqrt{\sum_{k=1}^K |B_k(\omega)|^2}.$$

对图像进行 N 层方向金字塔框架变换分解, 若每级分解中有 K 个方向子带, 分解后将得到 $N \cdot K + 2$ 个频率子带图像, 包括最低频子带图像 [最后一级图像分解中经 $L_1(\omega)$ 滤波后的子带] 以及 $N \cdot K + 1$ 个高频子带图像 [第一级分解中经 $H_0(\omega)$ 滤波后的子带和各级分解中经 $\{B_k(\omega) | (k = 1, 2, \dots, K)\}$ 滤波后的子带]. 由于方向金字塔框架变换分解和重构中不存在降采样和升采样环节, 图像的分解和重构过程中不具有频率混叠项, 因而滤波器的设计自由度更大, 图像分解后的各级子带与源图像具有相同的大小, 便于融合处理. 这种变换具有平移和旋转不变性. 图像的小的平移和旋转不会造成方向金字塔框架变换分解系数的极大变化. 在图像融合时, 源图像之间可能存在配准误差, 采用这种变换时图像融合质量受配准误差的影响比较小. 本文基于方向金字塔框架变换提出了一种遥感图像融合方法, 实验结果表明在源图像之间存在配准误差 (既有平移误差又有旋转误差) 的情况下本文算法在性能上明显优于基于亮度-色调-饱和度彩色空间变换以及基于离散小波框架变换的遥感图像融合方法.

3 遥感图像融合

假设在图像融合之前多光谱图像和全色图像已经过图像配准. 本文基于方向金字塔框架变换提出了一种遥感图像融合算法, 该算法可具体分为以下

六步:

1) 从多光谱图像所有波段 (表示为 B_1, B_2, B_3, B_4 等) 中选取待融合的波段并记为 I_{MS} .

2) 将原高分辨全色图像与 I_{MS} 进行直方图匹配^[11], 以得到一个新的与 I_{MS} 具有相同直方图分布的高分辨力图像 I_{PAN} .

3) 对 I_{MS} 和 I_{PAN} 分别进行方向金字塔框架变换分解: 假设分解层数为 N 且每一级方向子带的个数为 K , 用 $g_i^{MS} (i=1, 2, \dots, N \cdot K + 1)$ 和 f_N^{MS} 表示 I_{MS} 经方向金字塔框架变换分解后的高频子带图像和最低频子带图像, 用 $g_i^{PAN} (i=1, 2, \dots, K \cdot N + 1)$ 和 f_N^{PAN} 表示 I_{PAN} 经方向金字塔框架变换分解后的高频子带图像和最低频子带图像.

4) 对 I_{MS} 和 I_{PAN} 的方向金字塔框架变换分解的各子带系数进行组合: 在高分辨力全色图像中, 地面分辨力信息主要集中在图像的高频子带中. 文献 [7, 8] 中, 为提高多光谱图像的地面分辨力, 多光谱图像经多尺度分解后的高频子带由高分辨力全色图像经多尺度分解后的高频子带替换. 这种高频子带直接替代的做法在保留高分辨力全色图像的地面分辨力信息的同时, 丢失了大量的多光谱图像中的光谱信息, 因为多光谱图像经多尺度分解后的高频子带中仍保留有大量的光谱信息. 本文提出了按高频子带系数的重要性对多光谱图像的高频子带系数和高分辨力全色图像的高频子带系数进行选取. 定义各高频子带系数重要性为

$$E_i^I(x, y) = \sum_{(m, n) \in N(x, y)} w(m, n) \cdot g_i^I(m, n)^2,$$

$$I = MS, PAN, i = 1, 2, \dots, N \cdot K + 1, \quad (4)$$

$N(x, y)$ 定义了以当前系数 $g_i^I(x, y)$ 为中心的一个矩形窗口区域, 窗口尺寸一般较小, 如 3×3 , $w(m, n)$ 为权系数且满足 $\sum_{(m, n) \in N(x, y)} w(m, n) = 1$. 对高频子带系数的融合过程为基于系数重要性的选取过程:

$$g_i^C(x, y) = \begin{cases} g_i^{MS}(x, y), & \text{if } E_i^{MS}(x, y) \geq E_i^{PAN}(x, y) \\ g_i^{PAN}(x, y), & \text{if } E_i^{MS}(x, y) < E_i^{PAN}(x, y) \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, N \cdot K + 1. \quad (5)$$

