

# 基于 $\grave{a}$ trous-Contourlet 变换的梯度 选择遥感图像融合算法

罗丽<sup>1)</sup> 王珂<sup>1)</sup> 王瑾<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(吉林大学通信工程学院 长春 130025) <sup>2)</sup>(长春工程学院 长春 130022)

**摘要** 为了更好地进行遥感图像融合,基于  $\grave{a}$ trous-Contourlet 变换,提出了一种利用梯度和匹配度结合的多光谱和高分辨率图像融合新算法。该算法首先结合 Contourlet 变换和  $\grave{a}$ trous 小波的优势,将图像进行  $\grave{a}$ trous-Contourlet 多分辨率分解;由于梯度反映了图像的细节信息,因此该算法在加权时,为了尽可能地提高空间分辨率,考虑高频系数对应位置系数的正负,提出了一种匹配度梯度加权算法(match degree weighted gradient algorithm, MWGA)用于对高频细节进行融合;最后用高频附加的方法得到最后的融合图像。实验表明,此算法能在获得很好的光谱质量的基础上,获得空间细节增强效果更佳的图像。

**关键词** 图像融合  $\grave{a}$ trous-Contourlet 变换 匹配度 MWGA 高频附加

**中图法分类号:** TP751.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2008)06-1128-06

## Fusion Algorithm of Remote Sensor Images Based on $\grave{a}$ trous-Contourlet Transform with Gradient Selection

LUO Li<sup>1)</sup>, WANG Ke<sup>1)</sup>, WANG Jin<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun 130025)

<sup>2)</sup> (College of Changchun Engineering, Changchun 130022)

**Abstract** A fusion algorithm of a low-resolution, multi-spectral image and a high-resolution image based on  $\grave{a}$ trous-Contourlet transform with match degree and gradient selection is proposed. First, the resource images are decomposed  $\grave{a}$ trous-Contourlet transform, which the advantages of  $\grave{a}$ trous transform and Contourlet transform. Then considering that the gradient represents the details of images, and that the positive or negative coefficients are existed in the corresponding position, for the purpose that the space resolution of the fused image is as high as possible, MWGA (match degree weighted gradient algorithm) is proposed for the fusion of high frequency details. The last, the fused image is acquired the method of high frequency addition. It is proved that the fusion results especially the space detail quality of the proposed method is better comparing the traditional methods.

**Keywords** image fusion,  $\grave{a}$ trous-Contourlet transform, match degree, MWGA, high frequency addition

## 1 引言

众所周知,由于小波变换可以将原始图像分解成一系列不同空间分辨率和频域特性的子图像,从而能够充分反映原始图像的局部变化特

征,在图像融合领域中得到广泛的应用。目前对图像进行融合比较典型的方法是 Mallat 小波变换法<sup>[1,2]</sup>和 Nunez 等人提出的基于  $\grave{a}$ trous 小波的小波附加方法<sup>[3]</sup>,对于多光谱图像和高空间分辨率图像的融合来说,这两种方法虽相对于 IHS 变换法、PCA 法等,在光谱质量和空间质量上得到了

较好的均衡<sup>[4]</sup>,但由于小波变换是用点的奇异性来逼近线的奇异性,没有很好的方向选择性和各向异性,不能很好地反映图像的几何特征,因此不能取得很好的融合效果<sup>[5,6]</sup>。

Contourlet 变换是一种具有方向性和各向异性的图像多尺度几何分析,它不仅很好地弥补了小波变换的不足,而且能很好地反映图像边缘等几何信息<sup>[7]</sup>。但是 Contourlet 变换的多尺度分析采用了拉普拉斯金字塔分解,不具有平移不变性,为了弥补这方面的不足,可采用 àtrous 小波变换来代替拉普拉斯金字塔分解,即先对图像进行 àtrous 小波变换,以获得具有相同大小的低频面和各小波面;然后对各小波面使用 Contourlet 变换的方向滤波来获得具有不同方向的高频分量,即使用 àtrous-Contourlet 变换对图像进行多分辨率分解。

