

# 一种基于非采样 Contourlet 变换的遥感图像融合算法

杨立新 杨建坤 贾辉 祁俊力 黄红锡

(国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 为使融合后的多光谱图像尽可能保持原多光谱图像光谱特性的同时提高空间质量,提出了一种基于非采样 Contourlet 变换(NSCT)和多尺度边缘检测的融合算法。介绍了非采样 Contourlet 变换和多尺度边缘检测;设计了基于多尺度边缘检测、直接替代的高频、低频子带融合规则;用 QuickBird 卫星高分辨率遥感图像进行仿真实验。实验结果表明该算法能够在保持光谱信息的同时注入更丰富的空间细节信息,优于传统的 Wavelet 变换法和 Contourlet 变换法。

**关键词** 图像处理;非采样 Contourlet 变换;IHS 变换;多尺度边缘检测;LOG 算子

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s109005

## Remote Sensing Images Fusion Algorithm Based on the Nonsampled Contourlet Transform

Yang Lixin Yang Jiankun Jia Hui Qi Junli Huang Hongxi

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** In order to make the fused multispectral (MS) image keep the spectrum information of the original multispectral image as much as possible and improve the spatial resolution effectively, a novel image fusion algorithm based on the nonsampled contourlet transform (NSCT) and the multiresolution edge detection is proposed. The advantages of NSCT and multiresolution edge detection are presented; The fusion rules of the high and low frequency subbands respectively based on multiresolution edge detection and direct substitution are devised; The QuickBird images have been fused with this new method. The simulation experimental results demonstrate that the method proposed could keep the spectral information and improve spatial resolution simultaneously, and work better than traditional wavelet and contourlet transform.

**Key words** image processing; nonsampled contourlet transform; IHS transform; multiresolution edge detection; LOG operator

**OCIS codes** 350.2660; 110.4234; 350.6980; 110.3000

## 1 引言

在遥感应应用中,多光谱(MS)图像具有较高的光谱分辨率,但其空间分辨率一般较低;相反,全色(PAN)图像具有相对较高的空间分辨率,但其光谱分辨率较低。因此将 MS 图像与 PAN 图像融合,从而获得高质量的 MS 图像是当前遥感图像处理领

域里的研究热点<sup>[1~6]</sup>。

目前融合方法包括基于亮度-色调-饱和度(IHS)彩色空间变换、基于主成份分析(PCA)以及基于 Wavelet 变换的图像融合算法,这些方法能够很好地保留全色图像的空间细节信息,但容易引入较严重的光谱扭曲。而且 Wavelet 变换无法精确地

收稿日期: 2012-01-01; 收到修改稿日期: 2012-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(61107005)和国防科技大学预研基金(JC09-02-12)资助课题。

作者简介: 杨立新(1988—),男,硕士研究生,主要从事光信息处理、图像处理等方面的研究。

E-mail: yangxiaobinglixin@163.com

导师简介: 杨建坤(1966—),男,博士,教授,主要从事信息光学和光电检测等方面的研究。

E-mail: jkyang@nudt.edu.cn

表达图像边缘的方向,也不能“最优”表示含“线”或者“面”奇异的二维图像。根据生理学家对人类视觉系统研究结果和自然图像统计模型,一种最优的图像表示方法应该具有多分辨率、多方向性和局域性等特征。为解决 Wavelet 变换的局限性, M. N. Do 等<sup>[7]</sup>提出了一种“真正”的二维图像稀疏表达方法——Contourlet 变换,但其缺乏平移不变性,从而导致伪 Gibbs 现象。A. L. Cunha 等<sup>[8]</sup>又提出了非采样 Contourlet 变换(NSCT)。另外,相比单一尺度边缘检测,多尺度边缘检测<sup>[9]</sup>不仅对噪声具有较强的抑制作用,而且边缘检测更准确,减少了伪边缘。

为获得性能更高的融合图像,本文将 NSCT 和多尺度边缘检测应用到图像融合领域,提出了一种基于 NSCT 和多尺度边缘检测的遥感图像融合算法。实验表明,该算法在主客观性能评价上都获得了较大提高。

