

基于 Curvelet 变换的自适应多传感器图像融合

高 斌 何同弟

(河西学院机电工程系, 甘肃 张掖 734000)

摘要 提出了基于 Curvelet 变换的自适应多传感图像融合新算法。算法将全色图像和多光谱图像进行 Curvelet 变换分解后, 针对不同的频率域特点选择不同的融合规则。对低频系数选取区域能量的加权系数自适应融合规则, 对高频系数选用了区域特征自适应的融合规则。最后通过重构得到融合图像。将该算法和其他的融合算法进行对比, 结果表明, 该算法是一种有效可行的图像融合算法。

关键词 图像处理; 多传感; Curvelet 变换; 自适应; 遥感; 融合算法

中图分类号 TP391 OCIS 100.3008 100.2650 文献标识码 A

Self-Adaptive Multi-Sensor Image Fusion Using Curvelet Transform

Gao Bin He Tongdi

(Department of Mechanic and Electronic, Hexi University, Zhangye, Gansu 734000, China)

Abstract A new self-adaptive multi-sensor image fusion algorithm based on Curvelet transform is proposed. Full-color and multispectral images are decomposed and transformed using the algorithm, and different fusion rules are selected according to different frequency characteristics. Self-adaptive regional energy coefficients fusion rule and regional feature self-adaptive fusion rule are selected for low- and high-frequency coefficients. The final fusion image is obtained by reconstruction. Compared with other fusion algorithms this algorithm is a feasible and effective image fusion algorithm.

Key words image processing; multi-sensor; Curvelet transform; self-adaptive; remote sensing; fusion algorithm

1 引言

通过将不同传感器获得的同一场景的图像或同一传感器在不同时间获得的同一场景的图像, 经过过去噪、配准、重采样后, 再运用某种融合技术以得到一幅合成图像的过程称为多传感器图像融合^[1]。相对于单个传感器信号的信息来讲, 由于来自多个传感器的信号所提供的信息具有冗余性和互补性, 通过融合技术可以克服单一传感器在光谱、空间分辨率等方面存在的局限性, 最大限度地获取目标场景的信息描述^[2]。根据信息表征层次的不同, 一般将多传感器信息融合划分为像素级、特征级和决策级3个层次。像素级融合是遥感信息融合各层次中最成熟的一级, 像素级融合能保持尽可能多的原始数据, 可提供其他融合层次所不能提供的细微信息, 具有最高的精度。目前光谱域主要的融合算法有代数运算法^[3]、IHS变换法^[4]、主成分变换法^[5]、基于平滑滤波的融合^[6]以及小波分析法^[7]等。小波变换是目前广泛使用的非自适应方法, 二维可分小波是一维小波的简单张成, 各向同性的性质导致方向选择性差, 不能有效地捕捉轮廓信息, 是一种“非稀疏”图像表示法。为了解决这个问题, 一些新的高维函数的最优表示方法——二代小波应运而

收稿日期: 2009-06-29; 收到修改稿日期: 2009-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(40671133)资助课题。

作者简介: 高 斌(1965—), 男, 工程师, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: ggy200026@126.com

生, 这些变换采用基的支撑区间表现出更高的方向敏感性, 即具有“各向异性”, 能更好地反映图像细节信息, 因此它们比小波变换能更好地表现边缘特征, 更适合于进行图像融合。本文介绍了Curvelet变换以及利用Curvelet变换进行自适应多传感图像融合, 并对各种融合方法进行了分析比较。

2 Curvelet 变换及融合规则的选取

E.J.Candes 等^[8]提出的 Curvelet 变换, 即一代 Curvelet 变换, 是在连续域中定义的, 需要经过子带分解、平滑分块、正规化和脊波分析等一系列步骤, 而且 Curvelet 金字塔的分解也带来了巨大的数据冗余量, 因此 E. J. Candes 等^[9]又提出了实现更简单、更便于理解的快速 Curvelet 变换算法, 即二代 Curvelet 变换。二代 Curvelet 与一代 Curvelet 在构造上完全不同, 二代 Curvelet 和脊波理论并没有关系, 实现过程也无需用到脊波, 二者之间的相同点仅在于紧支撑、框架等抽象的数学意义^[10-12]。Curvelet 变换有连续 Curvelet 变换和离散 Curvelet 变换, 其中常用的是离散 Curvelet 变换。李存军等^[10]提供了 2 种快速离散 Curvelet 变换方法: 基于 USFFT(Unequispaced FFT)变换法和基于 Wrapping 变换法(Wrapping-based transform)。由于 USFFT 算法采用装配技术, 因此计算量比 Wrapping 方法的大, 速度不如 Wrapping 方法^[13,14], 因此本文采用基于 Wrapping 变换方法。