对多光谱图像和高空间分辨率图像来说,由于文献[3]中的小波附加法能得到较好的融合结果,因此,本文基于此思想,先在高频部分采用合适的融合规则,然后用高频叠加的方法来获得更好融合结果。虽然比较适用于高频细节融合的规则是基于窗口的方法<sup>[8]</sup>,但常用的加权融合规则没有考虑到用不同符号对高频系数进行加权计算时,可能导致边缘模糊的问题。针对以上问题,根据梯度可反映图像细节纹理信息的特点,本文提出了一种基于窗口的匹配度梯度加权算法(match degree weighted gradient algorithm, MWGA),该算法的思想为根据匹配度阈值来确定是选择还是加权,当进行加权计算时应先考虑对应位置高频系数的同号与异号,然后采用不同的融合规则。

## 2 àtrous-Contourlet 变换

由于对图像进行 Mallat 小波变换只能反映水平、垂直、对角 3 个方向的高频子带,而进行 àtrous 小波变换后,则在每一层仅将图像分解为一个高频小波面,因此小波变换不能很好地表示线等高维函数,而自然物体的光滑边界则使得自然图像的不连续性往往体现为光滑曲线上的奇异性,并不仅仅是点奇异。Contourlet 变换是一种能反映 2 维或更高维奇异性的一种新的多分辨率分析工具,是 Do 和 Martion Vetterli 在 2002 年提出的一种“真”2 维图像表示方法,它首先对图像进行金字

塔多尺度分解,然后利用方向滤波器组(directional filter bank, DFB)将分布在同方向的奇异点合成为一个系数来获得具有更多方向的高频子带。但是由于拉普拉斯金字塔分解不具有平移不变性,而且对于多光谱图像和空间分辨率图像融合,文献[3]中的小波附加法却能得到很好的融合结果,因此本文采用一种结合 àtrous 小波变换和 Contourlet 变换优点的 àtrous-Contourlet 变换对图像进行多分辨率分解。

àtrous 小波变换(也叫多孔小波变换)是通过对图像进行分解来得到与原图像大小相同的一低频近似信息和各高频小波面,即

$$S(\mathbf{x}) = S_N(\mathbf{x}) + \sum_{l=1}^N \omega_l(\mathbf{x}) \quad (1)$$

其中,  $S_N(\mathbf{x})$  为低频子图像,  $\omega_l(\mathbf{x})$  为各高频小波面,  $\omega_l(\mathbf{x}) = S_l(\mathbf{x}) - S_{l-1}(\mathbf{x})$ 。àtrous 小波变换在 2 维空间类似于用卷积核对影像进行滤波,由于  $B_3$  样条函数对样本数据具有很好的插值性,通常选择  $B_3$  样条函数作为尺度函数,其 2 维卷积核为

$$\mathbf{R} = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在对图像进行小波分解后,先用 Contourlet 变换中的方向滤波器对高频小波面进行滤波,然后将分布在同方向的奇异点合成为一个系数来获得具有更多方向的高频子带,这种变换称为 àtrous-Contourlet 变换。其分解原理图如图 1 所示。

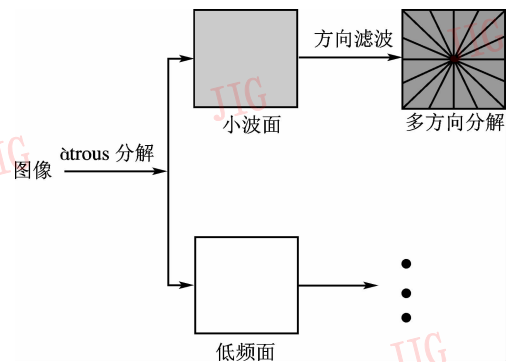


图 1 àtrous-Contourlet 变换图像分解原理图

Fig. 1 Decomposition with àtrous-Contourlet transform

### 3 算法原理

#### 3.1 算法步骤

本文融合算法的步骤如下：

(1) 对多光谱图像进行 IHS 变换, 将其分解为强度  $I$ 、色调  $H$ 、饱和度  $S$  等 3 个近似正交的分量, 并将高分辨率图像与强度分量图  $I$  进行直方图匹配；

