

文章编号:1007-2780(2013)03-0429-06

基于非下采样轮廓波变换的全色图像与 多光谱图像融合方法研究

傅 瑶, 孙雪晨, 薛旭成, 韩诚山, 赵运隆, 曲利新

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: yao.fu.felicity@gmail.com)

摘 要: 为了同时改善遥感图像的空间分辨率和光谱分辨率, 提高遥感图像信息量, 提出了一种基于非下采样轮廓波变换的全色图像与多光谱图像的融合方法。首先, 对多光谱图像进行 HIS 变换, 获取其亮度分量; 分别对多光谱图像的亮度分量和全色图像进行非下采样轮廓波变换, 获取其高低频系数; 采用脉冲耦合神经网络算法和加权融合对高低频系数进行选取; 最后, 经过逆 HIS 变换和逆非下采样轮廓波变换获得最终融合后图像。实验结果表明, 本文融合方法处理后遥感图像的光谱失真少, 信息量和清晰度都优于其他传统遥感图像融合方法。

关 键 词: 图像融合; 非下采样轮廓波变换; 脉冲耦合神经网络

中图分类号: TP951.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20132803.0429

Panchromatic and Multispectral Image Fusion Method Based on Nonsubsampled Contourlet Transform

FU Yao, SUN Xue-chen, XUE Xu-cheng,

HAN Cheng-shan, ZHAO Yun-long, QU Li-xin,

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China, E-mail: yao.fu.felicity@gmail.com)

Abstract: A novel panchromatic and multi-spectral image fusion method based on non-sub-sampled Contourlet Transform (NSCT) was proposed for the purpose of improving spatial and spectral resolution of remote sensing images. Firstly, HIS transformation was applied in multi-spectral image for getting its intensity component. Then, NSCT was used both in the intensity component of multi-spectral image and panchromatic image in order that the high frequency and low frequency coefficients were acquired. Furthermore, pulse-coupled neural network (PCNN) and the weighted fusion were used in the high and low frequency coefficients independently. Finally, inverse HIS transform and inverse NSCT were applied to get the fusion image. The experiment results show that many contrast experiments were made. In conclusion, space resolution and information amount of the fused image were both greatly improved.

Key words: image fusion; NSCT; PCNN

收稿日期: 2012-10-15; 修订日期: 2013-02-04

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (No. IRT0520)

作者简介: 傅瑶 (1983—), 女, 吉林通化人, 博士, 助理研究员, 主要研究遥感图像处理。

1 引 言

遥感数据具有不同的空间分辨率、波谱分辨率和时相分辨率,如果能够通过不同种类图像的融合,将其优势综合起来,可以弥补单一图像上信息的不足,从而提高遥感图像分析的精度,扩大应用范围。全色图像具有较高的空间分辨率,而多光谱图像可以更精细地描述目标光谱。两者的融合既可以利用全色图像的高分辨率改善多光谱图像的分辨率,又可以充分利用多光谱图像中特有的对目标某些独特特征的精细描述,使融合图像包含更丰富的信息^[1]。

非下采样轮廓波变换(Nonsubsampled Contourlet Transform, NSCT)是一种多尺度几何分析方法^[2-3],可以应用在图像处理、数据压缩、计算机视觉等很多领域。文献[4]中研究分析了非下采样轮廓波变换理论,并实验证明了与其他方法,如 db2 小波、atrous 小波、轮廓波等方法相比,非下采样轮廓波变换方法在图像融合方面效果最佳;文献[5]提出尖锐频率局部化轮廓波方法对多聚焦图像进行分解,变换域系数的选择采用了拉普拉斯能量。该方法一定程度上克服了轮廓波变换融合时在远离支撑区间上出现的混叠成分,但是在整个低频子带上的混叠现象难以解决;文献[6]采用小波变换和脉冲耦合神经网络(Pulse Coupled Neural Networks, PCNN)相结合的方法进行红外与可见光图像的有效融合,但小波变换方法对于融合后图像的伪吉布斯效应仍很难克服。

针对遥感图像特点,为更大程度提高图像的空间分辨率和光谱分辨率,本文提出一种结合非下采样轮廓波变换和脉冲耦合神经网络的方法对全色图像与多光谱图像进行融合。这种图像融合技术能够提取更多图像的细节信息,融合效果更佳。算法的研究基于某在研空间相机项目,该相机包括一个全色传感器和一个多光谱传感器,即相机传回图像类型包括全色图像和多光谱图像两种。通过本文融合方法的处理,合成后的高分辨率彩色图像包含更加丰富的信息,便于对图像进行进一步的观察和判读。

