

# 基于 Contourlet 系数局部特征的选择性 遥感图像融合算法

朱 康 贺新光

(湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081)

**摘要** 为了使融合后的多光谱图像在显著提高空间分辨率的同时,尽可能多地保持原始多光谱特性,提出了一种基于 Contourlet 变换系数局部特征的选择性遥感图像融合方法。根据多光谱和全色图像融合过程中 Contourlet 变换后的低频和高频部分融合目的的不同,对得到的近似和各层各方向的细节分量分别运用窗口邻域移动模板逐一计算相应区域 Contourlet 系数阵的不同局部特征量,然后选择适当的准则,对图像的近似和细节分量分别应用不同的策略在 Contourlet 系数域内进行选择性融合,通过 Contourlet 和亮度-色调-饱和度(IHS)逆变换得到融合的高分辨率多光谱图像。采用 Landsat TM 多光谱和 SPOT 全色图像进行的融合实验结果表明:提出的算法在显著提高空间分辨率的同时,又能很好地保持原始图像的光谱特征,并优于传统的融合方法。

**关键词** 图像处理;遥感图像;图像融合;Contourlet 变换;局部特征

中图分类号 TP391 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.021001

## Selective Remote Sensing Image Fusion Method Based on the Local Feature of Contourlet Coefficients

Zhu Kang He Xinguang

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

**Abstract** In order to remarkably improve the spatial resolution of the fused multispectral images and preserve the original multispectral characteristics as much as possible, a selective remote sensing image fusion method is proposed based on the local feature of contourlet coefficients. Firstly, a window neighborhood mobile template is used to calculate the different local features of corresponding contourlet coefficient matrix one by one for the approximate components and the detail components of each direction of each layer resulting from contourlet transform according to the different fusion purposes of low and high frequency parts in the fusion process of multi-spectral and panchromatic images. Then the approximate images and detail images are fused selectively in contourlet coefficients domain by applying different fusion rules based on proper criterion. The resultant image with high resolution and multi-spectral characteristics is obtained by inverse contourlet transform and inverse intensity-hue-saturation (IHS) transform. Landsat TM and SPOT images are used to conduct the fusion experiment and the results show that the proposed algorithm can remarkably enhance the spatial details and well preserve the spectral features of the original images. This algorithm performs better than traditional fusion methods.

**Key words** image processing; remote sensing image; image fusion; Contourlet transform; local feature

**OCIS codes** 100.2000; 100.4994; 100.4997

## 1 引 言

遥感图像融合就是将同一区域不同光谱与空间信息的遥感图像按特定的算法进行处理,产生同时具有

收稿日期: 2011-08-26; 收到修改稿日期: 2011-09-25; 网络出版日期: 2011-12-07

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20094306120007)、湖南省教育厅资助科研项目(10B065)和湖南师范大学青年优秀人才培养计划(ET40906)资助课题。

作者简介: 朱 康(1989—),男,硕士研究生,主要从事遥感图像处理和分析等方面的研究。E-mail: zhu-kang@qq.com

导师简介: 贺新光(1973—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事多尺度数值计算、图像数字处理等方面的研究。

E-mail: xinguanghe@163.com(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

高光谱和高空间分辨率的新图像,以充分地利用和开发源图像<sup>[1,2]</sup>。常用的遥感图像融合方法有亮度-色调-饱和度(IHS)变换法、主成分分析(PCA)变换法、高通滤波(HPF)法等<sup>[3]</sup>。这些方法虽然能较好地改善多光谱图像的空间分辨率,但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<sup>[2]</sup>,融合后的影像色彩畸变严重。由于在空间和时间域上,小波变换对于图像的低频和低频部分都自适应地达到高分辨率,因此,近年来小波变换在图像融合领域的应用一直是一个热点<sup>[4,5]</sup>。但是,当推广到二维或更高维时,由一维小波张成的可分离小波只具有三个方向而且是各向同性的,并且小波基的支撑区间为不同尺寸大小的正方形,因此小波变换只适合于描述各向同性的点状奇异性,不能“最优”地表示含“线”或者“面”奇异性的高维函数,无法精确地表达图像边缘方向信息<sup>[6]</sup>。