(2) 对匹配后的高空间分辨率图像  $B$  和强度分

量图  $I$  进行  $\hat{a}$ trous-Contourlet 多分辨率分解；

(3) 先应用 MWGA 算法对高频部分进行融合, 再对融合后的高频系数进行反方向滤波来获得融合图像的各高频小波面；

(4) 用高频附加的方法来获得融合图像的强度分量图  $\hat{I}$ , 再结合色调分量  $H$ 、饱和度分量  $S$  进行 IHS 反变换来获得最后融合结果。

其融合过程如图 2 所示 (图中只对图像进行一层多分辨率分解)。

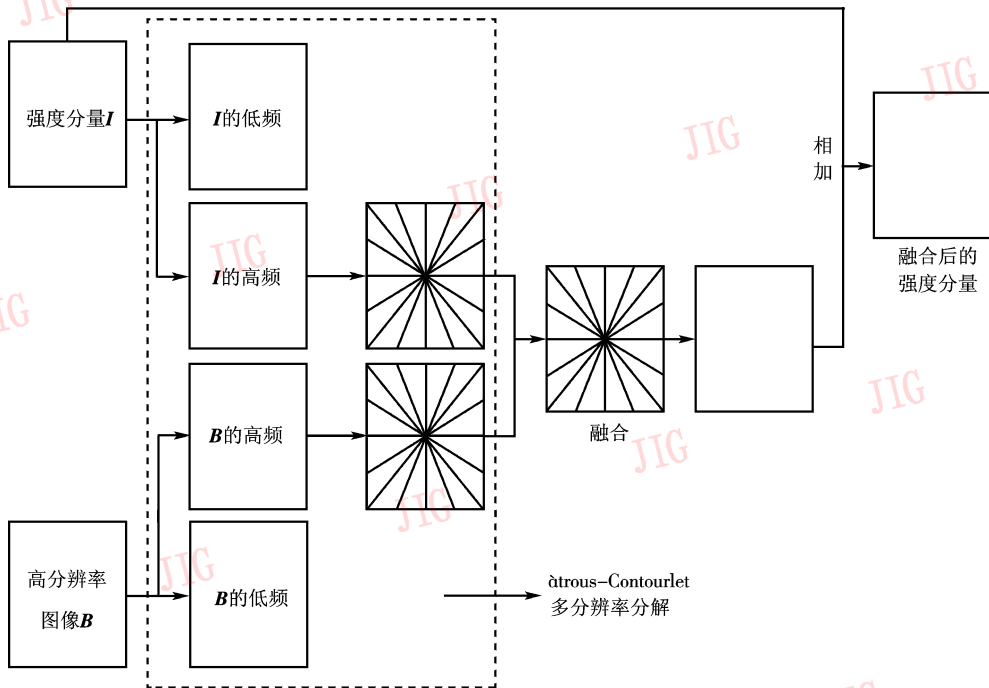


图 2  $\hat{a}$ trous-Contourlet 变换图像融合原理

Fig. 2 Principle of fusion based on  $\hat{a}$ trous-Contourlet transform

#### 3.2 MWGA 算法原理

对于多光谱和高空间分辨率的图像融合, 目的是将多光谱图像中所没有的高空间分辨率图像的细节信息加入到多光谱图像中, 由于细节信息往往体现在图像的高频部分, 因此对高频细节的融合也是图像融合的一个关键。在对高频部分进行融合时, 由于梯度可反映图像的细节和纹理信息, 因此本文采用梯度作为活性测度, 并根据它们的匹配测度, 提出了一种新的加权梯度选择算法, 设阈值为  $\alpha$ , 则算法原理如下：