2 方法流程

由于非下采样轮廓波变换能够克服频谱混叠

现象,具有更优的频谱特性,本文基于该方法进行融合。融合方法的基本处理流程如图 1 所示,主要步骤如下:

- (1)多光谱图像进行 HIS 变换,得到亮度、色度和饱和度 3 个分量;
 - (2)分别对多光谱图像的亮度分量和全色图像进行非下采样轮廓波变换,获取其高低频系数;
 - (3)对低频系数进行加权融合;对高频系数采用脉冲耦合神经网络算法选取;
 - (4)对融合后系数进行 NSCT 重构;
 - (5)逆 HIS 变换,得到最终融合后图像。
- 下文将分别介绍融合中的几点关键技术。

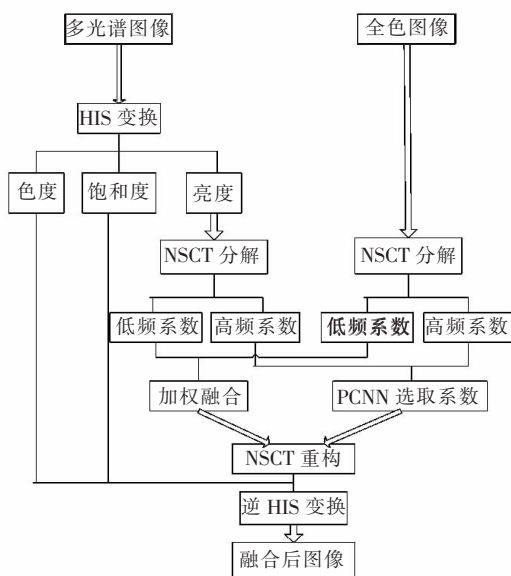


图 1 系统框图

Fig. 1 Main chart of the system

3 融合中的关键技术

3.1 HIS 变换

为同时保留空间纹理信息和光谱信息的彩色关系,需将多光谱图像的红绿蓝 3 个通道转换成亮度(Intensity)、色度(Hue)和饱和度(Saturation)进行预处理,转换算法如公式(1)所示。

$$H = \begin{cases} \theta(B \leq G) \\ 360 - \theta(B > G) \end{cases}, I = \frac{1}{3}(R + G + B),$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)}[\min(R, G, B)],$$

$$\theta = \arccos\left\{\frac{\frac{1}{2}[(R - G) + (R - B)]}{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)^{1/2}}\right\}$$

(1)

只通过 HIS 变换进行直接融合虽然能够较好地保留光谱信息的彩色关系和色调信息, 却很难保证图像的光谱信息不会丢失。因此对多光谱图像进行 HIS 变换以后, 再对多光谱图像的亮度分量图像和原始的全色图像分别进行二级非下采样轮廓波变换分解。

3.2 非下采样轮廓波变换

轮廓波变换^[7-8]是 2002 年 M. N. Do 和 Martin Vetterli 提出的一种二维图像表示方法。轮廓波对滤波后图像进行隔行隔列下采样时会产生频谱混叠, 其低频子带和高频子带均存在频谱混叠现象。为消除这种现象, 同时增强方向选择性和平移不变性, A. I. Cunha、J. P. Zhou 等构造出了非下采样轮廓波变换^[9-10]。

非下采样轮廓波变换中的多分辨率分解不是通过拉普拉斯金字塔分解实现, 而是直接通过满足 Bozout 恒等式(完全重构)条件的移不变滤波器组实现。由于没有下采样操作, 非下采样轮廓波变换具有平移不变性, 因此可以克服伪吉布斯现象。其低频子带不会有频谱混叠现象产生, 具有更好的频谱特性。因此, 非下采样轮廓波变换方法可以更好地处理轮廓、纹理等高维奇异性。其两层分解如图 2 所示。

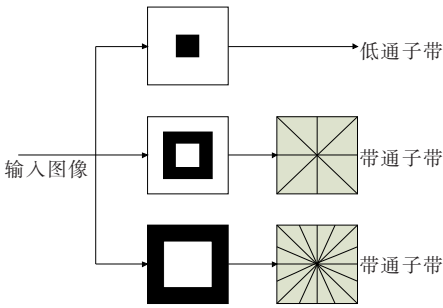


图 2 非下采样轮廓波变换的分解示意图
Fig. 2 NSCT decomposition chart

分解后, 会得到两个低频分量和多个高频分量。高低频分量融合方法的选取是保证融合后图像质量的关键。下面对高低频系数具体的融合过程进行说明。

3.3 低频系数的融合

非下采样轮廓波变换分解后所得到的低频子带反映的是图像的近似和平均特性, 构造的是图像的基本轮廓信息。传统的取平均值的做法不适用于多光谱图像和全色图像的融合, 因为全色图

