

一种基于小波系数局部特征的选择性 遥感图像融合方法

朱康, 贺新光, 杨波

(湖南师范大学 资源与环境科学学院, 长沙 410081)

摘要:提出了一种基于小波变换系数局部特征的自适应选择性遥感图像融合方法,方法的基本思想是根据多光谱和全色图像融合过程中小波分解后的低频和高频部分融合目的的不同,对分解得到的近似和各层各方向的细节分量分别运用 3×3 的移动模板逐一计算相应区域小波系数阵的不同局部特征量,然后选择适当的阈值,对图像的近似和细节分量分别应用不同的策略在小波域内进行选择性融合,最后通过小波和 IHS 逆变换得到融合的高分辨率多光谱图像。对比实验结果表明:本文的方法在较好地保留空间细节信息的同时,图像的光谱信息也得到了最大限度地保持。

关键词:多光谱图像;全色图像;小波变换;局部特征;图像融合

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.05.002

中图分类号: P237.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-3177(2011)117-0009-06

A Selective Remote Sensing Image Fusion Method Based on the Local Feature of Wavelet Coefficients

ZHU Kang, HE Xin-guang, YANG Bo

(College of Resource and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha 410081)

Abstract: In this paper, an adaptively selective remote sensing images fusion method was proposed based on the local feature of wavelet coefficients to address this problem. The basic idea of the method as follows. First, a 3×3 mobile template was used to calculate the different local features of corresponding wavelet coefficient matrix one by one for the approximate components and detail components of each direction, each layer resulting from wavelet transform according to the different fusion purposes of low and high frequency part in the process of multi-spectral and panchromatic images fusion. Then the approximate images and detail images were infused selectively in wavelet domain by applying different fusion rules based on proper threshold. Finally, the resultant image with high resolution and multi-spectral characteristics was obtained by inverse wavelet transform and inverse IHS transform. The comparative experiments show that the proposed method can preserve spectral information of image to greatest extent as well as better retain the high spatial resolution details.

Key words: multi-spectral image; panchromatic image; wavelet transform; local feature; image fusion

收稿日期: 2010-06-21 修订日期: 2011-04-20

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金 (Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education under Grant No. 20094306120007)、湖南师范大学青年优秀人才培养计划 (Program for Excellent Talents in Hunan Normal University under Grant No. ET40906)。

作者简介: 朱康 (1989~), 男, 汉族, 河南人, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感图像处理和分析。

通讯作者: 贺新光, 博士, 副教授

E-mail: xinguanghe@163.com

1 引言

随着遥感技术的发展,越来越多的由不同类型传感器获得的多传感器、多空间分辨率、多光谱分辨率的遥感图像数据被用于科学研究。为了更充分地利用和开发这些数据资源,需要利用图像融合技术,将它们各自的优势结合起来,从而克服单一数据在实际应用中的局限性。高分辨率全色图像与低分辨率多光谱图像的传统融合方法主要有:IHS变换法、PCA(主成分分析)法、HPF(高通滤波)法等^[1],但这些方法无法同时顾及融合后的图像光谱信息和纹理细节信息^[2~3],如传统的IHS变换法形成的融合图像高频信息丰富,但光谱信息严重损失^[4]。近年来,小波分析方法在信号、图像处理领域非常活跃,由于小波变换在空间域和频域上同时具有良好的定位能力与局部细化性质,可对影像的高频成分采用逐步精细的空间域取样,因此,基于小波变换的图像融合,可最大限度地保留遥感影像的光谱信息和空间信息^[5~6]。

然而,一般的基于小波变换的融合方法,直接将高分辨率全色影像的细节分量替换了多光谱影像的细节分量,舍弃了高分辨率的低频分量和多光谱影像的高频分量,扭曲了原始光谱特性,产生了光谱退化现象^[5]。而且,由于方法直接舍弃了高分辨率全色影像的低频分量,因此也很容易出现分块效应^[7]。为了更好地兼顾高分辨率全色图像细节信息的保留和低分辨率多光谱图像光谱信息的保持,很多学者对融合规则进行了深入研究^[5~10]。其中,宋杨和万幼川提出了一种自适应的基于局部小波系数特征的遥感图像融合方法^[7],该方法将图像区域特征的思想应用于图像融合的规则中,有效地减少了融合图像的光谱失真,提高了融合图像与源图像的相关性;蔡娜提出了一种基于图像区域结构相似度的小波系数融合方法^[8],该方法将图像区域结构相似度的思想应用于图像融合的规则中,避免了只考虑一个特征量作为融合结果判决依据的缺点。方法突出了融合图像中地物的边缘特征,提高了图像的清晰度。本文将这两种方法的思想有机地结合起来,提出一种基于IHS变换和小波系数局部特征的选择性融合算法。该算法充分利用了小波变换后图像低频和高频分量的不同特征,对光谱信息集中的低频系数进行融合时,尽量加入空间细节特征;而对空间细节信息集中的高频系数进行融合时,利用综合特征量作为选择依据,尽可能多地保持原图像的光谱信息,

