

一种基于提升小波变换和 IHS 变换的 图像融合方法

薛 坚 于盛林 王红萍

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘 要 为了将低分辨率多光谱图像和高分辨率全色图像进行有效融合, 提出了一种提升小波变换和 IHS 变换相结合的图像融合新方法。该方法首先对高分辨率图像进行无下采样提升小波分解, 利用提升分解得到的各提升小波面叠加的边缘信息进行区域划分, 再采用分区域加边缘有效因子的融合思想实现分区融合, 使得融合的图像最大限度地保留了多光谱图像的光谱信息和高分辨率图像的空间分辨率, 其中区域的划分采用进化算法实现。该方法的融合结果与 IHS 法、小波变换法及其他改进方法进行比较, 实验结果表明, 该方法能较好地保留多光谱图像的光谱信息和提高分辨率图像的空间分辨率。

关键词 提升小波变换 IHS 变换 图像融合 进化算法 边缘有效因子

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)02-0340-06

An Image Fusion Algorithm Based on Lifting Wavelet Transform and IHS Transform

XUE Jian, YU Sheng-lin, WANG Hong-ping

(College of Automation Engineering Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract In order to fuse a high-resolution panchromatic image and a low-resolution image effectively, a novel image fusion algorithm using lifting wavelet transform and the IHS transform is proposed in this paper. The high-resolution panchromatic image is firstly decomposed by lifting wavelet decomposition without down-sampling to the lifting wavelet planes. Then the region is divided by edge information from the lifting wavelet planes and the proposed merging algorithm is done by adding edge influence factor in different regions. At the same time, the region is divided based on the evolutionary algorithm. The method proposed is compared with the IHS, the wavelet transform and other improved methods. The results of the comparison demonstrate that the proposed algorithm can fuse images with high quality more effectively for the test images.

Keywords lifting wavelet transform, IHS transform, image fusion, evolutionary algorithm, edge influence factor

1 引 言

众所周知, 图像融合是数据融合的一个重要分支, 它在遥感图像处理、目标识别、医学、机器人视觉等方面具有广阔的应用前景。将低分辨多光谱图像

和高分辨率全色图像有效地进行融合, 使得融合图像同时具有高空间分辨率和多光谱信息, 是目前图像融合技术中的研究热点。目前, 将低分辨多光谱图像与高分辨率全色图像进行融合这一技术具有代表性的方法有 IHS 变换法^[1-2] 和小波变换法^[3-6]。IHS 变换法利用高分辨率的灰度图像替换变换中的

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK200147); 航空科学基金项目(04D52032)

收稿日期: 2007-04-23; 改回日期: 2007-08-31

第一作者简介: 薛 坚(1982 ~), 男, 南京航空航天大学测试计量技术专业硕士研究生。主要研究方向为数字信号处理、图像融合。

E-mail: njbisheng@163.com

强度分量 I, 可以保留图像丰富的高频信息, 然而由于不同频道数据的不同光谱特性, IHS 变换法扭曲了原始的光谱特性, 产生了光谱退化现象。小波变换法虽然能获得一定品质的融合图像, 但其分解和重构实际是一个高通和低通滤波的过程, 并且在分解和重构时会受到外来因素的影响, 因而在一定程度上丢失了原始图像中的一些边缘信息, 融合图像中会出现振铃效应。文献[6]针对小波变换的缺点提出了改进的方法, 但此方法只对低频系数进行处理, 因而融合图像的细节同样有模糊现象。