(1) 对各尺度的各个方向的高频子带, 以  $(x, y)$  位置为中心的  $K \times L$  ( $3 \times 3$  或  $5 \times 5$ ) 大小的窗口, 按照梯度算子  $h$  计算各高频子带的梯度  $G_{i,\epsilon}^p(x, y)$ , 并计算各对应高频子带的匹配测度  $P_{i,\epsilon}(x, y)$ , 其中  $\epsilon$  表示方向,  $i$  表示尺度,  $h$  和  $P_{i,\epsilon}(x, y)$  分别如下式所示：

$$h = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$P_{i,\epsilon}(x, y) = \frac{2 \times \sum_{m \in K} \sum_{n \in L} D_{i,\epsilon}^I(x+m, y+n) D_{i,\epsilon}^B(x+m, y+n)}{\sum_{m \in K} \sum_{n \in L} [D_{i,\epsilon}^I(x+m, y+n)]^2 + \sum_{m \in K} \sum_{n \in L} [D_{i,\epsilon}^B(x+m, y+n)]^2} \quad (4)$$

$D_{i,\varepsilon}^I(x,y)$  和  $D_{i,\varepsilon}^B(x,y)$  分别为强度分量图  $I$  和图像  $B$  在位置  $(x,y)$  处,尺度为  $i$ 、方向为  $\varepsilon$  的高频分量。

(2) 当  $P_{i,\varepsilon}(x,y) \leq \alpha$  时,则表明在位置  $(x,y)$  处的两个分量的相关程度比较低,由于其刻画局部信息的表现形式明显不同,同时由于梯度可反映图像的纹理和细节信息,因此本文选用对应梯度值较大的系数作为融合系数<sup>[9]</sup>

$$D_{i,\varepsilon}^F(x,y) = \begin{cases} D_{i,\varepsilon}^I(x,y) & |G_{i,\varepsilon}^I(x,y)| \geq |G_{i,\varepsilon}^B(x,y)| \\ D_{i,\varepsilon}^B(x,y) & |G_{i,\varepsilon}^I(x,y)| < |G_{i,\varepsilon}^B(x,y)| \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $D_{i,\varepsilon}^F(x,y)$  为融合图像  $F$  在位置  $(x,y)$  处尺度为  $i$ 、方向为  $\varepsilon$  的高频分量。

当  $P_{i,\varepsilon}(x,y) > \alpha$  时,则认为两幅图分量的相关程度比较高。为了提高局部纹理描述的准确程度,

$$w_{i,\varepsilon}(x,y) = \begin{cases} \frac{|G_{i,\varepsilon}^I(x,y)|}{|G_{i,\varepsilon}^I(x,y)| + |G_{i,\varepsilon}^B(x,y)|} & |G_{i,\varepsilon}^I(x,y)| + |G_{i,\varepsilon}^B(x,y)| \neq 0 \\ 1/2 & |G_{i,\varepsilon}^I(x,y)| + |G_{i,\varepsilon}^B(x,y)| = 0 \end{cases}$$

### 4 仿真结果及分析

为了检验本文方法的性能,分别从空间细节信息的增强与光谱信息的保持两个方面进行评价<sup>[8]</sup>,其中光谱信息的保持采用图像的相关系数和扭曲度来衡量,由于相关系数反映了两幅图像间的相关程度,因此通过比较融合前后图像的相关系数就可以看出多光谱图像的光谱信息改变程度;而图像的扭曲度则直接反映了多光谱图像的光谱失真程度。设图像大小为  $M \times N$ ,则相关系数为

$$F = \sum_{x,y} \frac{\sqrt{(f(x,y) - f(x,y-1))^2 + (f(x,y) - f(x-1,y))^2}}{MN} \quad (11)$$

本文选用 IKONOS 卫星拍摄的加拿大弗雷德里克顿州的空间分辨率为 1m 的高空间分辨率图像和空间分辨率为 4m 的多光谱图像(本文选取 1,2,4 波段)进行仿真实验,并将其与 IHS 变换法、离散小波变换(DWT)系数选大法、àtrous 小波附加法、基于 àtrous 小波的 MWGA 法、基于 àtrous-Contourlet 变换的系数选大法的融合结果进行比较,本文方法中 àtrous-Contourlet 变换的多尺度分解分两层,两个小波面又分别进行 8 和 16 方向滤波,其实验结果如图 3 所示。按以上评价参数对各种方法的融合结果