针对小波变换的不足,2002年,Do等<sup>[7]</sup>提出了一种“真正”的二维图像表示方法:Contourlet变换方法,也称塔形方向滤波器组(PDFB)。Contourlet变换是一种多分辨率、局域的、方向的影像表示方法,它的基的支撑区间具有随尺度而长宽比变化的“长条形结构”,该变换将多尺度分析和方向分析分开进行,因此对于细小的方向轮廓和线段的表达有着独有的优势。将Contourlet变换引入图像融合,可以有效地捕捉图像的边缘特征,更好地保留原始图像的细节信息,因此,Contourlet变换在图像处理领域的应用越来越广泛<sup>[8,9]</sup>。Li<sup>[8]</sup>提出了一种利用Contourlet变换进行多聚焦图像融合的方法,但其主要针对多聚焦图像的融合处理,对低频和高频系数统一采用区域系数绝对值选大,没有充分考虑高频和低频系数的特点;苗启广等<sup>[9]</sup>提出了一种基于Contourlet变换的图像融合新方法,对低频系数采用加权平均的方法进行融合,对高频系数采用系数绝对值选大并进行一致性校验的方法进行处理,但是,文中对低频系数的处理为简单算术平均,不能充分地保留原图像的光谱特征。尽管已有许多学者运用Contourlet变换对多聚焦图像融合做了研究<sup>[8~10]</sup>,但是,只有为数极少的学者研究了Contourlet变换在多源遥感图像融合中的应用<sup>[11]</sup>。为了更好地兼顾多光谱图像光谱信息的保持和全色图像细节信息的保留,本文结合IHS变换,提出了一种基于Contourlet变换系数局部特征的选择性遥感图像融合算法。该算法充分利用了Contourlet变换后低频和高频系数的不同特征,当对光谱信息集中的低频系数进行融合时,在保留光谱信息的同时,尽量加入空间细节特征;而当对空间细节信息集中的高频系数进行融合时,利用局部特征作为选择依据,尽可能多地保持原始图像的光谱信息,以有效减少融合图像光谱特性的扭曲。遥感图像融合实验结果表明,本文提出的算法是一种有效可行的遥感图像融合算法。

## 2 Contourlet变换

Contourlet变换<sup>[12]</sup>是将拉普拉斯金字塔(LP)和方向滤波器组(DFB)进行组合而构造出的迭代滤波器结构,即Contourlet滤波器组。Contourlet分解变换的实现可以看成是LP和DFB这两个步骤。LP变换对图像进行多尺度分解以捕获奇异点,由此得到一系列的带通及下采样影像。每次LP分解产生一个低频子带和一个高频子带,对低频子带可以继续迭代分解以获得低频和高频子带;对得到的高频子带进行DFB滤波,将分布在同方向上的奇异点合成为一个系数,这就获得了不同的方向子带。由于DFB的设计针对的是图像中的高频信息,对于低频信息的处理是有限的,因此仅靠DFB不能有效地对图像稀疏性进行表示,这就需要将DFB与LP分解相结合,通过LP分解将低频信息去除后运用DFB以捕获高频信息。例如:对一幅图像 $f$ 进行 $J$ 层Contourlet变换,LP变换输出为 $J$ 个带通图像 $D_j$  ( $j=1, \dots, J$ )和一个低频分量 $A_j$ ,对每个带通图像 $D_j$ 进一步进行DFB分解得到 $2^j$ 个方向带通图像,各尺度上的高频分量 $D_j^k$  ( $j=1, \dots, J; k=1, \dots, 2^j$ )。图1显示了应用Contourlet滤波器组对影像进行多尺度及方向分解的流程。