以有效减少融合图像光谱特性的扭曲。通过对融合效果的对比评价,表明本文的方法在较好地保留高分辨率全色图像细节信息的同时,很好地保持了低分辨率多光谱图像的光谱信息。

2 图像的小波分解与重构

小波变换是一种信号的时频分析方法,具有多分辨率分析的特点。图像的小波多分辨率分析通常采用离散小波变换,它为图像分析提供了强有力的工具,离散小波变换是通过一组低通分解滤波器和高通分解滤波器来对图像进行离散小波分解。小波变换应用于图像融合时,首先通过对源图像作一系列的多尺度分解,然后,对不同分解层、不同频带分别采用不同的融合规则进行融合。融合时可以保留住不同分解层、不同频带下图像的不同特征与细节信息。小波变换能够完成对单一波段或多个波段的融合运算,并正好符合人类的视觉特性,因此,可以获取较好的融合效果^[8]。

如果对一幅图像进行 L 层小波分解,将得到 $(3L+1)$ 层子带,其中包括低频的基带 A_L 和 $3L$ 层的高频子带 D_j^h, D_j^v 和 $D_j^d(j=1,2,\dots,L)$, j 表示分解层数; h, v, d 分别表示水平、垂直、对角方向分量。用 $f(x, y)$ 代表原始图像,记为 A_0 ,设尺度函数 $\Phi(x)$ 和小波函数 $\psi(x)$ 对应的滤波器系数矩阵分别为 H (低通)和 G (高通),则二维离散小波变换(DWT)的分解算法可描述为^[11]:

$$\begin{cases} A_j = H_{j-1} A_{j-1} H_{j-1}^T \\ D_j^h = G_{j-1} A_{j-1} H_{j-1}^T \\ D_j^v = H_{j-1} A_{j-1} G_{j-1}^T \\ D_j^d = G_{j-1} A_{j-1} G_{j-1}^T \end{cases}, j=1,2,\dots,L \quad (1)$$

式中, H_{j-1}^T 和 G_{j-1}^T 分别是 H_{j-1} 和 G_{j-1} 的共轭转置矩阵。对于一幅数字影像 A_{j-1} ,按(1)式分解后可形成4幅子图像 A_j, D_j^h, D_j^v 和 D_j^d ,其中, A_j 分量反映了原图像的平滑特征,称为低频图像;其他3个分量反映了原图像的亮度突变特征,分别称为水平、垂直和对角方向的高频图像,对应的上标分别为 h, v, d 。低频图像反映原图的近似和平均特性,集中了原图像的大部分信息;高频子图像的像素值在零值上下波动,绝对值较大的像素反映原图像的亮度突变特征,对应于原图像的边缘、区域边界等^[7]。由这4幅子图像可以合成原始影像 A_{j-1} ,小波重构算法为^[11]:

$$\begin{aligned} A_{j-1} = & H_{j-1}^T A_j H_{j-1} + G_{j-1}^T D_j^h H_{j-1} \\ & + H_{j-1}^T D_j^v G_{j-1} + G_{j-1}^T D_j^d G_{j-1} \end{aligned} \quad (2)$$

3 小波变换图像融合算法和融合规则

3.1 一般的小波变换图像融合方法步骤

基于二维 DWT 的图像融合的具体步骤如图 1 所示^[12], X 和 Y 分别代表两幅原始图像, F 代表融合后的图像。

(1) 图像的预处理

图像滤波: 对失真变质的图像直接进行融合, 必然导致图像噪声融入融合效果, 所以在进行融合前, 必须对原始图像进行预处理以消除噪声。

图像配准: 多种成像模式或多焦距提供的信息常常具有互补性, 为了综合使用多种成像模式和多焦距以提供更全面的信息, 常常需要将有效信息进行整合, 使多幅图像在空间域中达到几何位置的完全对应。