像的分辨率较高, 取平均值的方法会弱化全色图像中较多的轮廓信息, 而加权法融合可以克服这种问题, 因此本文采用加权法融合低频系数。令多光谱图像的亮度分量经非下采样轮廓波变换分解后的低频分量 $A\{i\} (i=1, 2)$ 的权值 ω_A 和全色图像经 NSCT 分解后的低频分量 $B\{i\} (i=1, 2)$ 的权值 ω_B 的总和为 1, 由于多光谱图像的信息量小于全色图像的信息量, 因此考虑使 ω_A 在 0.1 到 0.5 间变化, ω_B 在 0.5~0.9 间变化。加权公式如公式(2)所示。

$$\omega_A^i + \omega_B^{1-i} = 1, i = 0.1, \dots, 0.5 \tag{2}$$

由以上公式可以得到 5 种权值组合, 由此得到 5 种融合后图像, 而后采用主客观评价相结合的方法选出融合效果最好的那组权值组合。

3.4 高频系数的融合

高频系数构造的是图像的细节信息, 如边缘信息和纹理信息等, 这些信息正是人眼视觉系统所关注的。采用脉冲耦合神经网络方法选取高频系数用于图像融合更符合人眼的关注焦点, 能获取尽可能多的细节信息。

脉冲耦合神经网络^[2, 11]是一种基于哺乳动物视觉原理构建的简化神经网络模型, 它不需要学习或者训练, 能从复杂背景下提取有效信息, 具有同步脉冲发放和全局耦合等特性, 其信号形式和处理机制更符合人类视觉神经系统的生理学基础。

数字图像应用中的脉冲耦合神经网络是一个单层二维横向连接的脉冲耦合神经元^[2, 12]。神经网络中的神经元数与输入图像的像素数相等, 神经元与图像的像素点一一对应。每个像素点与唯一的一个神经元相连, 每个神经元与周围的神经元相连。

应用于数字图像的脉冲耦合神经网络的基本模型如图 3 所示。

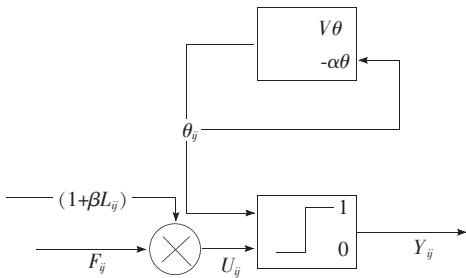


图 3 脉冲耦合神经网络基本模型
Fig. 3 PCNN basic model

根据图像处理中 PCNN 的模型,将提取得到的高频系数的灰度值作为 PCNN 的输入,通过比较 PCNN 点火图的次数选取融合系数。两幅图像高低频系数分别融合后,进行 NSCT 重构得到重构后图像,而后,该图像结合多光谱图像的色度和饱和度分量进行逆 HIS 变换得到最终融合图像。

4 实验结果与分析

实验中选用的全色图像为法国地球观测卫星 SPOT 图像,多光谱图像选用的是美国陆地卫星的主题制图仪 TM 图像。经实验选取,PCNN 的迭代次数为 100 次, $\omega_A=0.1$, $\omega_B=0.9$ 。图 4 是实验结果图像的示意图。

目前,评价图像融合效果的方法分为主观与客观两种评价方法^[13]。本文客观评价指标采用的是均值、标准差、熵、梯度这几个参数。均值是图像中像素的灰度平均值,对人眼反映为平均亮度;标准差反映了灰度相对于灰度均值的离散情况,标准差越大,包含的信息量趋于越大;信息熵反映了图像包含信息量的多少,融合图像的熵值越大,则融合图像携带的信息量越大;平均梯度能够敏感地反映图像对微小细节反差表达的能力,平均梯度的值越大,对比度越大,图像越清晰。

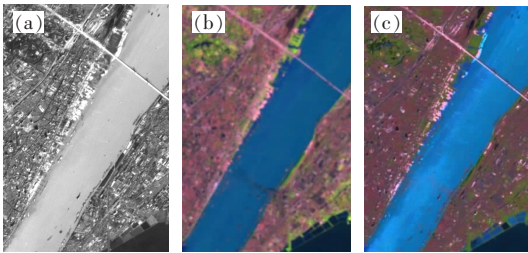


图 4 本文实验结果。(a) SPOT 图像;(b) TM 图像;(c) 本文方法融合图像。
Fig. 4 Experiment results. (a) Spot image; (b) TM image; (c) Fusion image by our method.