在对多光谱图像和全色图像进行二代 Curvelet 分解后, 分别得到不同尺度的系数, 其中, 我们对低频系数子图像和高频系数子图像选用不同的融合规则进行融合。

1) 低频信息融合规则: 低频信息融合规则采用基于区域能量的加权系数的自适应选取。首先求出以 (m,n) 为中心位置的待融合的图像 A 和 B 的局部能量 $E_{JA}(m,n)$ 和 $E_{JB}(m,n)$, 再计算出融合图像低频系数

$$C(m,n) = \frac{E_{JA}(m,n)}{E_{JA}(m,n) + E_{JB}(m,n)} C_{JA}(m,n) + \frac{E_{JB}(m,n)}{E_{JA}(m,n) + E_{JB}(m,n)} C_{JB}(m,n), \quad (1)$$

式中 $C_{JA}(m,n)$ 表示图像 A 分解以后的低频系数, $C_{JB}(m,n)$ 表示图像 B 分解以后的低频系数。按照(1)式, 随着 (m,n) 中心位置的变化, 区域能量也随着变化, 加权系数也随着变化, 其中加权系数可以根据区域能量自适应的变化, 体现了自适应的特征。

由于局部区域能量较大的中心像素代表了原始图像的明显特征, 由(1)式若求得图像 A 的某一区域能量较大, 则对应的加权系数也会较大, 若区域能量较小, 则对应的加权系数也会较小, 符合原始图像本身特征对加权系数影响的特点。所以这种自适应的融合规则是有效的、可行的。

2) 高频信息融合规则: Curverlet 变换中的高频细节信息中包含着丰富的图像特征细节信息。其中高频信息中绝对值较大的系数对应着一些突变, 如图像的边缘、纹理等重要特征信息。因此高频信息的融合规则选择基于区域特征的算法有利于提取原始图像中的特征信息。高频分量选择以空间频率为度量标准结合自适应因子进行基于区域的自适应融合。

分别计算两幅图像 Curverlet 变换分解系数中对应尺度下相同方向的以 (i,j) 为中心的待融合图像 A 和 B 的局部区域的空间频率 F_{SA} 和 F_{SB} , 可以得到对应尺度下相同方向的融合后高频系数, 即

$$D_{j,F}^i(m,n) = \frac{D_{j,A}^i(m,n) \times F_{SA} \times \alpha + D_{j,B}^i(m,n) \times F_{SB} \times \beta}{F_{SA} \times \alpha + F_{SB} \times \beta}, \quad (2)$$

式中 $D_{j,A}^i(m,n)$ 和 $D_{j,B}^i(m,n)$ 分别为两幅待融合图像相应尺度下相同方向的高频系数, α 和 β 分别为调节因子, 且通常在 0~1 之间。 $F_{SA} \geq F_{SB}$ 时, $\alpha=1$ 且 β 为 F_{SB} 与 F_{SA} 的相对比例; $F_{SA} < F_{SB}$ 时, $\beta=1$ 且 α 为 F_{SA} 与 F_{SB} 的相对比例。由于在不同的区域内所包含的边缘、纹理等特征不同, 因此不同的区域所表述的空间频率不一样, 通过计算这些不同区域的空间频率, 根据(2)式进行调节因子 (α, β) 自适应的小波系数融合。通过加入调节因子使得效果较差的图像分量的系数自动减少, 使融合的高频成分中保留更多有用的信息。

3 基于二代 Curvelet 变换的自适应遥感图像融合方法

Curvelet 变换具有空间和频率的局域性和方向性,是“各向异性”的,能获得图像的“稀疏”表示,更好地反映图像的细节信息。将 Curvelet 变换应用到图像融合中,可以获得比小波变换效果更好的融合图像。提出了基于二代 Curvelet 变换的全色和多光谱图像的融合方法,如图 1 所示,其步骤为:

- 1) 利用经过重采样的多光谱图像对全色图像进行直方图匹配;
- 2) 分别对多光谱图像和新的全色图像进行 Curvelet 变换,得到各自的不同尺度层的系数;
- 3) 对于 Coarse 尺度层系数(即低频系数),选用基于区域能量的加权系数的自适应融合规则进行融合,得到融合图像 Coarse 尺度层系数;
- 4) 对于 Detail 尺度层系数,选用以空间频率为度量标准结合自适应因子进行融合,得到融合图像的 Detail 尺度层系数;
- 5) Finest 尺度层系数体现了图像的细节、边缘特征,因此,通过对全色图像的 Finest 尺度层系数进行加权(系数扩大 1.5 倍),增强图像的边缘,然后作为融合图像的 Finest 尺度层系数。
- 6) 最后,对得到的融合图像的系数进行 Curvelet 逆变换,得到融合图像。