对其进行加权融合,而不是简单的丢弃。考虑到对应系数存在异号的情况,由于在进行加权时可能会引起部分边缘或纹理模糊,因此对不同情况要采用不同的规则,即同号时,

$$D_{i,\varepsilon}^F(x,y) = w_{i,\varepsilon}(x,y) \times D_{i,\varepsilon}^I(x,y) + (1 - w_{i,\varepsilon}(x,y)) \times D_{i,\varepsilon}^B(x,y) \quad (6)$$

当  $D_{i,\varepsilon}^I(x,y)$  与  $D_{i,\varepsilon}^B(x,y)$  异号时,则

$$D_{i,\varepsilon}^F(x,y) = \begin{cases} w_{i,\varepsilon}(x,y) \times D_{i,\varepsilon}^I(x,y) - (1 - w_{i,\varepsilon}(x,y)) \times D_{i,\varepsilon}^B(x,y) & \text{如果 } |G_{i,\varepsilon}^I(x,y)| \geq |G_{i,\varepsilon}^B(x,y)| \\ -w_{i,\varepsilon}(x,y) \times D_{i,\varepsilon}^I(x,y) + (1 - w_{i,\varepsilon}(x,y)) \times D_{i,\varepsilon}^B(x,y) & \text{如果 } |G_{i,\varepsilon}^I(x,y)| < |G_{i,\varepsilon}^B(x,y)| \end{cases} \quad (7)$$

式中,权值为

$$\begin{cases} |G_{i,\varepsilon}^I(x,y)| + |G_{i,\varepsilon}^B(x,y)| \neq 0 \\ |G_{i,\varepsilon}^I(x,y)| + |G_{i,\varepsilon}^B(x,y)| = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$R(f,g) = \frac{\sum_{x,y} [(f(x,y) - \mu_f) \times (g(x,y) - \mu_g)]}{\sqrt{\sum_{x,y} (f(x,y) - \mu_f)^2 \times \sum_{x,y} (g(x,y) - \mu_g)^2}} \quad (9)$$

光谱扭曲度为

$$D = \frac{1}{MN} \sum_x \sum_y |f(x,y) - g(x,y)| \quad (10)$$

式中,  $f(x,y)$  和  $g(x,y)$  分别为融合前后图像中点  $(x,y)$  的灰度值,  $\mu_f$  和  $\mu_g$  分别为两幅图像的均值,以上评价都分别对 3 个波段进行评价。

空间细节信息的增强采用空间频率来评价,若空间频率越高,则空间信息越丰富,空间频率定义为

进行性能评价的结果如表 1 所示。

从图 3 和表 1 可以看出以下特点:

(1) 从目视效果来看,不同的融合方法都在一定程度上改善了多光谱图像的空间分辨率,IHS 变换法与其他多分辨率方法比较,其相关系数最小,光谱扭曲最大,这表明其光谱信息保持最差,但其空间质量较好。在基于多分辨率分析的图像融合算法中,利用高频附加的方法的融合结果(图 3(e)~图 3(h))相对于 DWT 的小波替代法(图 3(d))在光谱质量和空间质量上都有很大的改进。