本文在以上研究的基础上, 将提升小波变换、IHS 变换与进化策略相结合, 提出了一种低分辨率和多光谱图像融合的新方法。该方法利用提升小波变换代替传统的多尺度变换, 从而提高了执行速度, 节省了内存。该算法首先对高分辨率和多光谱图像进行无下采样提升小波分解。然后将高分辨率图像所特有的低频特征添加到多光谱图像中, 再利用提升小波面归一化统计直方图将高分辨率图像分为平滑区和边缘区。对于平滑区, 保持多光谱图像的光谱信息; 对于边缘区, 利用边缘有效因子将高分辨率图像的边缘细节融合到多光谱图像中, 其中区域的划分采用进化策略实现。最后给出了实验结果, 并与 IHS 变换法、小波变换法以及文献[6]的方法相比, 实验结果表明, 本文的方法能够较好地保留多光谱图像的光谱信息和提高高分辨率图像的空间分辨率。

2 图像的提升小波变换

提升算法是 Sweldens 等学者于 1994 年提出的一种基于空间域的小波构造方法, 基于提升算法的小波变换称为提升小波变换。与传统小波变换相比, 提升算法是一种更为快速有效的小波变换实现方法, 它不依赖于傅里叶变换, 完全在空域中完成对双正交小波滤波器的构造。它具有计算速度更快, 计算方法更简单, 可以实现整数小波变换, 计算过程不产生任何浮点误差, 精确重构原始信号等优点^[7]。

假设原始图像为 f , 则 f 经提升小波分解后可分解到分辨率为 2^{-J} 下的一个近似分量和 $3J$ 个高频分量, J 为分解层数。则 f 分解后表示为

$$\{f_{2^j}, f_{2^j}^h, f_{2^j}^v, f_{2^j}^d\} \quad 1 \leq j \leq J \quad (1)$$

式(1)中, f_{2^j} 为图像的低频分量, $f_{2^j}^h$ 是图像在水平方向的高频分量, $f_{2^j}^v$ 是图像在垂直方向上的高频分量, $f_{2^j}^d$ 是图像在对角方向上的高频分量。

3 图像融合算法原理

3.1 融合规则

由于一幅彩色图像既可用红、绿、蓝的 RGB 系统表示, 同样也可以用强度、色度和饱和度的 IHS 系统表示。IHS 模型的优点是能把强度和颜色分开, 因此, IHS 变换能有效地将 RGB 模型中图像强度与其光谱信息 H、S 相分离, 图像处理更适合在 IHS 空间进行^[8]。本文融合算法的具体实现步骤如下:

(1) 将多光谱图像从 RGB 空间变换到 IHS 柱形空间。

(2) 对多光谱图像的 I 分量和高分辨率图像进行 3 层无下采样提升小波分解, 保留多光谱图像的 H、S 分量。实验结果表明, 图像经 3 层提升小波分解后生成的一组多方向、不同分辨率的子图已反映出图像的绝大部分边缘信息, 若分解层数继续增加, 对融合结果也不会产生较大影响。为了解决提升小波变换具有移变性的缺点, 在进行提升小波分解时没有进行下采样, 这样产生的提升小波系数虽然是冗余的, 但这对于图像融合是有帮助的^[9]。

设 \hat{f} 为高分辨率图像, \tilde{f} 为低分辨率多光谱强度分量构成的图像。分别对 \hat{f} 和 \tilde{f} 进行 3 层无下采样提升小波分解, 结果如下:

$$\hat{f} = \{\hat{f}_{2^j}, \hat{f}_{2^j}^h, \hat{f}_{2^j}^v, \hat{f}_{2^j}^d\} \quad (2)$$

$$\tilde{f} = \{\tilde{f}_{2^j}, \tilde{f}_{2^j}^h, \tilde{f}_{2^j}^v, \tilde{f}_{2^j}^d\} \quad (3)$$

上式中 $1 \leq j \leq 3$, h, v, d 分别代表提升小波分解中的水平、垂直、对角 3 个高频分量。

(3) 分别对 \hat{f} 和 \tilde{f} 的低频和高频部分进行处理。

① 低频部分处理的目的是尽可能地保留低分辨率多光谱图像的特征, 在保留多光谱和高分辨率图像低频共同特征信息的基础上, 将高分辨率图像的一些特征低频信息融合到低分辨率多光谱图像中, 局部区域大小取为 3×3 , 算法实现如下:

\hat{f} 和 \tilde{f} 低频部分共有信息为

$$\hat{f}_{2^3} = \begin{cases} \hat{f}_{2^3} & \hat{f}_{2^3} \leq \tilde{f}_{2^3} \\ \tilde{f}_{2^3} & \hat{f}_{2^3} > \tilde{f}_{2^3} \end{cases} \quad (4)$$

高分辨率图像低频所特有的信息为

$$\tilde{f}_{2^3} = \hat{f}_{2^3} - \hat{f}_{2^3} \quad (5)$$

融合图像强度分量的低频部分 \tilde{f}_{2^3} 求解如式 (6), 其中, std 表示基于小波块的标准偏差。

$$\tilde{f}_{2^3} = \tilde{f}_{2^3} + \frac{\text{std}(\hat{f}_{2^3})}{\text{std}(\hat{f}_{2^3}) + \text{std}(\tilde{f}_{2^3})} \times \tilde{f}_{2^3} \quad (6)$$

② 高频部分处理主要目的是尽可能地增强融合图像的细节信息。

将高分辨率图像提升分解得到的每一层的高频小波系数定义为提升小波面 $lwp_j (j = 1, 2, 3)$, 计算公式如下:

$$lwp_j = \{\hat{f}_{2j}^h + \hat{f}_{2j}^v + \hat{f}_{2j}^d\} \quad (7)$$

叠加各层提升小波面的系数 lwp_j :

$$lwp = lwp_1 + lwp_2 + lwp_3 \quad (8)$$

再将 lwp 进行归一化计算, 设 $lwp \in [a, b]$, 则归一化系数 k 计算方法如 (9) 式。

$$k = \frac{lwp - a}{b - a} \quad (9)$$

图 1 为 3 层提升小波面系数 lwp 叠加的归一化统计直方图。其横坐标为归一化后提升小波面系数 k , 纵坐标为提升小波面系数的像素个数 n 。

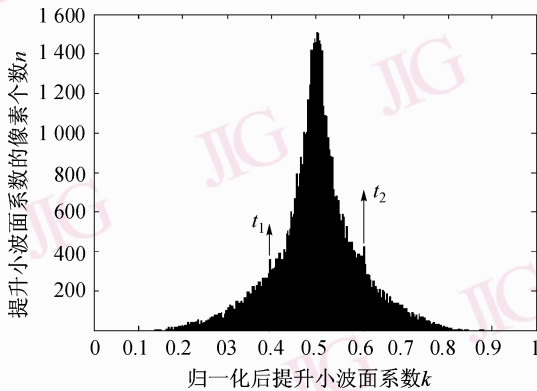


图 1 提升小波面系数归一化统计直方图

Fig. 1 The normalized histogram of lifting wavelet planes

从图 1 可以看出, 提升小波面系数归一化统计直方图中呈现一个明显的脉冲状。对于不同的图像

其归一化统计直方图也有所不同, 由式 (9) 可知, 在峰值附近区间 $[t_1, t_2]$, 对应于提升小波面系数的绝对值较小区域, 边缘信息较弱, 则此区间为图像中的目标平滑区。同样在峰值两边的区间 $[0, t_1]$ 和 $(t_2, 1]$ 中, 对应于提升小波面系数绝对值较大区域, 有着较强的边缘信息, 则此区间为图像中的目标边缘区。并且边缘区在整个图中所占的比例比较小, 平滑区所占的比例较大, 较大的提升小波面系数大多数分布在像素个数数值较小的地方。因此, 采用分区融合可以使融合图像在保留多光谱图像的大部分信息的同时又将高分辨率图像的大多数较强边缘信息保留下来。设融合图像强度分量的高频部分为 f_{2j}^x , x 分别代表 h、v、d 3 个方向分量, 则

$$\tilde{f}_{2j}^x = \begin{cases} \tilde{f}_{2j}^x & k \in [t_1, t_2] \\ \hat{f}_{2j}^x & k \in [0, t_1] \text{ 或 } [t_2, 1] \end{cases} \quad (10)$$

