

doi: 10.3788/gzxb20124109.1118

# 结合边缘信息和图像特征信息的曲波域遥感图像融合

路雅宁, 郭雷, 李晖晖

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710129)

**摘要:** 曲波变换是一种更适合于图像处理的多尺度几何分析方法, 具有比小波变换更强的方向选择和辨识能力, 而且对图像边缘的表达更优于小波. 结合色度-饱和度-亮度变换将其应用于合成孔径雷达图像和多光谱图像融合可以更好地表示图像中的有用特征. 首先对多光谱图像进行色度-饱和度-亮度变换, 得到亮度分量  $I$ , 对雷达图像和  $I$  分量进行曲波变换得到粗尺度系数和细节尺度系数; 将雷达图像的粗尺度系数和细节尺度系数进行叠加, 计算归一化的曲波系数直方图, 定义边缘有效因子, 利用合成孔径雷达图像的特征信息将曲波变换系数分为均匀区、非均匀区和亮点目标区. 然后采用相应的融合规则对融合图像的粗尺度系数进行处理, 对细节尺度系数采用简单的直接取大方法, 逆变换后得到新的亮度分量. 用新的亮度分量替代原亮度分量进行逆色度-饱和度-亮度变换得到最终融合结果, 利用统计类指标对融合结果进行评价. 实验结果表明, 该方法在保持光谱信息和提高空间分辨率上都有较好的效果.

**关键词:** 曲波变换; 多尺度几何分析; HSI 变换; 边缘; 图像融合

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)09-1118-6

## 0 引言

多传感器图像融合是指多个传感器采集的关于同一目标或场景的图像数据根据某个算法进行适当的综合处理, 充分利用多个被融合图像中包含的冗余信息和互补信息, 获得更可靠准确的信息, 产生新的满足某种需求的图像.

多光谱 (Multi-Spectral, MS) 数据包含了丰富的地物光谱信息, 但其成像受观测时刻、天气及大气状况等外部条件的影响较大, 而合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 与可见光遥感相比有许多优点: 1) 具有穿透云层和雨区的能力, 不受白昼的限制, 是一种全天候的遥感传感器; 2) SAR 比可见光能更深入地穿入植被, 改变 SAR 的波长可以得到植被上层甚至地下的信息; 由于获取地物波谱特征信息的波段范围及成像方式的不同, SAR 与可见光图像在反映地物电磁波谱特征方面有很大差异. SAR 图像对目标的几何特性反映在图像上常常是非常暗或亮的点或区域, 而可见光图像主要反映了不同地物的轮廓与光谱信息. 因此, 将 SAR 与多光谱图像融合, 可以充分利用其互补信息, 获得地物的多层次特性, 进一步揭示地物的本质特征. 提高某

些地物的分类准确度以及提高遥感解译和信息提取的准确度, 充分发挥两种数据的潜力、效率, 具有重要的意义<sup>[1-2]</sup>.

在针对多光谱图像的融合算法中, 大都是基于多光谱和全色图像提出的<sup>[3-6]</sup>, 而对于多光谱和 SAR 图像的融合算法大多都只考虑了相干斑噪声的影响, 要么直接舍弃 SAR 高频系数的算法<sup>[7]</sup>, 要么对 SAR 图像进行滤波后再融合<sup>[8]</sup>, 或者在滤波后舍弃 SAR 图像的高频分解系数<sup>[9]</sup>, 这些处理方法在抑制相干斑噪声的同时不同程度地损失了 SAR 图像中的有用信息.