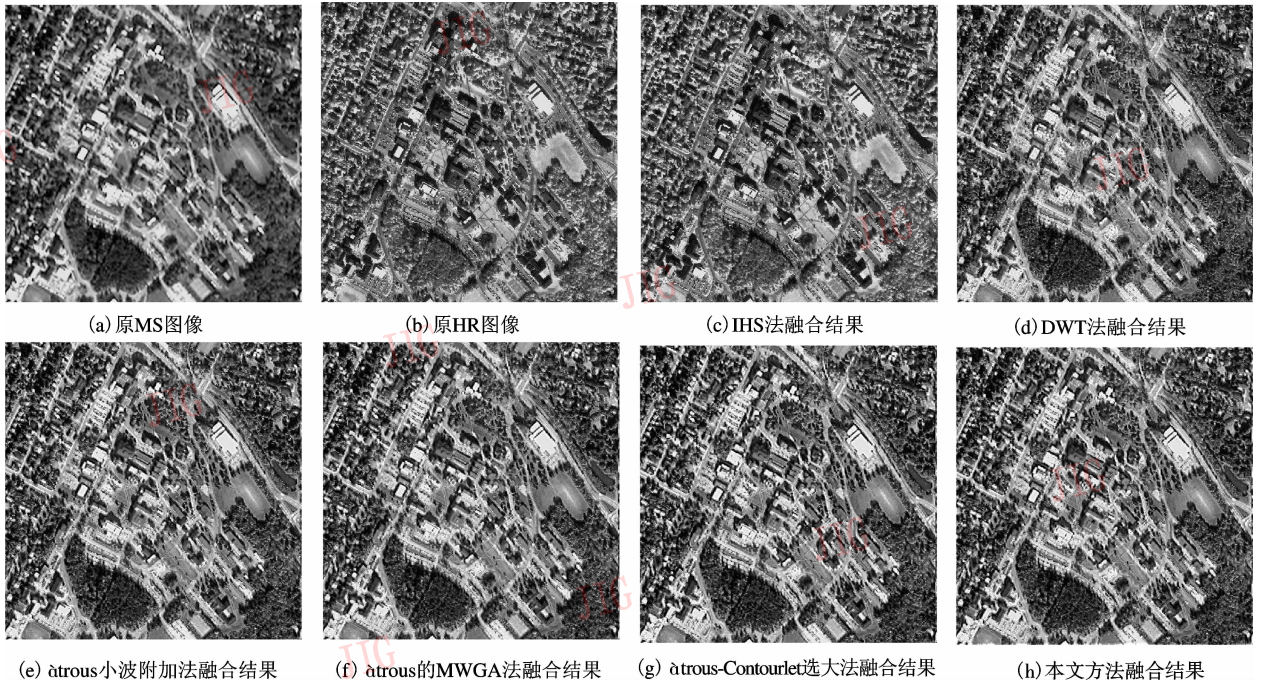


图 3 不同方法的融合结果图像

Fig. 3 Fused image of various methods

表 1 不同方法的性能比较

Tab. 1 Performance comparison of various methods

方法	与原多光谱图像对应的相关系数			光谱扭曲度(%)			空间频率 $F$
	R	G	R	R	G	B	
IHS 法	0.562 2	0.518 5	0.419 4	47.392 7	47.392 7	47.670 0	60.029 1
DWT 法	0.901 6	0.899 2	0.886 2	21.645 8	21.645 8	21.497 3	56.682 8
àtrous 小波的附加法	0.914 4	0.907 0	0.897 1	21.177 3	21.177 3	21.669 9	59.514 2
àtrous 小波的 MWGA 法 ( $\alpha = 0.6$ )	0.918 4	0.911 3	0.902 9	19.537 2	19.537 2	20.031 1	58.759 1
àtrous 小波的 MWGA 法 ( $\alpha = 0.7$ )	0.922 0	0.915 4	0.907 0	19.917 4	19.917 4	20.355 3	59.050 9
àtrous-Contourlet 选大法	0.916 6	0.912 9	0.903 0	21.594 4	21.594 4	22.382 7	59.947 3
本文方法 ( $\alpha = 0.35$ )	0.917 6	0.912 9	0.903 0	21.439 0	21.439 0	21.734 0	59.795 1
本文方法 ( $\alpha = 0.4$ )	0.916 4	0.911 6	0.906 9	21.624 3	21.624 3	21.921 9	60.199 3

(2) 从基于 àtrous 小波的 MWGA 法的融合结果 (图 3(f)) 与直接小波附加法的融合结果 (图 3(e)) 的比较可以看出, WGSa 法由于采用了基于局部窗口邻域窗口的方法, 并充分考虑了邻域窗口内各像素的局部特性与两幅图像窗口内的匹配程度, 从而使得图像的光谱特性得到了很大的提高, 但是由于 àtrous 小波变换不能很好地反映各方向的高频细节信息, 因此其融合结果空间分辨率有所降低。