为验证算法的有效性,分别进行两组对比实验。第一组对比实验中,本文的方法分别与传统的 HIS 方法、PCA 方法以及 HIS+小波变换的方法进行了对比实验。其中,小波基选择的是 db4 小波。图 5 是对比实验的结果图,客观评价结果如表 1 所示。从表中可见,本文方法的均值高于其他 3 种方法,表明图像平均亮度相对较高;标准

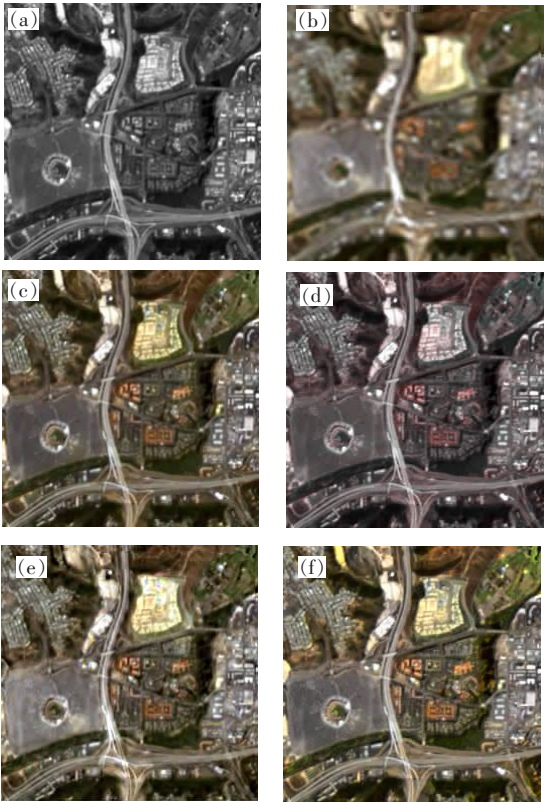


图 5 对比实验 1 结果。(a)全色图像;(b)多光谱图像;(c)HIS 方法;(d)PCA 变换方法;(e) HIS+小波变换;(f)本文方法。
Fig. 5 Results of experiment. (a) Panchromatic image; (b) Multi-spectral image; (c) HIS method; (d) PCA method; (e) HIS+wavelets transform; (f) our method.

表 1 对比实验 1 的客观评价结果				
Table 1	Objective evaluation results of experiment 1			
	均值	标准差	熵	平均梯度
HIS 方法	85.602 9	48.047 8	7.473 1	13.216 3
PCA 方法	85.587 2	46.529 6	7.426 5	13.331 5
HIS+wavelets	91.757 1	49.116 4	7.364 2	5.839 6
本文方法	95.761 3	50.897 3	7.597 1	15.825

差和熵值略高于其他方法,则图像保证了较高水平的信息量;平均梯度值高于其他方法,证明了本文的方法具有更高的空间分辨率。与一些传统的融合方法相比,经本文的融合方法得到的图像所含的信息量更为丰富,清晰度更高,具有较少的光谱失真,能够更好地提取到图像的细节信息。

第二组对比实验中,本文就标准差、熵和平均梯度等参数与文献[6]的方法——小波变换与 PCNN 结合法进行了对比实验,实验效果如图 6 所示,客观评价结果如表 2 所示。从表中可见,在标准差和熵的指标上本文方法优于文献[6]的方法,平均梯度接近于文献[6]的方法。可见,NSCT 的方法在图像融合方面与小波变换相比有更多优势。

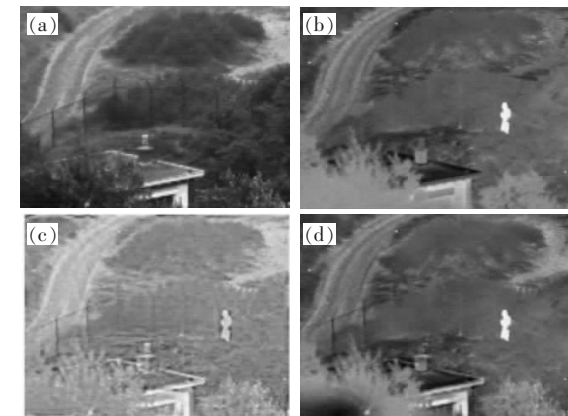


图 6 对比实验 2 结果图。(a)可见光图像;(b)红外图像;(c)文献[6]方法;(d)本文方法。

Fig. 6 Results of experiment 2. (a) Visible imagery; (b) Infrared imagery; (c) Method in literature [6]; (d) Method in this paper.