本文主要研究的图像融合问题是将 MS 图像进行色度-饱和度-亮度 (Hue-Saturation-Intensity, HSI) 色彩空间变换后的  $I$  分量与空间高分辨率 SAR 图像在曲波 (Curvelet) 域按照一定规则进行融合, 得到具有高空间分辨率的新亮度分量图像, 然后和原 MS 图像的  $H$  分量和  $S$  分量逆 HSI 变换得到同时具有高空间分辨率和光谱信息的融合图像. 本文在分析 SAR 图像目标的基础上, 提出了一种结合 SAR 图像目标特征信息的融合方法, 在融合规则的设计上, 充分考虑 SAR 图像中的亮点目标区域、均匀区域和包含斑点噪声和边缘的非均匀区域, 并在

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60802084) 和西北工业大学基础研究基金 (No. JC20110266) 资助

第一作者: 路雅宁 (1977-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为多传感器图像融合. Email: luyaning816@163.com

导师: 郭雷 (1956-), 男, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为神经计算、图像与视频处理、模式识别等. Email: lguo@nwpu.edu.cn

收稿日期: 2012-04-18; 修回日期: 2012-05-23

此基础上定义了曲波域融合边缘有效因子,使得融合的同时考虑更多的边缘信息.实验结果证明,这种充分考虑融合图像源图像特征的融合方法取得了更好的融合效果.

## 1 曲波变换系数处理

### 1.1 Curvelet 变换

Candes<sup>[10]</sup>等人提出了一种适合分析具有曲线或超平面奇异性高维信号的曲波变换.曲波变换不但和小波一样具有局部时频分析能力,还具有比小波变换更强的方向选择和辨识能力,而且对图像边缘的表达更优于小波.与小波变换相比,Curvelet 变换除了尺度位移参量外,还多了一个方向参量,因此具有更好的方向辨别能力.将 Curvelet 运用到图像去噪<sup>[11]</sup>、增强<sup>[12]</sup>、融合<sup>[13-16]</sup>等方面,均得到了较好的效果.

### 1.2 HSI 变换

在 RGB 空间中,光谱信息与三个坐标 R、G、B 的耦合性较强,R、G、B 中任一分量的改变都会改变光谱信息,在图像处理过程中处理起来困难.为了将高分辨率影像的结构信息叠加到低分辨率多光谱影像中,经典的方法是采用 HSI 变换法.在 HSI 空间中,光谱信息主要体现在色调  $H$  和饱和度  $S$  上,而亮度  $I$  主要反映地物辐射总的能量及其空间分布,即表现为几何特征.从视觉特点上分析,亮度  $I$  的改变对光谱信息影响较小,便于处理.对于高空间分辨率影像和多光谱影像的融合问题,希望在保留光谱信息的前提下,添加高空间分辨率影像的细节信息,因此更适于在 HSI 空间中进行处理<sup>[17]</sup>.

### 1.3 SAR 图像的曲波域系数分析

#### 1.3.1 SAR 图像目标特征<sup>[18]</sup>

一般情况下,地物目标分为点目标、线目标、面目标以及这三者在有限尺度内组合而成的硬目标.这些不同类型的目标在图像上具有不同的表征形式.了解 SAR 图像的信息特征,对于图像处理具有重要的意义.1)点目标:SAR 图像上的点目标,指的是以亮点形式出现在图像上的那些目标.大多数战术目标,如坦克、装甲车、大炮、船只等,以及工业设施,如高压输电铁塔、油井、孤立的小建筑等,都呈现为点目标.2)线目标:线目标指在 SAR 图像中表现为线状(直线或弧线)的目标.它通常表示不同类目标的界线(例如水陆界线)或者当地面线性目标的横向尺寸小于分辨单元尺寸时,表示目标本身.3)面目标:面目标也就是通常所说的分布目标.比如一大块草地或农田;4)硬目标:除了上述各类目标以外,SAR 图像中还有另一类目标,它们不象面目标那样

占有很大面积,也不象点目标那样限制在个别分辨单元之内.大多数人工目标如桥梁、输电线、房屋、油罐等以及在高分辨率 SAR 图像中的战术目标都属于这一类目标.

#### 1.3.2 曲波域 SAR 图像系数处理

Lopes 提出把一个图像分为三类区域:第一类是均匀区域,其中的相干斑噪音可以简单地用均值滤波平滑掉;第二类是不均匀区域,在去除噪音时应保留纹理信息,应用 Lee 滤波;第三类是包含分离点目标的区域,滤波器应尽可能地保留观察值.