(3) 从融合结果来看, 本文方法所获得的结果在光谱质量上优于 DWT 法和 àtrous 小波法, 且在空间质量上优于 àtrous 小波 MWGA 法, 这表明本文方

法融合后的图像在光谱质量和空间细节信息方面的表现能力要优于传统的多分辨率分析方法, 且对于同异号问题, 由于采用了不同的加权算法, 从而使得融合结果空间信息得到进一步加强。同时本文方法可以选择不同的阈值, 即可以针对不同的目的选用不同的阈值, 如选用  $\alpha = 0.4$  时, 在获得很好的光谱特性的同时, 其空间质量超过了 HIS 变换法。

## 5 结 论

本文首先将 Contourlet 变换引入图像融合中, 并

将其与  $\hat{a}$ trous 小波变换相结合,充分利用它们的优势,将二者结合起来对图像进行  $\hat{a}$ trous-Contourlet 分解,这种分解后的高频细节具有更好的方向选择性和各向异性;然后对高频部分的融合,提出了一种匹配梯度加权算法。由于梯度可反映图像的细节和纹理信息,同时充分考虑到对应位置的高频系数存在同异号的情况,并针对直接加权进行可能会引起边缘或细节模糊的问题,对不同的情况采用了不同的加权方法,因此 MWGA 方法能更好地进行空间细节增强;最后,基于多光谱图像和空间分辨率图像的特性,将分解后高频细节信息附加到原多光谱图像中,使其能在尽可能保持原多光谱图像信息的前提下增强其空间细节信息。综合以上 3 点对图像进行处理的结果表明,本文所提出的方法相对于其他方法在整体效果尤其是在空间细节增强上,能获得更优的结果。

#### 参考文献 (References)

- 1 Zhang Zhong, Blum R S A categorization and study of multiscale-decomposition-based image fusion scheme with a performance study for a digital camera application [J]. Proceeding of the IEEE, 1999, **87**(8):1315 ~ 1326.
- 2 Santos M, Pajares G, Porteta M, *et al.* New wavelets image fusion strategy [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2003, **2652**: 919 ~ 926.
- 3 Nunez J, Otazu X, Fors O, *et al.* Multiresolution- based image fusion with additive wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 1999, **37**(3):1204 ~ 1211.
- 4 Chen Dipeng, Li Qi, The use of complex contourlet transform on fusion scheme [J]. Transactions on Engineering, Computing and Technology, 2005, **7**(8):342 ~ 347.
- 5 Lian Qiu-sheng, Kong Ling-fu. Construction of Wavelet with Multi-Directional Selectivity [J]. ACTA Electronic Sinica, 2005, **33**(10): 1905 ~ 1909. [练秋生,孔令富.具有多方向选择性的小波构造[J].电子学报,2005,**33**(10):1905 ~ 1909.]
- 6 Jiao Li-cheng, Tan Shan, Development and Prospect of Image Multiscale Geometric Analysis [J]. ACTA Electronic Sinica, 2003, **31**(12A):139 ~ 145. [焦李成,谭山.图像的多尺度几何分析:回顾和展望[J].电子学报,2003,**31**(12A):139 ~ 145.]
- 7 Do Minh N, Vetterli Martin. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, **14**(12): 2091 ~ 2106.
- 8 Li Hui-hui, Guo Lei, Liu Hang. Research on image fusion using wavelet transform based on gradient selective rule [J]. Computer Engineering and Application. 2005, **41**(12):76 ~ 78. [李晖晖,郭雷,刘航.基于梯度选取规则的小波变换在图像融合中的研究[J].计算机工程与应用,2005,**41**(12):76 ~ 78.]
- 9 Chen Shao-hui, Zhang Qiu-wen, Wang Cheng, *et al.* Fusing MODIS and SPOT images based on self-adaptive weighting [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, **11**(3):349 ~ 352. [陈少辉,张秋文,王乘等.基于自适应加权的 MODIS 和 SPOT 影像融合研究[J].中国图象图形学报,2006,**11**(3):349 ~ 352.]