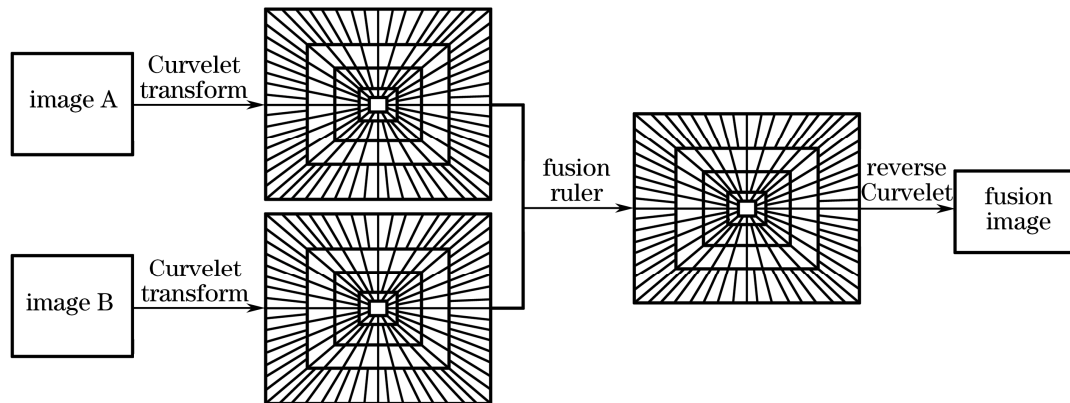


图 1 基于边缘增强的 Curvelet 变换图像融合流程图
Fig.1 Image fusion process of Curvelet transform based on edge enhancement

4 实验结果及其分析

对渭河流域西安市一段的经过配准的多组 IKONOS 1 m 分辨率全色图像和 4 m 分辨率多光谱图像进行融合实验,所有实验均在 Matlab 软件下完成。图 2 是其中一组实验图像,图像大小为 512 pixel×512 pixel。图 2(a)为 1m 分辨率的 IKONOS 全色图像,图 2(b)是经过重采样的 IKONOS 多光谱图像。本文用 6 种融合方法进行融合,实验结果图像如图 3 所示。

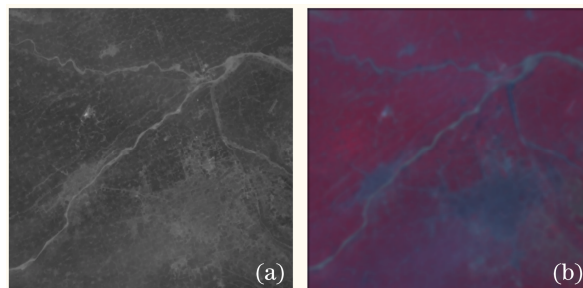


图 2 原始 IKONOS 遥感图像。(a)全色图像;(b)经过重采样的多光谱图像
Fig.2 Original IKONOS remote sensing image. (a) panchromatic image; (b) multispectral image after resampling

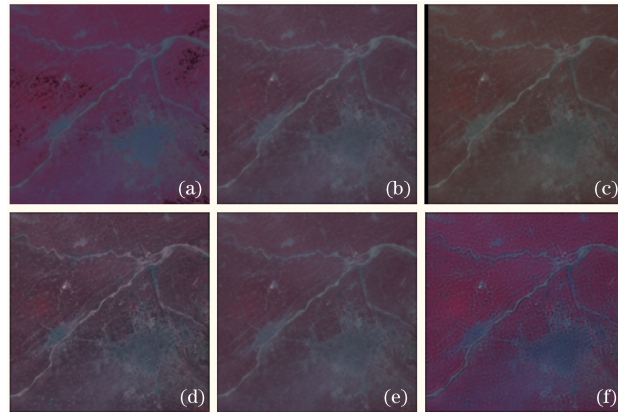


图3 融合图像。(a)IHS 变换融合图像；(b)PCA 变换融合图像；(c)加权平均融合图像；(d)高通滤波变换(HPF)融合图像；(e)小波变换融合图像；(f)本文方法得到的融合图像

Fig.3 Fusion images. (a) by IHS method; (b) by PCA method; (c) by weighted mean method; (d) by HPF method; (e) by wavelet method; (f) by the proposed method