SAR 图像经曲波变换后绝对值较大系数的对应于亮度突变处,即原图像中的显著特征(如边缘、区域边界、亮点目标等).借助于增强 Lee 滤波对于 SAR 图像进行分区思想,对于曲波变换后的 SAR 粗尺度系数也采用类似的分区,即利用曲波变换系数将图像也分为均匀区域,点目标区域和包含边缘和噪音的非均匀区.

## 2 结合边缘信息的曲波域图像融合 SAR 与 MS 图像融合

单一的 HSI 变换融合方法往往会带来极大的光谱失真,将 HSI 变换和 Curvelet 变换结合,利用 HSI 变换融合法增强空间细节表现能力以及 Curvelet 变换融合法保留多光谱影像的光谱特性和 SAR 影像的纹理信息优点,则融合的影像在保持光谱信息、提高空间分辨率和增强细节纹理信息三个方面的综合性能将达到较好的平衡.

本文提出了一种结合边缘信息的曲波域的遥感图像融合方法,利用曲波对图像几何特征更优的表达能力有效地提取原始图像的特征,为融合图像提供更多的信息,针对 SAR 图像、MS 图像进行了融合实验.首先对 MS 图像进行 IHS 变换,得到亮度分量  $I$ ,对 SAR 图像和  $I$  分量进行曲波变换得到粗尺度系数和细节尺度系数,利用边缘信息和 SAR 图像的特性对粗尺度系数进行处理,曲波逆变换后得到新的亮度分量  $I_{new}$ ,用  $I_{new}$  替代原亮度分量  $I$  进行逆 HSI 变换得到最终融合结果,采用熵、梯度、空间频率、偏差指数和扭曲程度对融合结果进行评价.实验结果表明,该方法在保持光谱信息和提高空间分辨率上都有较好的结果.

具体融合步骤:

1)对 MS 图像进行 RGB 到 HSI 颜色空间的转换,得到亮度分量  $I$ 、色度  $H$  和饱和度  $S$ ;

2)对  $I$  和 SAR 图像进行曲波变换,分别得到  $C_1$ 、 $C_{SAR}$ 、 $D_1$  和  $D_{SAR}$ ,其中, $C_1$  和  $C_{SAR}$  表示曲波分解的粗尺度系数, $D_1$  和  $D_{SAR}$  表示曲波分解的细节尺度

系数;

3)粗尺度系数融合如下:

①曲波系数的选择取决于该级曲波分解的幅值.对 SAR 图像的曲波变换系数进行叠加.

$$C_{\text{SARnew}} = C_{\text{SAR}} + D_{\text{SAR}} \quad (1)$$

计算叠加系数的归一化直方图.可以看出,归一化的直方图呈现出一个明显的脉冲状且峰值左右基本对称,这样,在峰值附近区域对应于区间 $[u-c \times \sigma, u+c \times \sigma]$ ,由于曲波系数的绝对值较小,边缘信息比较弱,此区间为目标平滑区;在峰值两边对应于区间 $[0, u-c \times \sigma]$ 和 $[u+c \times \sigma, 1]$ ,由于曲波系数的绝对值较大,反映了较强的边缘信息,这两个区间为目标边缘区.其中,点目标包含在区间 $[u+c \times \sigma, 1]$ 中.从直方图分布上可以看出,边缘在图中所占的比例比较小,平滑区所占的比例较大.其中, $u$ 为均值, $\sigma$ 为方差, $c$ 为区间调节因子.实验中取 $c=2$ 时融合图像基本在保持多光谱大部分光谱信息的同时将 SAR 图像的大部分较强边缘保留了下来.