参 考 文 献:

[1] 张永生, 巩丹超, 刘军. 高分辨率遥感卫星应用——成像模型、处理算法及应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[2] 闫敬文, 屈小波. 超小波分析及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[3] 焦李成, 侯彪, 王爽, 等. 图像多尺度几何分析理论与应用——后小波分析理论与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.

[4] QU X B, YAN J W, XIAO H Z, *et al.* Image fusion algorithm based on spatial frequency-motivated pulse coupled neural networks in nonsubsampled contourlet transform domain [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34 (12): 1508-1514.

[5] 屈小波, 闫敬文, 杨贵德. 改进拉普拉斯能量和的尖锐频率局部化 Contourlet 域多聚焦图像融合方法 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(5): 1203-1212.

[6] 武治国, 王延杰, 李桂菊. 应用小波变换的自适应脉冲耦合神经网络在图像融合中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 708-715.

[7] Do Minh N, Vetterli Martin. “Contourlets” In *Beyond Wavelets* [M]. Academic Press, 2002: 1-27.

[8] Burt P J, Adelson E. The laplacian pyramid as a compact image code [J]. *IEEE Trans. Commun*, 1983, 31(4): 532-540.

[9] 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.

[10] da Cunha A L, Zhou Jianping, Do M N. The non-subsampled contourlet transform: theory, design, and applications in denoising [C]//*IEEE Transactions On Image Processing*, Genoa, Italy: IEEE, 2005: 749-752.

[11] Padgett M L, Johnson J L. Pulse coupled neural networks(PCNN) and wavelets: biosensor application [C]//*Inter-*

表 2 本文方法和文献[6]方法客观评价结果的比较
Table 2 Comparison of objective evaluation results between method in this paper and literature [6]

	标准差	熵	平均梯度
文献[6]方法	26.07	6.48	7.05
本文方法	28.71	6.78	7.01

5 结 论

针对全色图像与多光谱图像融合问题,结合工程需要,本文提出了一种基于非下采样轮廓波变换的遥感图像融合方法。非下采样轮廓波变换能够克服频谱混叠现象,具有更优的频谱特性,保证图像的光谱信息不会丢失。变换后两类图像的高低频系数分别采用脉冲耦合神经网络和加权方法进行融合。脉冲耦合神经网络算法选取的高频系数用于图像融合更符合人眼的关注焦点,能获得尽可能多的细节信息。多组对比实验表明,与传统方法相比,本文所提出的遥感图像融合方法信息量丰富,清晰度高,光谱失真少。融合后高分辨率彩色图像在提高图像分辨率的同时,图像的目标细节特征也得到了精细描述,包含更加丰富的信息,便于图像的观察和判读。

[12] 李云红,伊欣. 基于脉冲耦合神经网络模型的小波自适应斑点噪声滤除算法 [J]. 光学 精密工程,2012,20(9): 2060-2067.

[13] 姚军财. 基于人眼对比度敏感视觉特性的图像质量评价方法 [J]. 液晶与显示,2011,26(3):390-396.

例:[12]西安电子科技大学. 光折变自适应光外差探测方法:中国,01128777.2[P/OL]. 2002-03-06[2002-05-28]. <http://211.152.9.47/sipoasp/zljs/hyjs-yx-new.asp?recid=01128777.2&leixin=0>.

例:[13]PACS-L: the public-access computer systems forum[EB/OL]. Houston,Tex: University of Houston Libraries, 1989[1995-05-17]. <http://info.lib.edu/pacsl.html>.

例:[14]Online Computer Library Center, Inc. History of OCLC [EB/OL]. [2000-01-08]. <http://www.oclc.org/about/history/default.htm>.

2. 文后参考文献应在正文中引用该文献处进行标注。
3. 关于作者姓名,姓在前,名在后(拉丁文只用缩写);作者 3 人以下应全部列出,4 人以上仅列出前 3 人,其后加“等”(外文加“et al”)。
4. 注意参考文献标注的标点符号、次序,并不得缺项。
5. 参考文献著录不规范的有可能影响文章的录用。

注:文献类型和电子文献载体标志代码:

文献类型和标志代码

文献类型	标志代码	文献类型	标志代码
普通图书	M	报告	R
会议录	C	标准	S
汇编	G	专利	P
报纸	N	数据库	DB
期刊	J	计算机程序	CP
学位论文	D	电子公告	EB

电子文献载体和标志代码

载体类型	标志代码
磁带(magnetic tape)	MT
磁盘(disk)	DK
光盘(CD-ROM)	CD
联机网络(online)	OL