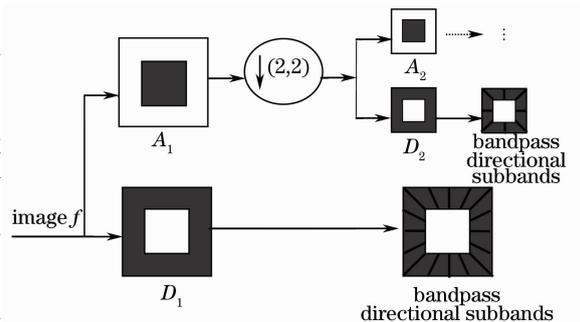


图1 Contourlet变换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Contourlet transform

Contourlet 变换的实现如下。

1) 采用 LP 变换对影像进行多尺度分析,由此得到一系列的带通及下采样影像。

2) 由 DFB 将分布在同方向上的奇异点合成一个系数。影像的 LP 分解连续地对其带通影像进行子带分解。当对这些带通子带应用 DFB 时,便能有效地“捕获”方向信息,这就是 PDFB,其具有双迭代滤波器结构,将不同尺度的影像分解成方向子带。

3) LP 分解和 DFB 都具有完全重构特性,由其组合而成的 PDFB 也能实现完全重构,并且 PDFB 与 LP 分解有相同的冗余度。

### 3 基于 Contourlet 系数局部特征的选择性融合算法

Contourlet 变换继承了小波变换的多分辨和时频局部化特性,同时又将图像进行多个方向的分解,能更好地捕捉图像的边缘方向信息,所以将 Contourlet 变换引入图像融合可以有效地捕捉图像的边缘特征,更好地保留原始图像的细节信息。然而,现有的基于 Contourlet 变换的遥感图像融合方法在将多光谱图像进行 IHS 变换得到的 I 分量和全色图像进行 Contourlet 变换后,对低频系数普遍采用简单算术平均的方法进行融合,结果造成了较大的光谱失真<sup>[9]</sup>。因此,在应用传统的基于 IHS 和 Contourlet 变换的融合方法进行遥感图像融合时,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了明显的扭曲。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,将 IHS 与 Contourlet 变换结合起来,提出了一种新的基于 Contourlet 变换系数局部特征的选择性多光谱图像和全色图像的融合算法。

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选择性融合算法,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区域方差最大并进行一致性校验的选择性方法。具体实现步骤如下。

1) 对多光谱图像和全色图像进行图像预处理,包括图像去噪、重采样、图像配准。

2) 将重采样后的多光谱图像  $f_{mul}$  进行 IHS 变换,分别得到  $I$ (亮度)、 $H$ (色调)、 $S$ (饱和度)三个分量。

3) 对多光谱图像  $f_{mul}$  的  $I$  分量  $f_{mul_i}$  和全色图像  $f_{pan}$  进行  $J$  层 Contourlet 变换,得到如下分量:

$$[A_j f_{mul_i}, D_j^k f_{mul_i}], \quad (1)$$

$$[A_j f_{pan}, D_j^k f_{pan}], \quad (2)$$

式中  $A_j$  表示低频分量;  $D_j^k$  表示各尺度上各方向的高频分量,  $j = 1, \dots, J$  表示分解层次,  $k = 1, \dots, 2^j$  表示第  $j$  层的各个方向。

4) 用本文提出的规则(如下文所述)分别对低频和高频系数进行自适应选取,得到满足要求的低频和高频分量。

5) 对得到的低频和各层各方向的高频分量进行 Contourlet 逆变换得到新的  $I'$  分量,最后对  $I'$ 、 $H$ 、 $S$  分量进行 IHS 逆变换得到融合图像。

遥感图像融合的关键在于融合算法的设计。鉴于基于单个像素的融合方式的局限性,本文的低频和高频融合规则均采用基于邻域的融合方式,邻域窗口大小为  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$ 。同时,考虑到 Contourlet 变换分解后的低频近似信息和高频细节信息具有不同的物理意义,因此在融合过程中,需要对图像的低频和高频信息加以区分,采用不同的融合算子和融合规则。