(2) 对图 1 X 和 Y 原始图像分别进行二维 DWT 分解, 得到图像的低频分量和高频分量。低频分量集中了源图像的主要能量, 代表源图像的近似图像; 高频分量包括垂直、水平和对角方向的各高频分量, 代表源图像的细节部分。

(3) 根据低频分量和高频分量的特点, 按照各自的融合算法进行融合。

(4) 对以上得到的高、低频分量, 经过小波逆变换重构得到融合图像 F 。

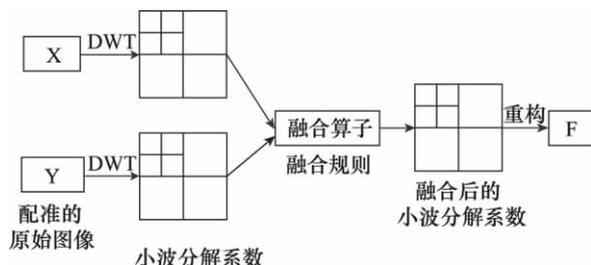


图 1 基于二维 DWT 的图像融合过程

3.2 基于 IHS 变换和小波变换系数局部特征的选择性融合方法

传统的基于 IHS 和小波变换的图像融合方法是多光谱图像进行 IHS 变换后得到的 I 分量和全色图像进行小波变换, 用全色图像的高频分量直接代替 I 分量的高频分量, 然后经过小波重构和 IHS 逆变换得到融合后的图像。由于 IHS 变换得到的 I 分量和全色图像在光谱信息上存在明显的差异, 造成了较大的光谱失真^[7], 所以应用传统的基于 IHS 和小波变换的融合方法进行图像融合时, 虽然融合图像具有较高的空间分辨率但其光谱特性却出现明显的扭曲。为了在保留较多空间信息的基础上, 尽可能多地减少光谱扭曲, 本文将 IHS 变换与小波变换结

合起来, 提出一种新的基于小波系数局部特征的自适应选择性多光谱图像和全色图像的融合方法。

本文提出的方法针对低频部分和高频部分融合目的的不同, 分别对低频系数和高频系数采用不同的自适应融合算法, 其中低频部分的融合规则是有选择的权重相加规则, 高频部分的融合规则是基于区域结构相似度的有选择的自适应融合规则。具体实现步骤如下:

(1) 对全色图像和多光谱图像进行图像预处理, 包括图像滤波、重采样、图像配准。

(2) 将低空间分辨率的多光谱图像从 RGB 空间变换到 IHS 空间, 得到 I (亮度)、H (色调)、S (饱和度) 3 个分量。

(3) 对全色图像和多光谱图像的 I 分量进行直方图匹配, 使全色图像和 I 分量具有相同的均值和方差。

(4) 对匹配后的全色图像 f_{pan} 和多光谱图像的 I 分量 f_{mul_I} 分别进行 L 层 DWT 变换, 得到如下分量:

$$[A_L f_{pan}, (D_j^h f_{pan}), (D_j^v f_{pan}), (D_j^d f_{pan})] \quad (3)$$

$$[A_L f_{mul_I}, (D_j^h f_{mul_I}), (D_j^v f_{mul_I}), (D_j^d f_{mul_I})] \quad (4)$$

式中: $j = 1, 2, \dots, L$; h, v, d 分别代表小波分解中的水平、垂直、对角 3 个方向的高频分量。

(5) 用本文提出的规则分别对低频和高频分量进行自适应选取, 得到满足要求的低频和高频分量。

(6) 对得到的低频和各层各方向的高频分量进行小波逆变换得到新的 I' 分量。以 I'、H、S 分量进行 IHS 逆变换, 得到融合图像。

对 f_{pan} 和 f_{mul_I} 的低频部分和高频部分分别进行窗口大小为 3×3 的自适应融合处理。

3.2.1 低频部分的融合规则

低频部分融合的主要目的是尽量保留多光谱图像的光谱特性, 同时将全色图像的一些空间信息也添加到融合图像中^[7]。融合规则如下:

(1) 在 3×3 的移动窗口内, f_{mul_I} 和 f_{pan} 的低频部分所共有的特征为:

$$A_L f_{com} = \min\{A_L f_{pan}, A_L f_{mul_I}\} \quad (5)$$

(2) 求出全色图像低频所特有的特征:

$$A_L f_{spe} = A_L f_{pan} - A_L f_{com} \quad (6)$$

(3) 生成融合图像 I 分量的低频部分为:

$$A_L f_{new_I} = A_L f_{mul_I} + \frac{std(A_L f_{pan})}{std(A_L f_{pan}) + std(A_L f_{mul_I})} \times A_L f_{spe} \quad (7)$$

其中, std 表示小波系数局部区域 3×3 阵的标准偏差。

3.2.2 高频部分的融合规则

高频部分的融合目的主要是要保留图像的细节信息,本文依据全色图像和多光谱图像的 I 分量的小波系数的高频分量的局部区域结构相似度值的大小特征而对图像的高频部分进行有选择的融合。

首先,给出两幅图像 X、Y 的结构相似度(SSIM)的如下定义^[8]:

$$SSIM(X, Y) = L(X, Y) * C(X, Y) * S(X, Y) = \frac{(2m_X m_Y + C_1) * (2\beta_{XY} + C_2)}{(m_X^2 + m_Y^2 + C_1) * (\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + C_2)} \quad (8)$$

其中:

$$L(X, Y) = \frac{2m_X m_Y + C_1}{m_X^2 + m_Y^2 + C_1} \quad (9)$$

$$C(X, Y) = \frac{2\sigma_X \sigma_Y + C_2}{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + C_2} \quad (10)$$

$$S(X, Y) = \frac{\beta_{XY} + C_3}{\sigma_X \sigma_Y + C_3} \quad (11)$$

式中: m_X 表示图像 X 的均值; m_Y 表示图像 Y 的均值; σ_X^2 表示图像 X 的方差; σ_Y^2 表示图像 Y 的方差; β_{XY} 表示图像 X、Y 的协方差; $L(X, Y)$ 表示图像 X、Y 的亮度比较; $C(X, Y)$ 表示图像 X、Y 的对比度比较; $S(X, Y)$ 表示图像 X、Y 的结构比较; C_1 、 C_2 、

$$E1_j^k = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} * \left(\frac{1 - SSIM(D_j^k f_{pan}, D_j^k f_{mul_l})}{1 - p} \right), & std(D_j^k f_{pan}) \geq std(D_j^k f_{mul_l}) \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} * \left(\frac{1 - SSIM(D_j^k f_{pan}, D_j^k f_{mul_l})}{1 - p} \right), & std(D_j^k f_{pan}) < std(D_j^k f_{mul_l}) \end{cases} \quad (14)$$

$$E2_j^k = 1 - E1_j^k \quad (15)$$

式中: $SSIM(D_j^k f_{pan}, D_j^k f_{mul_l})$ 为高频部分 $D_j^k f_{pan}$ 和 $D_j^k f_{mul_l}$ 所对应区域的结构相似度, $E1_j^k$ 、 $E2_j^k$ 分别为 $D_j^k f_{pan}$ 和 $D_j^k f_{mul_l}$ 所对应区域的权值。

④重复以上过程,直到各分解层水平、垂直、对角 3 个方向的高频子图像全部融合完毕。

当两幅源图像所对应的区域结构相似度小于阈值时,说明图像差别大,相关性较小,采用方差最大融合方式,可以尽可能地增加融合图像的细节信息;当两幅源图像所对应的区域结构相似度大于阈值时,说明两幅图像比较相似,采用加权平均融合方式,可以尽可能地保留源图像所共有的一些特征,以提高融合效果。经过广泛的融合实验,我们发现阈值 p 取 0.6、小常数 C_1 、 C_2 分别取 0.05 时,图像的融合效果相对较好。

4 实验与结果分析

本文采用 4 种不同的融合方法对 SPOT 的全色图像(如图 2 所示)和 TM 的多光谱图像(如图 3 所示)进行了融合实验,以表明所提出方法的实用性

$C_3 = C_2 / 2$ 为小的常数,以避免式中分母为零时而出现不稳定现象。SSIM 介于 -1 与 1 之间,取值为 1 时,表示该两幅图像的模式完全一致;取值为 -1,表示该两幅图像的模式相位相反。