## 2 非采样 Contourlet 变换

非采样 Contourlet 变换分为非采样金字塔(NSP)分解和非采样方向滤波器组(NSDFB)分解两个部分。非采样 Contourlet 变换首先采用非采样金字塔分解来获得图像的多尺度分解,使得 NSCT 具备多尺度性,然后采用非采样方向滤波器组对得到的各尺度子带图像进行方向分解,使得 NSCT 具备多方向性,二者结合得到不同尺度不同方向的子带图像。NSCT 变换滤波器组如图 1 所示。

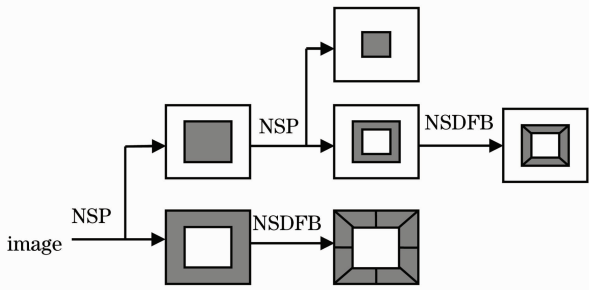


图 1 NSCT 滤波器组

Fig. 1 Structure of NSCT filter set

NSCT 变换不仅具有多尺度、多方向以及良好的空域和频域局部特性,而且变换后的能量更加集中,能更好地捕捉和跟踪图像中重要的纹理细节、几何特征。由于 NSCT 在图像的分解与重构过程中取消了下采样和上采样环节,而只对滤波器进行采样,使得 NSCT 具有平移不变性以及得到的各级子带图像与源图像具有尺寸相同的特点,在融合过程中能有效减小配准误差对融合结果的影响,且容易找到各子带图像之间的对应关系,从而有利于融合运算的实现。

## 3 基于 NSCT 和多尺度边缘检测的融合算法

### 3.1 高、低频子带融合

多尺度图像融合的关键在于设计合理的融合规则,并对分解后的各尺度子带进行有效的融合。

待融合图像 A 和 B 进行 NSCT 分解后得到的各尺度各方向高频子带  $H_A^{l,k}$  和  $H_B^{l,k}$  ( $l, k$  代表不同的尺度和方向),有效地表示了遥感图像中纹理特征等细节。然而图像噪声也多为高频信号,同时噪声的分布和方差等信息也是未知的,往往对图像融合产生重大影响。为使融合图像质量更高,本文设计了基于多尺度边缘检测的融合规则。

1) 用 Canny 算子对 A、B 的低频子带  $L_A, L_B$  进行边缘检测,得到低频边缘图像  $edge_{L_A}, edge_{L_B}$ ;

2) 利用小尺度 LOG 算子可以精确定位边缘信息,大尺度 LOG 算子对噪声滤波效果好的特点,采用不同尺度 LOG 算子对  $H_A^{l,k}, H_B^{l,k}$  进行边缘检测,分别得到边缘图像  $W_A^{l,k}, W_B^{l,k}$ ,也即二值逻辑图;

3) 将全零图像作为低频子带,以  $W_A^{l,k}, W_B^{l,k}$  作为各尺度各方向高频子带,进行 NSCT 逆变换,分别得到高频边缘图像  $edge_{H_A}, edge_{H_B}$ ;

4)  $edge_{L_A}, edge_{L_B}$  分别与  $edge_{H_A}, edge_{H_B}$  进行“与”运算,得到 A、B 的边缘图像  $edge_A, edge_B$ ,以此来指导高频子带的融合。