对 I_{MS} 和 I_{PAN} 的低频子带系数的融合较简单, 取 I_{MS} 的低频子带系数以保留多光谱图像中的光谱信息:

$$f_N^C = f_N^{MS}. \quad (6)$$

5) 组合后的系数 f_N^C 和 $g_i^C (i=1, 2, \dots, N \cdot K + 1)$ 进行方向金字塔框架逆变换, 得到高分辨力全色图像与多光谱图像当前待融合波段的融合图像 I_C .

6) 如果多光谱图像还有未融合的波段, 则转到 1) 进行下一轮循环处理.

4 实验结果及结论

融合实验中对本文算法、基于亮度-色调-饱和度彩色空间变换的融合算法以及基于离散小波框架变

换的融合算法^[8]进行了比较。方向金字塔框架变换分解层数取为 2 层,每一级分解的方向子带个数取为 6。基于离散小波框架变换的遥感图像融合算法使用了 9-7 双正交小波滤波器,分解层数如文献[8]中所述的 3 层。实验 1 中使用的图像是 IKONOS 卫星拍摄的加拿大弗雷德里克顿市区 4 m 地面分辨率的多光

谱遥感图像(取三个波段用于融合并将其映射到 RGB 三基色通道)和 1 m 地面分辨率的高分辨率全色图像。多光谱图像要经过重采样至 1 m 地面分辨率以与 1 m 高分辨力全色图像配准,重采样后的多光谱图像见图 3(a),1 m 高分辨力全色图像见图 3(b)。各融合算法的融合结果见图 3(c)~图 3(e)。

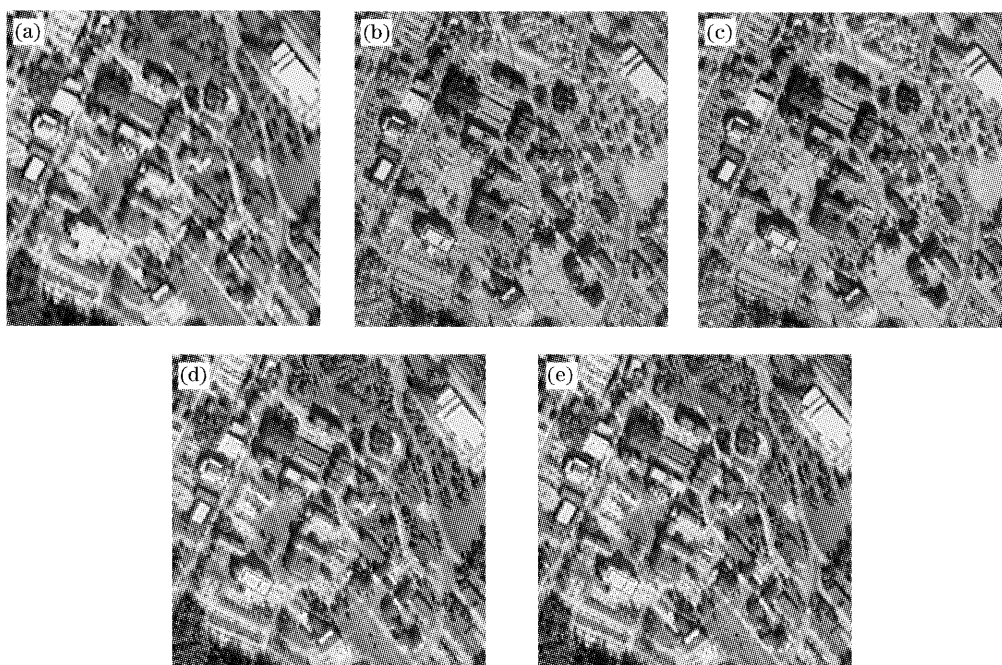


图 3 实验 1。(a)重采样后的多光谱图像,(b)1 m 地面分辨率的全色图像,(c)基于亮度-色调-饱和度彩色空间变换的融合算法结果,(d)基于离散小波框架变换的融合算法结果,(e)本文算法融合图像