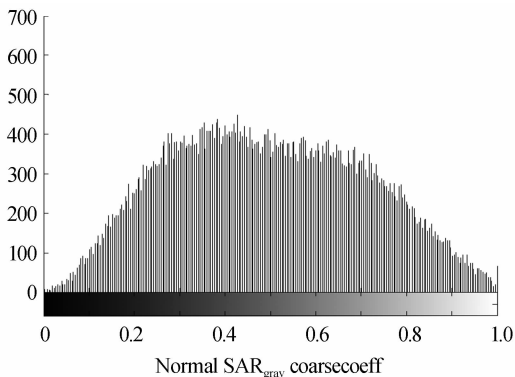
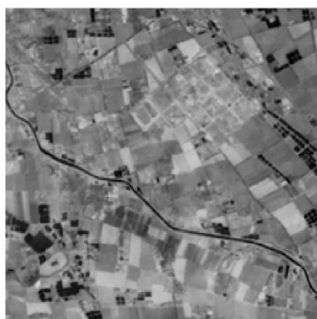


图1 SAR 图像的叠加系数归一化直方图  
Fig.1 The normalized imhist of SAR coefficients

②令  $\text{SAR}_{\text{gray}}(i, j)$  为 SAR 图像在  $(i, j)$  处的灰度值,  $\text{MS}_{\text{gray}}(i, j)$  为多光谱图像对应的灰度图像在  $(i, j)$  处的灰度值.令  $Y$  为边缘有效因子,定义为

$$Y(i, j) = \begin{cases} \text{SAR}_{\text{gray}} / \text{MS}_{\text{gray}} & \text{MS}_{\text{gray}} \neq 0 \\ 0 & \text{MS}_{\text{gray}} = 0 \end{cases} \quad (2)$$



(a) Mimage



(b) SARimage



(c) Curvelet( $C_{\text{max}}, D_{\text{max}}$ )



(d) Curvelet( $C_{\text{mean}}, D_{\text{max}}$ )

③融合后的粗尺度系数按照如下规则选取

$$C_{\text{new}} = \begin{cases} C_1 & C_{\text{SARnew}} \in [u-c \times \sigma, u+c \times \sigma] \\ C_1 \times Y & C_{\text{SARnew}} \in [0, u-c \times \sigma] \\ C_{\text{SARnew}} & C_{\text{SARnew}} \in [u+c \times \sigma, 1] \end{cases} \quad (3)$$

4)细节尺度融合规则

在源图像中,明显的图像特征,如直线、曲线、轮廓和区域等,往往表现为灰度值及其变化,而在 Curvelet 域表现为变换系数的模值大小.尤其是图像的边缘等细节特征在 Curvelet 域中表现为一些少数“模值”较大的细节 Curvelet 系数,或者说, Curvelet 域中模值较大的细节系数包含了更多的边缘等纹理信息.所以,对于细节尺度系数采用简单的模值取大;记为  $D_{\text{max}}$ ,即  $D_{\text{new}} = \max(D_1, D_{\text{SAR}})$ ;

5)对于  $C_{\text{new}}$  和  $D_{\text{new}}$  进行曲波逆变换,得到  $I_{\text{new}}$ ;

6)用  $I_{\text{new}}$  代替  $I$  分量,同  $H$ 、 $S$  分量一起进行 HSI 逆变换得到融合影像.

### 3 融合实验与结果分析

实验数据采用 1994 年北京地区 JERS1-SAR 图像(L 波段,HH 极化方式)和 TM 多光谱图像(由 3、4、5 波段组成),如图 2(a)和(b)所示,融合在保持 MS 图像多光谱信息的基础上加入高分辨率 SAR 图像中的重要目标信息.