具体的融合规则如下:

①定义一个阈值 p ,用来确定高频系数融合的方式;

②对多光谱图像 I 分量和全色图像的小波分解后的高频部分做 3×3 窗口运算,计算它们对应区域的结构相似度,并记录相似度的值;

③若相似度小于 p ,则采用方差最大原则进行融合,公式为:

$$D_j^k f_{new_l} = \begin{cases} D_j^k f_{pan}, & std(D_j^k f_{pan}) \geq std(D_j^k f_{mul_l}) \\ D_j^k f_{mul_l}, & std(D_j^k f_{pan}) < std(D_j^k f_{mul_l}) \end{cases} \quad (12)$$

其中, $D_j^k f_{new_l}$ 表示融合图像 I 分量的第 j 层 k 方向的高频分量; k 分别取 h 、 v 或 d ,代表水平、垂直和对角 3 个方向, $j = 1, 2, \dots, L$ 。

若相似度大于或等于 p ,则采用以下的加权融合规则,公式为:

$$D_j^k f_{new_l} = E1_j^k * D_j^k f_{pan} + E2_j^k * D_j^k f_{mul_l} \quad (13)$$

其中,

和有效性。这 4 种方法分别为:①传统的 IHS 变换法;②传统的基于 IHS 和小波变换的融合方法,融合时直接用全色图像的高频系数代替多光谱图像的高频系数,简称 IHS-DWT;③自适应的基于局部小波系数特征的遥感图像融合方法^[7],这也是一种基于 IHS 与小波变换相结合的方法,简称 IHS-DWT-L1;④本文提出的基于 IHS 变换与小波变换系数局部特征的选择性融合方法,简称 IHS-DWT-L2。



图 2 SPOT 全色图像



图3 TM多光谱图像

融合实验所使用的 SPOT 图像大小为 256×256 , 分辨率为 10m; 多光谱图像大小为 93×93 , 分辨率为 28m。实验时均采用 dbN 系列小波基, 小波分解层数为 3 层。为了客观地评价上述 4 种方法的图像融合效果, 本文使用均值、标准差、熵、相关系数和相对偏差 5 个评价指标。均值反映了像素的灰度平均值; 标准差和熵反映了图像的信息含量; 相关系数反映了融合结果图像与原多光谱图像的相似程度; 相对偏差反映了原多光谱图像的光谱失真程度。不同融合方法融合结果的各项评价指标结果统计如表 1 所示。

表 1 不同融合方法融合结果的统计评价参数对比

		原多光谱 图像	传统 IHS 融合图像	IHS-DWT 融合图像	IHS-DWT-L1 融合图像	IHS-DWT-L2 融合图像
均值	R	97.0289	93.1273	96.5376	101.6350	100.2136
	G	115.6137	115.8271	115.3373	123.1467	121.1329
	B	100.1345	97.7914	99.7125	105.7993	104.1559
标准差	R	52.9478	53.9935	58.3384	51.8838	51.8863
	G	48.3776	57.4368	54.5268	46.7338	47.0071
	B	50.3086	53.9083	56.3015	49.1018	49.2031
熵	R	7.6400	7.5937	7.7252	7.6540	7.6482
	G	7.5407	7.8076	7.7262	7.5246	7.5245
	B	7.5974	7.6492	7.7212	7.5945	7.5866
相关系数	R		0.5142	0.7447	0.8481	0.8501
	G		0.3142	0.6829	0.7761	0.7884
	B		0.4405	0.7179	0.8203	0.8260
相对偏差	R		0.7141	0.4921	0.4173	0.4157
	G		0.8260	0.5093	0.4773	0.4707
	B		0.7349	0.5016	0.4302	0.4231

从表 1 可知:

(1) 上述的 3 种基于 IHS 和小波变换相结合方法的相关系数均显著地大于传统的 IHS 变换方法, 而相对偏差均明显地小于传统的 IHS 变换方法。这表明 IHS-DWT、IHS-DWT-L1 和 IHS-DWT-L2 这 3 种方法都能较好地保持原多光谱图像的光谱信息。