Fig. 3 Experiment 1. (a) The resampled multispectral image, (b) the 1 m panchromatic image, (c) fused image based on IHS transform, (d) fused image based on DWFT, (e) fused image by the proposed algorithm

图像配准误差会对图像融合效果产生影响。实验 1 中采用的遥感图像来自同一个卫星平台,图像的配准比较简单,只需对多光谱图像进行重采样即可。如果对来自不同平台的多光谱图像和高分辨力全色图像进行融合,就必须进行图像配准。图像配准难免存在误差,一个好的融合算法受配准误差的影响不应

太大。为检验各算法受配准误差的影响程度,在实验 2 中,我们将图 3(b)的全色图像逆时针旋转了 1° ,然后整体向右平移了一个像素,从而得到图 4(a)存在配准误差的全色图像。各算法对图 3(a)的多光谱图像和图 4(a)的存在配准误差的全色图像的融合结果见图 4(b)~图 4(d),从图 4 中可以看出本文算法得到

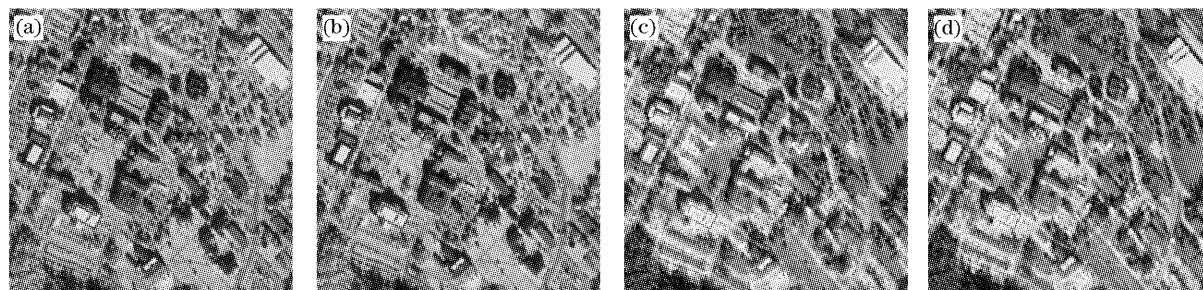


图 4 实验 2。(a)存在配准误差的 1 m 全色图像,(b)基于亮度-色调-饱和度彩色空间变换的融合算法结果,(c)基于离散小波框架变换的融合算法结果,(d)本文算法融合图像

Fig. 4 Experiment 2. (a) The poorly registered 1 m panchromatic image, (b) fused image based on IHS transform, (c) fused image based on DWFT, (d) fused image by the proposed algorithm

的图像清晰度最高,受配准误差的影响最小,这从下面的定量评价也可看出。

遥感图像融合的目的是综合多光谱图像的光谱信息和全色图像的高分辨力信息。评价一个遥感图像融合算法的好坏要从光谱信息保持和空间分辨力的提高两个方面进行考察。本文采用了常用的光谱偏差(Spectral Discrepancy)和平均梯度(Average Gradient)评价指标来衡量融合图像的光谱信息保持能力和地面分辨力清晰程度。为衡量融合图像 F 的光谱质量,定义光谱偏差如下:

$$D_k = \frac{1}{M \times N} \sum_i \sum_j |F_k(i, j) - L_k(i, j)|, \quad k = R, G, B \quad (7)$$

其中 $M \times N$ 为融合图像大小,本文中 $M = N = 512$, $F_k(i, j)$ 和 $L_k(i, j)$ 为融合图像和原始多光谱图像在 k 波段像素 (i, j) 的灰度值。光谱偏差越小反映融合图像和原多光谱图像在光谱信息上的差异越小,