为方便对比,同时也对曲波域其他融合算法进行了实验,Curvelet 变换融合采用分解 2 层.由于融合实验主要是对粗尺度系数的处理,为了说明算法的有效性,对于曲波域其他几种算法的细节尺度系数采用相同的融合规则,即细节尺度分解系数采用直接取最大的融合规则.图 2(c)为文献[13]中的方法,对粗尺度和细节尺度均取大(Curvelet( $C_{\text{max}}, D_{\text{max}}$ ));图 2(d)为文献[14]中的方法,粗尺度取平均,细节尺度取大(Curvelet( $C_{\text{mean}}, D_{\text{max}}$ )).文献[13-14]方法均为直接在曲波域对系数直接处理得到融合结果.图 2(e)和(f)为文献[15-16]结合

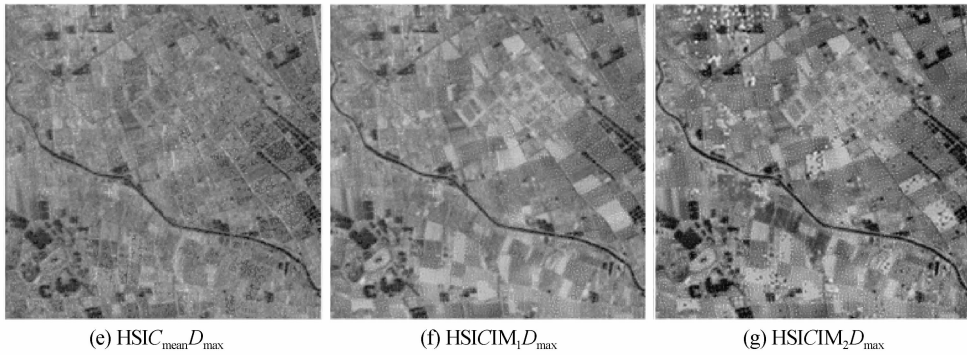


图2 不同方法的融合结果

Fig. 2 Fused image of different methods

HSI的曲波域融合方法.文献[15]为直接对  $I$  分量与 SAR 曲波变换后粗尺度平均细节尺度取大 ( $HSIC_{\text{mean}} D_{\text{max}}$ );文献[16]算法也是基于 HSI 变换对  $I$  分量进行亮度调制(Intensity Modulation, IM)的方法,为与本文算法区别,记为粗尺度调制方法 1 ( $IM_1$ ),本文算法记为调制方法 2 ( $IM_2$ ),分别用  $HSICIM_1 D_{\text{max}}$  和  $HSICIM_2 D_{\text{max}}$  表示.本文算法  $HSIIM_2 D_{\text{max}}$  如图 2(g),实验结果如图 2(c)~(g).

对比分析融合前的 MS 图像和 SAR 图像以及融合图像可以看出,融合后的图像信息量都有所增加,集中了图像的信息优势,使得融合后的图像既保持了 MS 图像的多光谱信息,又不同程度地加入了 SAR 图像中的细节信息,目视效果上不仅具有光谱特性,而且有助于 SAR 图像中亮点目标的识别.

从目视效果来看,直接进行系数处理的融合方法(图 2(c)和(d))光谱扭曲较为严重,丢失了原多光谱图像的大量信息;曲波粗尺度直接取大的方法对于整体较亮的 SAR 图像来说也是不适合的,曲波粗尺度采用平均的方法(Curvelet( $C_{\text{mean}} D_{\text{max}}$ ),图 2(d))不适合光谱差异较大的图像融合;结合 HSI 变换的三种方法都较好地保持了光谱信息.其中,对比原多光谱图像左下角部分可以看出,  $HSIC_{\text{mean}} D_{\text{max}}$  方法(图 2(e))和  $HSICIM_1 D_{\text{max}}$  方法(图 2(f))的融合结果在该部分颜色偏亮,出现了一定程度的光谱扭曲;本文方法目视效果最好,在使目标清晰可见的基础上较好地保持了原多光谱图像的光谱特征.

对于遥感图像融合效果的评价,应综合考虑空间细节信息的增强与光谱信息的保持.所以,一般应综合利用两类统计参量来进行分析与评价:一类反映空间细节信息,如标准差、信息熵和清晰度;另一类反映光谱信息,如扭曲程度、偏差指数与相关系数.本文采用熵、平均梯度、空间频率、扭曲程度来进行融合结果的客观评价.