从空间质量评价准则和光谱质量评价标准对6种融合方法得到的融合图像的质量做了评价。空间质量评价准则主要有均值、信息熵、清晰度。对一幅图像来说，均值指的是像素的灰度平均值，对人眼为平均亮度。如果均值适中(灰度值在128附近)，则视觉效果良好。图像信息熵是衡量图像信息丰富程度的一个重要指标,通过对图像信息熵的比较可以对比出图像的细节表现能力。熵值越大，说明融合图像携带的信息量越大。如果图像中所有灰度级出现概率越趋于相等，则包含的信息量越趋于最大。图像的清晰度采用平均梯度法来衡量，在图像中，某一方向的灰度级越大，平均梯度值 \bar{g} 就越大，否则 \bar{g} 越小。平均梯度反映了图像对微小细节反差表达的能力和纹理变化特征，可用来评价图像的模糊程度。一般来说， \bar{g} 越大，图像层次越多，图像越清晰。

光谱质量评价标准主要有偏差指数、光谱扭曲程度和相关系数。偏差指数是用来比较融合图像和低分辨率多光谱图像偏离的程度的。融合图像的偏差指数定义为融合后图像的亮度分量 I' 与原始多光谱图像的亮度分量 I 差值的绝对值与原始多光谱图像亮度分量 I 的比值。偏差指数的大小，反映了融合结果保持的光谱程度，偏差指数越大，说明融合图像的光谱失真越大，融合效果差。光谱扭曲程度直接反映了多光谱图像的光谱失真程度，同样也反映融合结果保持的光谱程度。扭曲程度越小，说明融合图像的光谱失真越小，融合效果越好。融合图像F与原始图像A的相关系数能反映两幅图像的光谱特征的相似程度，通过比较融合前后的图像相关系数，可以看出图像的光谱信息的改变程度。

图像的融合目的是为了最大限度地保留2幅图像中的重要信息，因此对多光谱和高分辨率遥感图像，既要保留原多光谱图像中的光谱信息，又要引入高分辨率图像中的细节纹理信息，才能为了客观地评价图像融合结果。实验取偏差指数 D ，光谱扭曲程度 M ，相关系数 C ，标准差 S ，熵 E 和清晰度 P 等客观指标来比较各种融合方法的性能和优缺点，结果如表1所示。

从表1中可以看出，IHS变换法和其他方法相比，偏差指数和光谱扭曲程度较小，而相关系数较大，说明IHS变换的融合图像和原始多光谱图像偏离较小，保持的多光谱信息较大，很好地保持了空间信息。利用直接平均融合法得到的融合图像空间分辨率提高不大，存在明显的光谱变异。利用高通滤波融合法可以得到增强的融合图像，但融合图像的光谱还是产生了比较严重的失真现象。采用PCA融合的方法，保留了原图像的高频信息，目标的细部特征也更加清晰，但PCA融合后地物边界有点发虚，影像几何结构信息有一定的丢失。基于Curvelet变换的融合方法得到的遥感图像从整体上在保持多光谱图像的光谱特征方面优于常用的遥感图像融合方法，熵值最大，说明它保持的多光谱信息丰富，清晰度和空间频率最高，很好地保持了空间信息且图像清晰。

表 1 遥感图像融合结果的性能评价
Table 1 Performance of the remote sensing image fusion results

	<i>E</i>	<i>S</i>	<i>D</i>	<i>M</i>	<i>C</i>	<i>P</i>
Original image	4.3703	8.4198				1.9717
	4.3837	8.5877				0.9377
	4.1499	8.4948				1.8952
Fig.3(a)	4.9330	8.2799	0.0660	4.9478	0.7109	2.6012
	5.2366	9.9293	0.0609	2.9087	0.8868	1.8631
	5.1238	9.2108	0.0583	4.2862	0.7332	2.4845
Fig.3 (b)	4.6016	6.1152	0.1016	8.1512	0.5492	2.1980
	5.1681	9.3714	0.2401	12.1736	0.9312	2.3170
	5.2112	9.3934	0.0478	3.6897	0.9136	2.3384
Fig.3 (c)	4.6016	6.1152	0.1016	8.1512	0.5492	2.1980
	5.1681	9.3714	0.2401	12.1736	0.9312	2.3170
	5.1681	9.3714	0.2078	16.7367	0.8561	2.3170
Fig.3 (d)	5.3650	10.6972	0.1276	10.3462	0.3791	4.3961
	5.4577	11.4723	0.2290	11.8195	0.8518	4.2335
	5.5330	11.9681	0.0698	5.6347	0.8560	4.3296
Fig.3 (e)	4.7715	6.8508	0.1063	8.5498	0.4922	3.2529
	5.2402	9.8332	0.2371	12.0255	0.8889	3.2995
	5.2881	9.8736	0.0568	4.4428	0.8733	3.3362
Fig.3 (f)	5.6964	12.8225	0.0625	4.9513	0.8507	5.0334
	5.3833	10.8733	0.0882	4.6423	0.8092	4.8765
	5.4502	11.2013	0.0574	4.6587	0.8202	4.9510