由以上分析,基于多尺度边缘检测的高频子带融合规则可描述如下:

$$H_{new}^{l,k}(i, j) = \begin{cases} H_B^{l,k}(i, j) & edge_A(i, j) = 1 \text{ and } edge_B(i, j) = 1 \\ H_A^{l,k}(i, j) & edge_A(i, j) = 1 \text{ and } edge_B(i, j) = 0 \\ H_B^{l,k}(i, j) & edge_A(i, j) = 0 \text{ and } edge_B(i, j) = 1 \\ \frac{1}{2}H_A^{l,k}(i, j) + \frac{1}{2}H_B^{l,k}(i, j) & edge_A(i, j) = 0 \text{ and } edge_B(i, j) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $H_{new}^{l,k}(i,j)$  为融合图像的高频子带在  $(i,j)$  处的像素值,  $edge_A(i,j)$ 、 $edge_B(i,j)$  为  $edge_A$ 、 $edge_B$  在  $(i,j)$  处的逻辑值。

NSCT 分解后得到的低频部分集中了图像的大部分轮廓信息,为保持 PAN 图像的光谱信息,本文算法中直接将图像 A 的低频子带  $L_A$  作为融合图像的低频子带  $L_{I_{new}}$ ,即

$$L_{I_{new}} = L_A. \quad (2)$$

### 3.2 融合算法步骤

对于已获取的经过预处理和精确配准的同一场景的 MS 图像和 PAN 图像,本文融合算法步骤如下:

1) 将 MS 图像的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三个波段转换到 IHS 空间,得到  $I$ 、 $H$ 、 $S$  三个分量,依  $I$  分量(待融合图像 A)对 PAN 图像做直方图匹配,得到待融合图像 B;

2) 分别对图像 A、B 进行 NSCT 变换,得到各自的高频和低频子带;

3) 分别对 A、B 进行基于 NSCT 的多尺度边缘检测,得到各自的边缘图像  $edge_A$ 、 $edge_B$ ;

4) 各尺度各方向高、低频子带分别按(1)式和(2)式进行融合,得到融合后的高、低频子带;

5) 对融合后高、低频子带进行 NSCT 逆变换(即图像重构),得到新的亮度分量  $I_{new}$ ;

6) 将  $I_{new}$  并同原来的  $H$ 、 $S$  分量一起转换到 RGB 空间,得到融合后的高分辨率 MS 图像。

## 4 仿真实验与结果分析

为验证本文所提算法的有效性和优越性,采用了 QuickBird 卫星高分辨率遥感图像进行仿真实验。图像为配准的同一场景的 MS 图像和 PAN 图像,空间分辨率分别为 2.4 m 和 0.6 m,经预处理尺寸同为  $512 \times 512$ 。为了更好地进行对比,分别采用四种方法进行融合实验:1) IHS 变换法;2) IHS 变换与小波变换相结合法;3) IHS 变换与 Contourlet 变换相结合法;4) 本文提出算法。

图 2 显示了不同方法得到的融合图像,图 3 为不同融合图像的局部放大对比。从视觉效果上可发现,融合图像一最清晰,但从左上角看出其光谱扭曲也是最严重的;融合图像二通过放大可看出,边缘出现了方块现象;融合图像三边缘细节已较模糊,且出现了虚假边缘,这是因为 Contourlet 变换缺乏平移不变性,在融合图像中出现了伪 Gibbs 现象。相比之下,本文算法得到的融合图像,比原 MS 图像清晰度有较大提高,光谱扭曲小,色彩变化不明显,且空间细节信息较丰富,边缘等已较清晰。