由式 (10) 可知, 融合后的 \tilde{f}_{2j}^x 在目标的平滑区保留了原多光谱图像的光谱信息 \tilde{f}_{2j}^x , 而在目标的边缘区则保持了高分辨图像的高频信息 \hat{f}_{2j}^x , 然而由于在融合中不同频道数据具有不同的光谱特性, 使得 \tilde{f}_{2j}^x 的取值出现了不连续性, 融合后图像虽然高频信息比较丰富, 但其边缘部分的光谱强度与平滑区的光谱强度发生了明显的差异。因此, 需要重新定义一个融合因子来替代 \tilde{f}_{2j}^x , 而这个融合因子既要反映出高分辨率图像高频信息的融入, 又要体现出多光谱图像光谱强度的连续变化, 保持原多光谱图像的信息^[10]。

设 φ 为边缘有效因子, φ 的定义如下: 令 $\hat{f}(i, j)$ 和 $\tilde{f}(i, j)$ 分别为高分辨率图像和低分辨率多光谱图像在坐标 (i, j) 处的灰度值。则 φ 在坐标 (i, j) 处的定义如下:

$$\varphi = \begin{cases} \hat{f}(i, j) / \tilde{f}(i, j) & \tilde{f}(i, j) \neq 0 \\ 0 & \tilde{f}(i, j) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

重新定义融合图像强度分量的各个高频部分为

$$\tilde{f}_{2j}^x = \begin{cases} \tilde{f}_{2j}^x & w \in [t_1, t_2] \\ \varphi \cdot \tilde{f}_{2j}^x & w \in [0, t_1] \text{ 或 } [t_2, 1] \end{cases} \quad (12)$$

可见, 融合后的高频分量在目标的平滑区保留了原来多光谱图像的光谱信息, 在目标边缘区对多光谱图像的强度乘上边缘有效因子 φ 就是将高分

分辨率图像的边缘细节信息融合到了多光谱图像中。由于多光谱图像是低分辨率的,在目标边缘上,其成像强度小于高分辨率图像, φ 就反映了它们的成像强度之比。这样融合后的效果则同时保留了多光谱图像的光谱信息和高分辨率图像的空间分辨率,保持光谱信息的连续性。

(4) 对由式(13)得到的融合图像的小波系数 \bar{f} 进行提升小波逆变换,得到融合图像强度分量 I' 。

$$\bar{f} = [\bar{f}_{2^3}^3, \bar{f}_{2^2}^h, \bar{f}_{2^2}^v, \bar{f}_{2^2}^d] \quad (13)$$

(5) 将 I' 、 H 、 S 分量变换到 RGB 空间,则得到高分辨率多光谱图像。

3.2 双阈值的确定

3.2.1 适应度函数

在高频系数处理中,利用了归一化提升小波面系数的 $[0,1]$ 区间上设置的双阈值 t_1 和 t_2 ,下面讨论如何确定双阈值 t_1 和 t_2 使融合图像的效果最佳,本文采用进化算法来实现,进化算法采用实数编码^[11]。

由于进化算法的搜索过程依赖于适应度函数。对于多光谱和高分辨率图像的融合问题,适应度函数应体现出融合图像最大限度地同时保留光谱信息和高频信息的特点,即融合后的图像与原始图像的差异应尽可能的小。本文采用了交叉熵进行评价,交叉熵反映了两幅图像之间的差异。交叉熵越小,表示图像间的差异就越小。若标准参考图像为 S ,融合后的图像为 F ,则参考图像 S 和融合图像 F 的交叉熵 C 计算公式如下:

$$C_{S,F} = \sum_{i=0}^{L-1} P_{S_i} \log_2 \frac{P_{S_i}}{P_{F_i}} \quad (14)$$

式中, L 表示图像的总灰度级数, P_i 表示灰度为 i 的像素数与图像总像素数之比。

由于本文中每对双阈值的选取对应一幅融合图像,因此,将融合图像的适应度函数作为每对双阈值的适应度函数。定义融合图像 F 的适应值函数 $f(F)$ 如式(15)。其中, $E[X]$ 表示 X 的均值, ε 为允许的均值误差范围。

$$\left. \begin{aligned} f(F) &= \sqrt{\frac{C_{f_F, \hat{f}}^2 + C_{f_F, \tilde{f}}^2}{2}} \\ \text{使得 } |E[f_F] - E[\tilde{f}]| &\leq \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由上式可知,适应度函数综合考虑了交叉熵 $C_{f_F, \hat{f}}$ 和 $C_{f_F, \tilde{f}}$,即适应度函数取决于融合图像与两幅图像间的综合差异,也即适应值函数 $f(F)$ 表示总体交叉熵。同时又考虑了融合图像的均值与多光谱图像的均值在允许的范围内接近相等,从而保持多光谱图像原有的物理特性。

3.2.2 进化算法

进化算法的实现步骤^[12]如下:

(1) 进化算法的操作对象为问题的可行解组成的一个群体。定义群体中的个体 $T = (t_1, t_2)$ 为实数向量,每个个体的优劣可以用适应度函数来衡量,问题求解的目标是可以找到一个最优个体 $T' = (t'_1, t'_2)$,使该最优个体对应的融合图像 f'_F 的适应度函数 $f(F)$ 的值最小。

(2) 初始化群体 产生初始父代群体 $\{T_i, i=1, 2, \dots, n\}$,共 n 条个体,而每个个体 $T_i = (t_{1i}, t_{2i})$ 的取值在 $[0,1]$ 范围内随机分布。

(3) 适应度函数计算 由式(15)计算每个父代个体的适应度值,由于每对双阈值选取对应一幅融合图像,于是可记 $f(F) = f(T_i) = f((t_{1i}, t_{2i}))$, $i=1, 2, \dots, n$ 。

(4) 变异 由父代群体中的每个个体产生子代个体,子代个体为 $T_i^j = T_i + N(0, \delta_j^2)$, $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, \lambda$,其中 $N(0, \delta_j^2)$ 表示均值为0,方差为 δ_j^2 的高斯噪声, λ 为父代中每个个体变异产生子代个体的个数。

(5) 适应度函数再计算 计算所有 $n\lambda$ 个子代个体的适应度。

(6) 选择 采取确定选择方式,从以上共 $(n + n\lambda)$ 条个体中选出适应值最高的 n 条个体,组成新的父代群体。

(7) 重复步骤(4)~步骤(6),直到满足终止条件(最大进化代数)。将最后一代群体中的最优个体 T' 对应的阈值向量 (t'_1, t'_2) 作为求解结果。

本文实验得到的最优个体 T' 的阈值向量 (t'_1, t'_2) 为 $(0.4136, 0.6981)$,执行到终止条件所需时间为216秒,取 $\varepsilon = 0.001E[F]$ 。