光谱保持性能越好。为衡量融合图像 F 的地面分辨力的清晰程度,定义平均梯度为

$$ag_k = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \times \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{[\partial F_k(i, j)/\partial i]^2 + [\partial F_k(i, j)/\partial j]^2}{2}}, \quad k = R, G, B \quad (8)$$

平均梯度可敏感地反映融合图像对微小细节反差表达的能力,可用来评价融合图像的清晰程度。空间梯度越大,说明融合图像越清晰。各融合图像与原多光谱图像之间光谱偏差见表 1,各融合图像的平均梯度见表 2。从表中可以看出,本文算法的融合图像在提高空间分辨力清晰度的同时能较好地保持原多光谱图像的光谱信息。在原图像之间存在配准误差的情况下,本文算法相对其它融合算法在光谱保持性能方面下降幅度较小,说明其受图像配准误差的影响较小,算法鲁棒性较好。

表 1 融合图像与源多光谱图像之间光谱偏差

Table 1 Spectral discrepancies between the fused images and the source multispectral image

	Experiment 1			Experiment 2		
	R channel	G channel	B channel	R channel	G channel	B channel
Algorithm based on IHS transform	44.5757	44.6676	44.6728	47.5897	47.6832	47.6857
Algorithm based on DWFT	22.0723	21.2408	21.4173	24.9256	23.9664	23.5476
Algorithm based on SPFT	18.3987	17.6135	17.9205	19.4884	18.6726	18.8140

表 2 融合图像的平均梯度

Table 2 Average gradients of the fused images

	Experiment 1			Experiment 2		
	R channel	G channel	B channel	R channel	G channel	B channel
Algorithm based on IHS transform	17.7266	17.6612	17.1489	17.7684	17.7280	17.4697
Algorithm based on DWFT	19.0402	18.1827	17.5886	19.1242	18.2753	17.7041
Algorithm based on SPFT	19.9911	19.2639	18.9184	20.2569	19.5285	19.2026

参 考 文 献

- 1 Wu Yan, Yang Wanhai, Li Ming. Image fusion based on wavelet decomposition and evolutionary strategy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(6): 671~676 (in Chinese)
- 2 C. Pohl, J. L. van Cenderen. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications [J]. *International J. Remote Sensing*, 1998, **19**(5): 823~854
- 3 T. M. Tu, S. C. Su, H. C. Shyu *et al.*. A new look at IHS-like image fusion methods[J]. *Information Fusion*, 2001, **2**(3): 177~186
- 4 Li Bicheng, Wei Jun. Remote sensing image fusion based on IHS transform, wavelet transform, and HPF [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **4898**: 25~30
- 5 H. Li, B. S. Manjunath, S. K. Mitra. Multisensor image fusion using the wavelet transform[J]. *Graphical Models and Image Processing*, 1995, **57**(3): 235~245
- 6 J. Nunez, X. Otazu, O. Fors *et al.*. Simultaneous image fusion and reconstruction using wavelets: Applications to SPOT + LANDSAT images[J]. *Vistas in Astronomy*, 1997, **41**(3): 351~357
- 7 J. Zhou, D. L. Civco, J. A. Silander. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data[J]. *International J. Remote Sensing*, 1998, **19**(4): 743~757
- 8 S. Li, J. T. Kwok, Y. Wang. Using the discrete wavelet frame transform to merge Landsat TM and SPOT panchromatic images [J]. *Information Fusion*, 2002, **3**(1): 17~23
- 9 W. T. Freeman, E. H. Adelson. The design and use of steerable filters [J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(9): 891~906
- 10 E. P. Simoncelli, W. T. Freeman. The steerable pyramid: a flexible architecture for multi-scale derivative computation [C]. *2nd Annual IEEE Conference on Image Processing*, Washington, DC., 1995, **3**: 444~447
- 11 J. Morovic, J. Shaw, P. L. Sun. A fast, non-iterative and exact histogram matching algorithm [J]. *Pattern Recognition Lett.*, 2002, **23**(1~3): 127~135