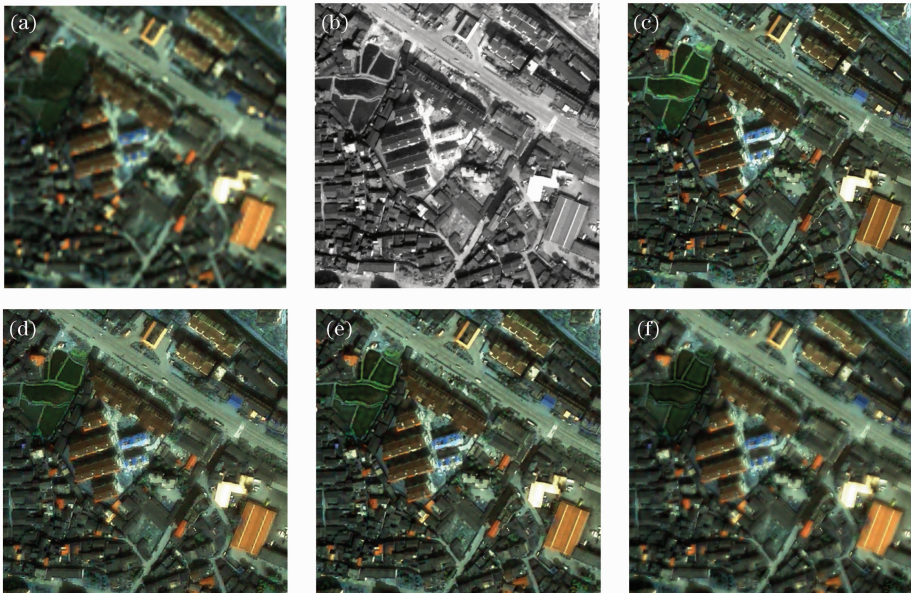


图 2 原始图像与融合图像。(a) 原始多光谱图像;(b) 原始全色图像;(c) 融合图像 1; (d) 融合图像 2; (e) 融合图像 3; (f) 融合图像 4

Fig. 2 Original images and the fused images. (a) MS image; (b) PAN image; (c) fused image. 1; (d) fused image. 2; (e) fused image. 3; (f) fused image. 4

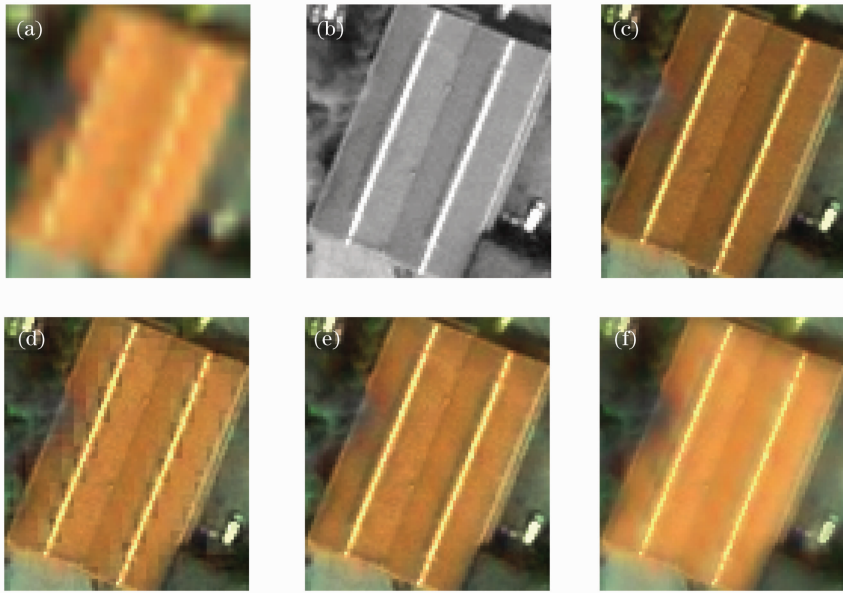


图 3 融合图像局部放大图。(a),(b),(c),(d),(e),(f)分别为图 2(a),(b),(c),(d),(e),(f)的局部放大图  
 Fig. 3 Locally enlarged fused images. (a), (b), (c), (d), (e) and (f) corresponding locally enlarged images of Fig. 2(a), (b), (c), (d), (e) and (f) respectively

客观评价方面,本文采用反映图像空间细节信息的信息熵和平均梯度,反映光谱信息变化的扭曲程度,偏差指数和相关系数作为客观评价指标<sup>[10]</sup>对融合图像进行比较。表 1、2 给出了不同融合图像的评价指标的计算结果。从表中可以看出,本文提出的算法融合图像信息熵较大,平均梯度比原 MS 图