#### 1) 熵

图像熵定义为

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \cdot \log_2(p_i) \quad (4)$$

熵是衡量图像信息丰富程度的一个重要指标,融合图像的熵值的大小表示图像所包含的平均信息量的多少.信息熵越大,图像所含的信息越丰富,融合质量越好.

#### 2) 平均梯度

平均梯度反映了图像中的微小细节反差表达能力和纹理变化特征,同时也反映了图像的清晰度.平均梯度越大表明清晰度越好.定义为

$$\nabla \bar{g} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{(\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2) / 2} \quad (5)$$

式中  $\Delta I_x$ 、 $\Delta I_y$  分别为像素在  $X$ 、 $Y$  方向上的一阶差分;  $g$  越大,图像越清晰.

#### 3) 空间频率(Space Frequency)

图像的行频率为

$$RF = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [F(i, j) - F(i, j-1)]^2} \quad (6)$$

列频率为

$$CF = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [F(i, j) - F(i-1, j)]^2} \quad (7)$$

则图像的空间频率为

$$SF = \sqrt{RF^2 + CF^2} \quad (8)$$

空间频率反映了一幅图像空间域的总体活跃程度.

#### 4) 扭曲程度(Degree of Distortion)

光谱扭曲度能够客观地反映融合图像相对于 MS 图像的光谱信息丢失情况,直接反映了融合图像的失真程度,值越小说明融合图像越多保留了 MS 图像中的光谱信息,产生的光谱畸变越小.

$$DD = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{|I_F(i, j) - I(i, j)|}{M \times N} \quad (9)$$

式中  $I_F(i, j)$ 、 $I(i, j)$  分别为融合后和原始图像上  $(i, j)$  点的灰度值.扭曲程度越小,表明图像的失真程度越小.

综上,融合结果的熵、平均梯度、空间频率这三

个指标参量值越大越好,扭曲程度则越小越好.

表 1 中列出了各融合算法的熵、梯度、空间频率、扭曲度评价参量值,各参量所表示的含义如前所

示.为了区分,各项指标的最佳值用粗体标出.可以得出以下结论:

表 1 不同融合方法性能比较  
Table 1 Performance of different fusion methods

	Entropy	Grad	SF	Degree of distortion	Time/s
MS image	7.827 6	9.44	22.12		
SAR image	7.729 3	19.398	45.75 6		
Curvelet( $C_{\max} D_{\max}$ )	7.360 6	14.796 8	33.083 8	35.715 5	2.965
Curvelet( $C_{\text{mean}} D_{\max}$ )	7.375 0	12.773 4	29.773 9	31.082 5	3.008
Curvelet( $HSIC_{\max} D_{\max}$ )	7.729 3	13.244 6	30.158 1	0.076 5	1.544
Curvelet( $HSICIM_1 D_{\max}$ )	7.819 6	13.749 4	31.219 3	0.048 5	<b>1.381</b>
Curvelet( $HSICIM_2 D_{\max}$ )	<b>7.828 6</b>	<b>15.619 0</b>	<b>36.369 5</b>	<b>0.039 3</b>	4.531

1)直接系数处理的融合方法与结合 HSI 变换融合方法的熵、梯度和空间频率相比:结合 HSI 变换的融合图像的熵、梯度和空间频率值都有提高,图像清晰度增强,说明 Curvelet 域结合 HSI 变换的融合方法在空间信息保持上优于直接系数处理的融合方法;

2)直接系数处理的融合方法与结合 HSI 变换融合方法的扭曲度相比:结合 HSI 变换的三种方法的扭曲度大大降低,说明 Curvelet 域结合 HSI 变换的融合方法在光谱保持能力上远远优于直接系数处理的融合方法.