#### 3.1 低频系数融合规则

低频系数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特征也添加到融合图像中。借鉴文献[13]对图像小波分解后低频系数进行处理的主要思想,提出一种对 Contourlet 变换低频系数的融合采用有选择地将全色图像特征加入融合图像的规则。该规则改进了低频系数融合时普遍采用简单算术平均的方法,能够更好地兼顾光谱信息和空间信息的保留。

1)  $f_{mul_i}$  和  $f_{pan}$  的低频部分所共有的特征定义为

$$A_j f_{com} = \min \{ A_j f_{pan}, A_j f_{mul_i} \}. \quad (3)$$

2) 求出全色图像低频所特有的特征:

$$A_j f_{fea} = A_j f_{pan} - A_j f_{com} \quad (4)$$

3) 生成融合图像  $I'$  分量的低频系数为

$$A_J f_{\text{new}_i} = A_J f_{\text{mul}_i} + \frac{D_{\text{st}}(A_J f_{\text{pan}})}{D_{\text{st}}(A_J f_{\text{pan}}) + D_{\text{st}}(A_J f_{\text{mul}_i})} \times A_J f_{\text{fea}}, \quad (5)$$

式中  $D_{\text{st}}$  表示邻域窗口内系数的标准差。

### 3.2 高频系数融合规则

高频系数融合的主要目的是在保留全色图像空间信息的同时,尽可能多地保持多光谱图像的光谱特性。为此,本文参考文献[9]的一些思想,对高频系数采用区域方差最大并进行一致性校验的方法进行处理。该方法避免了单一特征量对融合结果的影响,考虑了中心像素与周围像素的联系,提高了融合的精度。

1) 对各高频分量进行邻域运算,将求得的标准差赋值给中心像素,得到各层各方向高频系数的标准差  $D_{s_j}^k f_{\text{pan}}$  和  $D_{s_j}^k f_{\text{mul}_i}$ ,然后比较  $D_{s_j}^k f_{\text{pan}}$  和  $D_{s_j}^k f_{\text{mul}_i}$  相应位置上标准差的大小,并把比较的结果赋值给  $D_j^k T$ ,即:

$$D_j^k T(x, y) = \begin{cases} 1, & D_{s_j}^k f_{\text{pan}}(x, y) \geq D_{s_j}^k f_{\text{mul}_i}(x, y) \\ 0, & D_{s_j}^k f_{\text{pan}}(x, y) < D_{s_j}^k f_{\text{mul}_i}(x, y) \end{cases}. \quad (6)$$

2) 对  $D_j^k T$  进行一致性校验,比较  $D_j^k T$  中每个  $3 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  邻域窗口内 0 和 1 的个数,如果值为 1 的像素个数等于或大于 5,则融合图像中该位置的系数取全色图像相应位置的系数,否则取多光谱图像相应位置的系数,即

$$D_j^k f_{\text{new}_i}(x, y) = \begin{cases} D_j^k f_{\text{pan}}(x, y), & N(1) > N(0) \\ D_j^k f_{\text{mul}_i}(x, y), & N(1) < N(0) \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $N$  表示邻域窗口内 0 或 1 的个数。

## 4 仿真实验与分析

为验证提出算法的有效性,选择分辨率为 28 m 的 Landsat TM 多光谱图像和分辨率为 10 m 的 SPOT 全色图像进行仿真实验。原多光谱和全色图像如图 2 所示。为了进行对比分析,采用三种不同的融合方法对给出的多源遥感图像进行融合实验。这三种方法分别是:1)传统的 IHS 变换方法;2)传统的 Contourlet 变换方法,其中低频系数采用简单的算术平均,高频系数采用区域方差最大的融合策略;3)本文提出的选择性融合方法。