4 实验结果与分析

为了验证本方法的正确性和有效性,本文利用一幅彩色Mandrill图进行融合仿真实验,如图2所示。

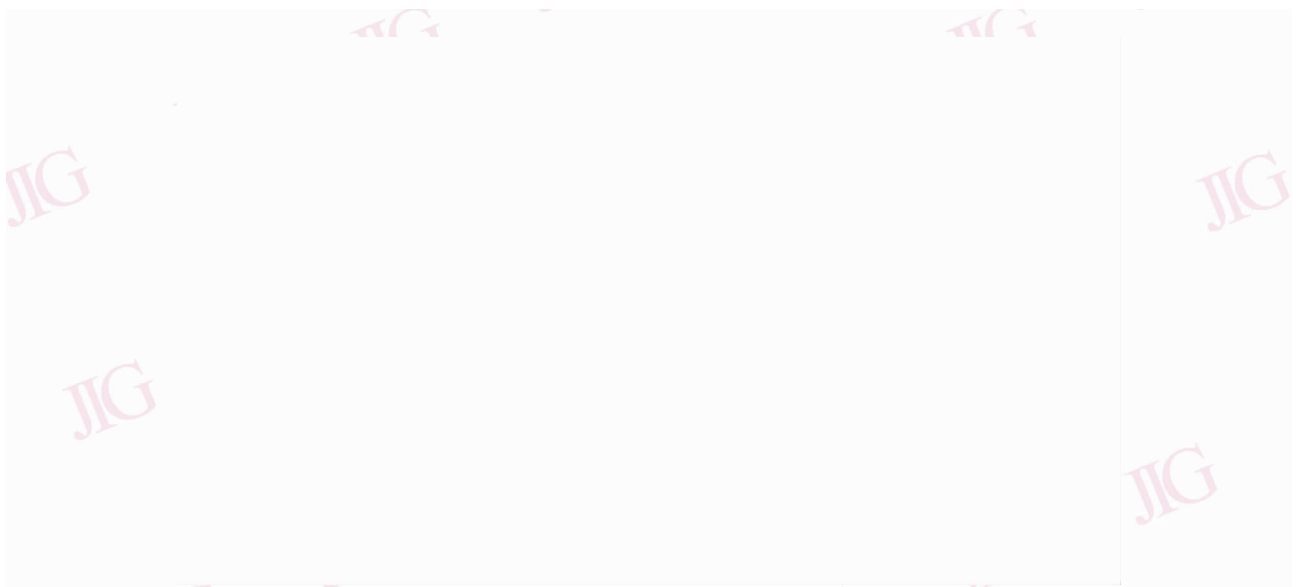


图 2 图像融合实验结果

Fig. 2 Experimental results of the image fusion

从图 2 中可以看出,图 2(d) IHS 法融合图像虽然保留了高分辨率图像丰富的高频信息,然而融合图像在鼻子处产生了较明显的光谱退化现象。图 2(e) 小波变换法较好地保留了多光谱图像的光谱信息,但融合图像在眼睛和两鳃处产生了方块效应。图 2(f) 为文献[6]的融合结果,虽然该方法改善了眼睛处的模糊现象,但是融合图像的色调与原图有很大的差异。图 2(g) 为本文的方法所得融合图像,可见融合图像的低空间分辨率得到了很大的改善,细节比较清楚,同时融合图像的色调与多光谱图像的色调非常接近。比较图 2(d) ~ 图 2(g) 可以看出,本文的方法优于 IHS 法、小波变换法以及文献[6]的方法,本文的方法较好地保留了多光谱图像的光谱特性,保留了高分辨率图像更多的信息。

为了进一步验证本文方法的有效性,采用相关性参数和总体交叉熵两个参数作为客观评价指标。表 1 给出了 IHS 法、小波变换法、文献[6]方法和本文方法所得融合图像 F 与多光谱图像 \tilde{f} 的相关系数 r_1 、融合图像 F 与高分辨率 \hat{f} 图像高频成分之间的相关系数 r_2 以及总体交叉熵 $f(F)$ 的性能比较。相关系数反映了图像之间的相关程度,相关程度越高,说明了融合后的图像从原始图像中提取的信息越多,融合图像较好地保留了原图像的光谱信息,融合质量也越好。总体交叉熵越小说明了融合图像与

原始图像的差异越小,融合效果越好。相关系数的计算公式如下

$$r(A, B) = \frac{E\{[A - E(A)][B - E(B)]\}}{\sqrt{D(A)}\sqrt{D(B)}} \quad (16)$$