(2) IHS-DWT 方法的标准差和熵是 4 种方法中最大的, 表明传统的 IHS 和小波变换相结合的方法能够很好地保留原图像的细节信息。然而, 相比 IHS-DWT-L1 和 IHS-DWT-L2 方法, IHS-DWT 有

较小的相关系数和更大的相对偏差, 这表明 IHS-DWT 方法在光谱信息的保持方面, 比 IHS-DWT-L1 和 IHS-DWT-L2 方法丢失了原多光谱图像更多的光谱信息, 从而会产生较大的光谱失真。这也正好说明了文献[7]中所阐述的结论: IHS-DWT-L1 方法在提高多光谱图像空间信息并保持其光谱特征方面强于传统的 IHS 与小波变换相结合的融合方法(即: IHS-DWT 方法)。因此, 本文的 IHS-DWT-L2 方法将主要与 IHS-DWT-L1 方法相比较, 以表明 IHS-DWT-L2 方法的优越性。

(3) IHS-DWT-L2 方法在均值、标准差、相关系数和相对偏差四个指标方面均优于 IHS-DWT-L1 方法,且熵变化不大。这表明 IHS-DWT-L2 方法在尽可能保留全色图像细节信息的同时,并最大限度地保持多光谱图像的光谱信息方面强于 IHS-DWT-L1 方法。

同时,为了从视觉测量方面对原始图像和本文方法融合后的图像进行分析和比较,本文给出 IHS-



图4 IHS-DWT-L1方法融合图像

DWT-L1 和 IHS-DWT-L2 方法的融合结果图像(如图4和5所示)。目视判读可以看出:融合图像的空间分辨率和清晰程度与原始多光谱图像相比都有显著提高,融合后的图像显得更加清晰,细节特征更加明显,比如道路的纹理清楚,边缘轮廓清晰可见。此外,相对于 IHS-DWT-L1 方法,本文的方法在更好地保持多光谱图像的光谱信息的同时,也提高了图像的清晰度。



图5 IHS-DWT-L2方法融合图像

5 结束语

本文在对基于小波变换的遥感图像融合方法研究的基础上,将 IHS 彩色空间变换和小波变换结合起来,提出了一种基于小波变换系数局部特征自适应提取、综合的选择性遥感图像融合方法。对预处理后的 TM 多光谱图像的 I 分量和 SPOT 全色图像进行多层小波分解,得到近似分量以及各层各方向

的细节分量,然后根据不同子带的特征以及不同的融合目的,分别采取有效的融合策略,以最大限度保持原多光谱图像的光谱信息的同时,提高融合图像的空间分辨率。实验结果表明:本文提出的方法在有效保留了空间细节信息的同时,在相关系数、相对偏差等评价指标方面均高于 IHS 变换和小波变换相结合的融合方法。

参考文献

- [1] Conzalez A. M, Saleta J. L, Catalan R. G, et al. Fusion of multispectral 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.
- [2] YANG R. I, Ehlers M, Usery E. L, et al. FFT-enhanced IHS transforms method for fusing high resolution satellite images[J]. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007: 381-392.
- [3] 吕艳琼. 基于小波变换的图像融合[D]. 兰州:兰州理工大学, 2009.
- [4] 杨焯, 梁继民, 杨万海. 基于进化策略和 IHS 变换的图像融合方法[J]. 电子学报, 2001, 29(10): 1388-1391.
- [5] 张静, 王建明, 袁振峰. 基于 IHS 变换与多进制小波变换的多源遥感影像融合[J]. 测绘工程, 2008, 17(2): 13-15.
- [6] 王仲妮, 余先川, 张立保. 一种基于整数小波变换的遥感影像融合算法[J]. 光电子激光, 2008, 19(11): 1542-1545.
- [7] 宋杨, 万幼川. 一种自适应的基于局部小波系数特征的遥感图像融合方法[J]. 遥感信息, 2007(1): 3-6.
- [8] 蔡娜. 基于小波变换的遥感图像融合方法研究[D]. 福州:福建师范大学, 2008.
- [9] 刘炜. 基于小波变换的遥感图像去噪与融合方法研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2008.
- [10] 王胜利, 余学祥, 杨然. 小波理论在遥感图像融合中应用[J]. 北京测绘, 2008(3): 45-49.
- [11] 张德丰, 徐华兴, 王旭宝, 等. MATLAB 数字图像处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [12] 王家文. Matlab 7.6 图形图像处理[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.