5 结 论

利用基于 Curvelet 变换的自适应多传感图像融合算法对高空间分辨率全色影像和低空间分辨率多光谱影像进行融合。对全色图像和多光谱图像做 Curvelet 变换，分解成低频系数和高频系数，分解后的低频系数选取区域能量的加权系数自适应融合规则，高低频系数采用以空间频率为度量标准结合自适应因子进行自适应融合规则，再对得到的低频和高频系数进行 Curvelet 反变换得到融合图像。与 HIS 变换法等传统融合方法相比，本文方法不仅很好地保留了光谱信息，而且较大地提高了多光谱影像的空间结构与细节信息，具有良好的融合效果。

参 考 文 献

1 Liu Xianhong. Study of Multisensor Image Fusion Algorithms[D]. Xi'an: Xidian University, 2006
刘先红. 多传感器融合算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006

2 Yu Wenxian, Yong Shaowei, Guo Guirong. Commentary of data fusion for multisensor[J]. *J. National University of Defense Technology*, 1994, **16**(3): 1~11
郁文贤, 雍少为, 郭桂蓉. 多传感器信息融合技术评述[J]. 国防科技大学学报, 1994, **16**(3): 1~11

3 Jia Yonghong. Study of Data Fusion for Multisensor[D]. Wuhan: Wuhan University, 2001
贾永红. 多传感影像数据融合方法及其应用的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2001

4 Zhu Long, Zhang Zhanmu. Image Acquiring and Analysis for Multisensor[M]. Beijing: Science Press, 2000
朱 龙, 张占睦. 多传感影像获取与分析[M]. 北京: 科学出版社, 2000

5 Ye Chuanqi, Miao Qiguang, Wang Baoshu. An image fusion algorithm using region segmentation and contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 447~453
叶传奇, 苗启广, 王宝树. 基于区域分割和Counterlet变换的图像融合算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 447~453

6 Xu Hanqiu. Study on data fusion and classification of landsat 7 ETM+imagery[J]. *J. Remote Sensing*, 2005, **9**(2): 187~194
徐涵秋. Landsat 7 ETM+影像的融合和自动分类研究[J]. 遥感学报, 2005, **9**(2): 187~194

7 Hou Jianhua, Xiong Chengyi, Yu Shenghui. Multi-resolution image fusion based on deature of local wavelet energy[J]. *J. South-Central University for Nationalities*, 2006, (2): 47~50
侯建华, 熊承义, 喻胜辉. 基于小波局部能量特征的多分辨率图像融合[J]. 中南民族大学学报, 2006, (2): 47~50

- 8 Candes E. j., Donoho D. L.. Curvelets-A surprisingly effective non-adaptive representation for objiets with edges[C]. Nashville: Vanderbilt University Press, 2000.105~120
- 9 E. J. Candes, L. Demanet, D. L. Donoho *et al.*. Fast discrete curvelet transforms[J]. *Multiscale Model. Simul.*, 2006, **5**(3):862~899
- 10 Li Cunjun, Liu Liangyun, Wang Jihua *et al.*. Comparison of two methods of fusing remote sensing images with fidelity of spectral information[J]. *J. Image Graphics*, 2004, **9**(11): 1376~1385
李存军, 刘良云, 王纪华 等. 两种高保真遥感影像融合方法比较[J]. *中国图象图形学报*, 2004, **9**(11): 1376~1385
- 11 Ye Baojun, Xi Shijin, Wu Junqi *et al.*. Integrated technique for IKONOS image fusion combining IHS transformati on and wavelet transformation algorithms[J]. *Jiangxi Science*, 2005, **23**(2): 154~158
叶宝军, 徐士进, 吴俊奇 等. 基于IHS变换和小波变换相结合的IKONOS影像融合技术[J]. *江西科学*, 2005, **23**(2): 154~158
- 12 Li Guangxin, Wang Ke. Color image fusion algorithm using the contourlet transform[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, **35**(1): 112~117
李光鑫, 王 珂. 基于Contourlet变换的彩色图像融合算法[J]. *电子学报*, 2007, **35**(1): 112~117
- 13 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
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
- 14 Liu Kun. Regional feature self-adaptive image fusion algorithm based on contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 682~686
刘 坤. 基于Contourlet变换的区域特征自适应图像融合算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 682~686