式中, $E(X)$, $D(X)$ 分别为 X 的均值和方差, A 和 B 表示两幅图像的灰度值。

表 1 各种方法的融合结果比较

Tab. 1 Comparison of the fusion results of different methods

	r_1	r_2	总体交叉熵
IHS 法	0.774 9	0.957 3	0.072 2
小波变换法	0.890 4	0.961 6	0.065 9
文献[6]方法	0.901 5	0.970 5	0.051 3
本文方法	0.914 1	0.983 9	0.039 8

从表 1 可以看出,本文的方法得到的融合图像与多光谱图像及高分辨率图像的相关程度最大,表明融合图像保留了原图像更多的光谱信息,同时本文方法的总体交叉熵也最小,说明了融合后的图像与原始图像的差异也最小。

5 结 论

本文提出了一种提升小波变换和 IHS 变换相结

合的图像融合新方法,该方法能够有效地将高分辨率图像的特征和细节信息最优地融合到多光谱图像中,并较好地保留多光谱图像的光谱信息。实验结果表明,该方法在保留原多光谱图像光谱信息的同时,能最大限度地提高空间分辨率图像的空间分辨率,且与原图像之间的差异也最小。与 IHS 法、小波变换法及其他改进方法相比,本文方法融合的图像自然,边缘清晰,融合效果较好。

参考文献 (References)

- 1 Carper W J, Lillesand T M, Kiefer R W. The use of the intensity hue saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multi-spectral image data [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, **56**(5):459-467.
- 2 Shettigara V K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multi-spectral images using a higher resolution data set [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1992, **58**(5):561-567.
- 3 David A Y. Image merging and data fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet transform [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, **12**(9): 1834-1841.
- 4 Nunez J, Otazu X, Fors O. Multi-resolution based image fusion with additive wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, **37**(3):1204-1211.
- 5 Gonzalez A M, Saleta J I, Catalan R G. Fusion of multi-spectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, **42**(6):1291-1299.
- 6 Wu Yan, Yang Wan-hai, Li Ming. A new image fusion method based on wavelet transform [J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, **25**(1):93-97. [吴艳,杨万海,李明.一种新的基于小波变换的图像融合方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2003, **25**(1):93-97.]
- 7 Li Ling-ling, Ding Ming-yue, Zhou Cheng-ping. Fast image fusion method based on lifting wavelet transform [J]. Mini-Micro Systems, 2005, **26**(4):667-670. [李玲玲,丁明跃,周成平.一种基于提升小波变换的快速图像融合方法 [J]. 小型微型计算机系统, 2005, **26**(4):667-670.]
- 8 Sunar F, Musaoglu N. Merging multi-resolution SPOT Pan and Landsat TM data: the effects and advantages [J]. Remote Sensing, 1998, **19**(2):219-224.
- 9 Li Hui-hui, Guo Lei, Liu Hang. A region-based remote sensing image fusion method [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, **34**(12): 1901-1905. [李晖晖,郭雷,刘航.基于区域分割的遥感图像融合方法 [J]. 光子学报, 2005, **34**(12): 1901-1905.]
- 10 Wu Yan, Yang Wan-hai, Li Ming. Fusion algorithm of multispectral and high-resolution panchromatic images [J]. Acta Photonica Sinica, 2003, **32**(2):174-178. [吴艳,杨万海,李明.多光谱与高分辨率图像融合算法研究 [J]. 光子学报, 2003, **32**(2):174-178.]
- 11 Wen Xiu-lan, Song Ai-guo. Cylindricity error evaluation based on an improved genetic algorithm [J]. Acta Metrologica Sinica, 2004, **25**(2):115-118.
- 12 Zheng Hong, Pan Li. The automatic selection of image threshold on the basic of genetic algorithms [J]. Journal of Image and Graphics, 1999, **4**(4):236-241. [郑宏,潘励.基于遗传算法的图像阈值的自动选取 [J]. 中国图象图形学报, 1999, **4**(4): 236-241.]