(a) TM multi spectral image



(b) SPOT panchromatic image

图 2 原始图像

Fig. 2 Original images

实验中 Contourlet 变换均分解 4 个尺度,尺度从粗到精的方向分解个数分别为 4,8,8,16 个。尺度滤波器为“9-7”,DFB 为“pkva”。不同方法的融合结果如图 3 所示。图 3(a)表示传统 IHS 变换融合图像;图 3(b)表示传统 Contourlet 变换融合图像;图 3(c)表示本文方法融合图像。从实验结果可以看出,传统 IHS 变换、传统 Contourlet 变换和本文提出的融合方法均提高了融合结果的空间质量,图像的空间细节信息比原多光谱图像有显著增加。但是,图 3(a)的部分区域尤其是植被区域却出现了严重的光谱失真现象,

这与遥感图像融合的目的不符;并且与图 3(a)相比,图 3(b)和(c)的光谱特征更加丰富,光谱扭曲程度显著减小;而从图 3(b)和(c)的对比中可以看出,图 3(c)对地物光谱信息的表达更加准确。



图 3 不同方法融合结果图

Fig. 3 Fusion results from different algorithms

为了更客观地评价不同融合结果,采用信息熵(Entropy)、均值(Mean)、标准差(Std)、平均梯度(AG)、相关系数(CC)和偏差(Bias)6种客观指标对融合图像进行了定量分析。均值反映像素的灰度平均值;信息熵是衡量图像信息丰富程度的一个重要指标,融合图像的熵越大,说明融合图像的信息量增加越多,融合图像所含的信息越丰富,融合质量越好;标准差反映了图像灰度相对于灰度平均值的离散情况,若标准差大,则图像灰度级分布分散,图像的反差大,可以看出更多的信息;平均梯度反映了图像中微小细节反差与纹理变化特征及清晰度;相关系数反映了融合结果与原多光谱图像的相似程度;偏差反映了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统计如表 1 所示。

表 1 不同融合算法的客观评价指标对比

Table 1 Comparison of objective indicators for different fusion algorithms

		Entropy	Mean	Std	AG	CC	Bias
Panchromatic image		5.339	108.38	55.428	20.817		
	R	5.203	86.87	48.967	7.637		
Multispectral image	G	5.193	108.85	46.120	7.597		
	B	5.177	90.85	46.182	7.579		
	R	5.148	83.04	49.417	19.478	0.443	0.153
Traditional IHS transform	G	5.346	108.13	54.148	19.916	0.305	0.179
	B	5.222	88.51	50.505	19.623	0.375	0.161
	R	5.204	85.30	51.398	19.639	0.660	0.123
Traditional contourlet transform	G	5.324	108.60	51.762	20.009	0.579	0.137
	B	5.239	89.92	50.455	19.771	0.614	0.127
	R	5.260	90.11	53.668	19.709	0.695	0.120
Proposed method	G	5.343	114.43	52.733	20.052	0.613	0.134
	B	5.280	94.96	51.986	19.833	0.647	0.125

从表 1 可以看出,传统的 IHS 融合方法显著提高了融合图像的空间质量,融合结果的信息熵、标准差和平均梯度均大于原多光谱图像,表明融合图像具有良好的空间信息,但是其与原多光谱图像各波段的相关系数较小,偏差较大,即融合图像产生了严重的光谱失真。传统 Contourlet 变换融合结果的信息熵、标准差和平均梯度等各空间信息方面的指标都优于传统的 IHS 变换,并且融合图像与原多光谱图像各波段的相关系数和偏差指标也明显优于传统的 IHS 变换方法,验证了将 Contourlet 变换应用于遥感图像融合中的可行性和有效性。而从信息熵、标准差和平均梯度等各项客观指标的对比中可以看出,与传统的 Contourlet 变换方法相比,本文提出的方法能够更好地保留图像的空间信息,并且从相关系数和偏差两个客观指标的对比中可以看出,本文方法比传统 Contourlet 变换保留了更多的原始多光谱图像的光谱特征。所以,将 Contourlet