3)本文提出的结合边缘信息和 SAR 图像特征信息的曲波域融合方法得到的融合图像的熵、梯度和空间频率值都最大,说明融合图像损失的相关信息最少;得到的光谱扭曲度值最小扭曲度低,光谱相似性程度最高,说明本文方法在光谱信息保持和空间细节保持能力上都优于其他曲波域融合方法.

## 4 结论

SAR 图像与 MS 图像由于成像方式以及接受波段不同,对地物的特征描述存在很大的差异,将 SAR 与 MS 图像融合,可以更好地利用互补信息,使得融合图像在保持 MS 图像光谱特征的基础上增加了 SAR 图像的目标信息和细节特征信息,增强了融合图像的目标识别能力.曲波变换作为一种新的图像多尺度几何分析的有力工具,在图像的融合应用上显示出了良好的特征提取和跟踪能力.本文提出了一种结合边缘信息和 SAR 图像特征的遥感图像融合方法,定义了边缘有效因子对 SAR 图像进行了分区,利用边缘信息和系数统计信息对 MS 图像  $I$  分量和 SAR 图像曲波变换的粗尺度系数进行处理,重构得到了融合图像.实验结果表明,结合边缘信息和 SAR 图像特征的遥感图像融合方法用于

SAR 图像和 MS 图像的融合是有效的,融合结果在保持光谱信息的同时提高了空间分辨率.但是融合方法没有详细区分曲波域 SAR 图像分解系数中的噪音和信号,只是将非均匀区(包含信号边缘和相干斑噪音)做了同样的处理,而在融合的同时区分边缘、减少噪音干扰是一个值得研究的问题.

## 参考文献

- [1] CHEN Dong, LI Biao, SHEN Zhen-kang. Research on a data fusion algorithm of SAR and optical images [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, **22**(9): 5-8.  
陈东,李彪,沈振康. SAR 与可见光图像融合算法的研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2000, **22**(9): 5-8.
- [2] LEI Lin, WANG Zhuang, SU Yi. Fusion of target detection in high-resolution SAR and optical imagery [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, **29**(6): 844-847.  
雷琳,王壮,粟毅. 高分辨率 SAR 与光学图像中目标融合检测方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, **29**(6): 844-847.
- [3] 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.
- [4] DI Hong-wei, CHEN Mu-sheng. A new adaptive fusion method of multispectral image and panchromatic image [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 452-454.  
狄红卫,陈木生. 一种自适应的多光谱图像与全光图像融合新方法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3): 452-454.
- [5] HONG Ri-chang, WU Xin-qing, YUAN Xun. Fusion of multispectral and panchromatic images based on biorthogonal multi-wavelet transform [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2007, **12**(4): 684-690.  
洪日昌,吴秀清,袁勋. 基于双正交多小波变换的多光谱与全色图像融合研究[J]. *中国图象图形学报*, 2007, **12**(4): 684-690.
- [6] SHI Hai-liang, FANG Min, LIANG Jin-jin. Fusion of multispectral and panchromatic satellite images based on nonsubsampling contourlet transform and stationary wavelet transform [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, **31**(1): 124-128.  
时海亮,方敏,梁锦锦. 基于非亚采样 Contourlet 和 SWT 的多光谱图像和全色图像的融合算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, **31**(1): 124-128.
- [7] LI Wei-bin, ZHANG Shun-li, XIE Zheng-long, et al. Application of SAR image fusion based on wavelet and