像有所提高,注入了较多空间细节信息。融合图像 1 平均梯度最大,但光谱扭曲最严重,融合图像 2、3 平均梯度大的原因是由于缺乏平移不变性,从而引入了方块现象和虚假边缘信息。本文提出算法的融合图像光谱信息保持最好,扭曲程度最小,与原图像保持了很高的相关性,与视觉效果得出的结论一致。

表 1 融合图像比较一

Table 1 Comparison No. 1 of various fused images

Image data		Entropy			Average gradient		
Band	R	G	B	R	G	B	
MS image	6.0001	6.0545	6.0694	2.3364	2.5573	2.0409	
Fused image. 1	7.2013	7.3165	7.1802	5.1998	5.8703	4.7254	
Fused image. 2	7.2422	7.3488	7.1492	5.1656	5.8745	4.6688	
Fused image. 3	7.2626	7.3536	7.1641	5.1592	5.8430	4.6709	
Fused image. 4	7.3147	7.4240	7.1476	3.5315	3.9992	3.1486	

表 2 融合图像比较二

Table. 2 Comparison No. 2 of various fused images

Image data		Degree of distortion			Correlation coefficient		
Band	R	G	B	R	G	B	
Fused image. 1	19.4998	22.0683	16.8901	0.8130	0.7971	0.8373	
Fused image. 2	13.1640	15.0208	11.4849	0.9090	0.8939	0.9101	
Fused image. 3	14.9657	17.0463	13.1337	0.8880	0.8719	0.8893	
Fused image. 4	6.7749	7.8551	5.9981	0.9741	0.9672	0.9711	

## 5 结 论

针对 MS 图像与 PAN 图像,本文将 NSCT 应

用到图像融合领域,根据 NSCT 分解后得到高低频特征,利用多尺度边缘检测和 LOG 边缘检测算子,

设计有效的融合规则,提出了一种多尺度遥感图像融合算法。仿真实验结果表明,该算法相对于传统的 Wavelet 变换、Contourlet 变换等图像融合方法取得了更好的视觉效果和融合性能,能够在保持 MS 图像光谱信息的前提下,注入更丰富的空间细节信息,获得了更高性能的融合图像。

### 参 考 文 献

- 1 Guo Qing, Liu Shutian. Performance analysis of multi-spectral and panchromatic image fusion techniques based on two wavelet discrete approaches[J]. *Optik*, 2011, **122**(9): 811~819
- 2 Li Shutao, Yang Bin, Hu Jianwen. Performance comparison of different multi-resolution transforms for image fusion [J]. *Information Fusion*, 2011, **12**(2): 74~84
- 3 Dou Wen, Sun Hongquan, Chen Yunhao. Comparison among remotely sensed image fusion methods based on spectral response function[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, **31**(3): 746~752
- 4 A. G. Mahyari, M. Yazdi. Panchromatic and multispectral image fusion based on maximization of both spectral and spatial

- similarities[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(6): 1976~1985
- 5 K. Yonghyun, L. Changno, H. Dongyeob. Improved additive-wavelet image fusion [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, **8**(2): 263~267
- 6 J. F. Reinoso. Pan-sharpening of QuickBird satellite images using multiresolution techniques: wavelets, contourlets, and curvelets[J]. *Imaging Science Journal*, 2010, **58**(3): 125~135
- 7 M. N. Do, M. Vetterli. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2005, **14**(12): 2091~2106
- 8 A. L. da Cunha, J. P. Zhou, M. N. Do. The nonsubsampling contourlet transform: theory design and applications[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 2006, **15**(10): 3089~3101
- 9 Xiao Yihan, Xi Zhihong, Hai Tao. Image edge detection based on nonsubsampling Contourlet transform[J]. *Systems Engineer and Electronics*, 2011, **33**(7): 1668~1672
- 肖易寒, 席志红, 海 涛. 基于非下采样 Contourlet 变换的图像边缘检测新方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2011, **33**(7): 1668~1672
- 10 Guo Lei, Li Huihui, Bao Yongsheng. Image Fusion [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 230~234
- 郭 雷, 李晖晖, 鲍永生. 图像融合[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 230~234

栏目编辑: 马 沂