变换应用于遥感图像融合时,本文提出的方法更为有效。

## 5 结 论

Contourlet 变换作为新的多尺度几何分析工具,具有良好的空域、频域局部特性和方向特性,能够有效地捕获图像的边缘信息,因此将 Contourlet 变换应用于图像融合,可以为融合图像提供更为丰富和全面的信息。据此,本文在 IHS 变换的基础上,将 Contourlet 变换应用于遥感图像融合中,提出了一种基于 Contourlet 变换系数局部特征的选择性遥感图像融合算法。本算法低频分量没有采用传统融合方法中“加权平均”的融合规则,而是使用一种基于区域特征的融合规则,在尽量保留图像的光谱特性的同时,将全色图像的一些特征也添加到了融合图像中。高频分量采用区域方差最大并结合一致性校验的融合规则,充分考虑了单个像素的区域相关性,用整个邻域窗口内的像素共同判定中心像素的取值,使得融合的高频系数更加有效地反映地面实际情况。实验结果表明,相对于传统的融合算法,本文提出的融合算法在显著提高融合图像空间质量的同时,更多地保留了原始多光谱图像的光谱特性,是一种更有效可行的遥感图像融合算法。

## 参 考 文 献

- 1 H. Yeson, Y. Besnus, J. Polet. Extraction of spectral information from Landsat TM data and merger with SPOT panchromatic imagery a contribution to be study of geological structures [J]. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 1993, **48**(5): 23~36
- 2 C. Pohl, J. Genderen. Multi-sensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, **9**(5): 823~854
- 3 Luclen Wald, Thlerry Ranchln, Marc Mangolln. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: assessing the quality of resulting images [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, **63**(6): 691~699
- 4 Xia Mingge, He You, Oyang Wen *et al.*. Overview of wavelet-analysis-based image fusion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, **32**(2): 177~181
- 5 夏明革, 何 友, 欧阳文 等. 基于小波分析的图像融合评述 [J]. *红外与激光工程*, 2003, **32**(2): 177~181
- 6 Tao Bingjie, Wang Jingru. Overview of wavelet-analysis-based image fusion [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2005, **41**(25): 16~19
- 7 陶冰洁, 王敬儒. 采用小波分析的图像融合方法评述 [J]. *计算机工程与应用*, 2005, **41**(25): 16~19
- 8 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
- 9 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
- 10 Minh N. Do, Martin Vetterli. Contourlet: a directional multi-resolution image representation [C]. *Proceeding of IEEE International Conference on Image Processing*, 2002, 357~360
- 11 S. T. Li. Multi-focus Image fusion using contourlet [C]. *The 6th International Symposium on Test and Measurement*, 2005, **9**: 6358~6361
- 12 Miao Qiguang, Wang Baoshu. Novel algorithm of multi-sensor image fusion using Contourlet [J]. *Computer Science*, 2008, **35**(5): 231~235
- 13 苗启广, 王宝树. 基于 Contourlet 的图像融合新方法 [J]. *计算机科学*, 2008, **35**(5): 231~235
- 14 Li Meili, Li Yanjun, Wang Hongmei. Multi-focus image fusion method based on Contourlet transform [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, **45**(10): 20~22
- 15 李美丽, 李言俊, 王红梅. 多聚焦图像融合的 Contourlet 变换方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2009, **45**(10): 20~22
- 16 Hu Shunshi, Ding Lin, Qin Jianxin *et al.*. Image fusion technique based on combination of  $Ia\beta$  color space and Contourlet transform [J]. *Application Research of Computers*, 2010, **27**(4): 1521~1523
- 17 胡顺石, 丁 琳, 秦建新 等. 基于  $Ia\beta$  色彩空间和 Contourlet 变换相结合的融合方法 [J]. *计算机应用研究*, 2010, **27**(4): 1521~1523
- 18 Lin Liyu, Zhang Youyan, Sun Tao *et al.*. Contourlet Transform —— Image Processing Application [M]. Beijing: Science Press, 2008
- 19 林立宇, 张友焱, 孙 涛 等. Contourlet 变换——影像处理应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008
- 20 Song Yang, Wan Youchuan. An adaptive remote sensing image fusion method based on local feature of wavelet transform [J]. *Remote Sensing Information*, 2007, (1): 3~6
- 21 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