- directional template[J]. *Application Research of Computers*, 2007, **24**(3): 280-282.
- 李卫斌,张顺利,解争龙,等. 基于小波分析与方向模板的 SAR 图像融合技术研究[J]. 计算机应用研究, 2007, **24**(3): 280-282.
- [8] DENG Lei, LI Jing, NIE Juan, *et al.* A method fusing SAR with multispectral image and reducing speckle noise [J]. *Journal of Natural and Disasters*, 2008, **17**(6): 87-90.
- 邓磊,李京,聂娟,等. 抑制斑点噪声的 SAR 与多光谱图像融合方法[J]. 自然灾害学报, 2008, **17**(6): 87-90.
- [9] SONG Jian-she, ZHENG Yong-an, LIU Ying-chun. Image fusion algorithm of SAR and optical images based on wavelet transform[J]. *Application Research of Computers*, 2004, **10**: 110-111.
- 宋建社,郑永安,刘迎春. 基于小波变换的 SAR 与可见光图像融合算法[J]. 计算机应用研究, 2004, **10**: 110-111.
- [10] CANDÉS E J, DEMANET L, DONOHO D L, *et al.* Fast discrete curvelet transforms, applied and computational mathematics [M]. California: California Institute of Technology, 2005.
- [11] STARCK J L, CANDÉS E J, DONOHO D L. The curvelet transform for image denoising [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(6): 670-684.
- [12] LI Lin. SAR image enhancement algorithm based on curvelet transform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, **27**(6): 2134-2135.
- 李林. 基于 Curvelet 变换的 SAR 图像增强 [J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(6): 2134-2135.
- [13] LI Hui-hui, GUO Lei, LIU Kun. Remote sensing image fusion based on curvelet transform [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(3): 400-403.
- 李晖晖,郭雷,刘坤. 基于曲波变换的遥感图像融合研究 [J]. 光电子 • 激光, 2008, **19**(3): 400-403.
- [14] ZHANG Qiang, GUO Bao-long. Fusion of multisensor images based on curvelet transform [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(9): 1123-1127.
- 张强,郭宝龙. 一种基于 Curvelet 变换的多传感器图像融合算法 [J]. 光电子 • 激光, 2006, **17**(9): 1123-1127.
- [15] XU Xing, LI Ying, SUN Jin-qiu, *et al.* An algorithm for image fusion based on curvelet transform [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2008, **26**(3): 395-398.
- 许星,李映,孙瑾秋,等. 基于 Curvelet 变换的 SAR 与 TM 图像融合研究 [J]. 西北工业大学学报, 2008, **26**(3): 395-398.
- [16] JIANG Nian-de, WANG Yao-nan, MAO Jian-xu. Using the second generation curvelet to improve IHS transform merge remote sensing images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, **13**(12): 2376-2382.
- 蒋年德,王耀南,毛建旭. 基于 2 代 Curvelet 改进 IHS 变换的遥感图像融合 [J]. 中国图象图形学报, 2008, **13**(12): 2376-2382.
- [17] YANG Xu-hong, JING Zhong-liang, LI Jian-xun. New fusion approach using local statistical characteristics and colorspace transform for remote-sensing images [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, **27**(4): 627-631.
- 杨旭红,敬忠良,李建勋. 基于局部统计特性和 IHS 变换的遥感影像融合 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, **27**(4): 627-631.
- [18] XUE Xiao-rong. Research on sar image processing [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- 薛笑荣. SAR 图像处理技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2004.

## Remote Sensing Image Fusion Using Edge Information and Features of SAR Image Based on Curvelet Transform

LU Ya-ning, GUO Lei, LI Hui-hui

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** Curvelet transform, as a method of multiscale geometric analysis, is more suitable for image processing than wavelet, and more appropriate for analyzing the image edge characteristics of curve and line, which has better approximation precision and sparsity description. In this paper, the methods of integrating SAR image and MS image are proposed based on curvelet transform. SAR image and I image, which is given by a linear HSI transform are given by curvelet transform to obtain coarse coefficients and detail coefficients. The new coarse coefficients are obtained by using edge information and features of SAR image. The detail coefficients are dealt with traditional method that gets max of detail coefficients both I and SAR image. Then, the inverse curvelet transform gets the new intensity I image. Finally degree of distortion and space frequency are used to evaluate the result. The results of experiment indicate that the method excels those of based on HSI or curvelet transform in preserving spectral information and enhancing resolution.

**Key words:** Curvelet transform; Multiscale Geometric Analysis(MGA); HSI transform; Edge; SAR image fusion