

利用快速离散 Curvelet 变换的遥感影像融合

刘 军¹ 李德仁² 邵振峰²

(1 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要:提出了一种基于快速离散 Curvelet 变换的遥感影像融合方法。首先,对经过空间配准的多光谱和全色影像分别进行快速离散 Curvelet 变换。然后,对低频子带采用局部标准差加权策略,对中高频子带采用绝对值最大策略,对高频子带采用直接替换策略,反变换后即可得到融合影像。IKONOS、QuickBird、World-View-2 多光谱和全色影像的融合实验和定量评价结果表明,该方法较传统方法有明显优势。

关键词:快速离散 Curvelet 变换;遥感影像融合;影像质量评价

中图分类号:P237.3; TP751

传统的遥感影像融合算法如 IHS 变换、PCA 变换等在进行遥感影像融合时,能够获得具有较高空间质量的融合影像,但存在光谱特性失真严重的局限性,具体表现在基于 IHS 变换的融合易产生光谱退化,基于 PCA 变换的融合又会失去其原有的物理特性。

近年来,基于小波变换的多尺度分解方法在遥感影像融合中得到了广泛的关注^[1,2]。然而,尽管基于小波变换的影像融合方法有效地解决了传统融合算法中的光谱失真问题,它同样存在局限性。Curvelet 变换除了具有一般小波变换的多尺度、时频局部特性外,还具有方向特性,其基支撑区间满足各向异性尺度关系,在给定相同的重构精度的情况下,能够接近最优地表示图像边缘和平滑区域^[3]。Curvelet 变换在遥感影像融合中取得了很好的效果^[4,5]。

本文基于离散 Curvelet 变换快速算法,采用新的融合策略,对 IKONOS、QuickBird、World-View-2 多光谱和全色影像进行融合。

1 Curvelet 变换及其快速算法

1.1 连续 Curvelet 变换和离散 Curvelet 变换

连续 Curvelet 变换在频域中实现,采用基函数与信号的内积形式实现信号的稀疏表示:

$$c(j, l, k) = \langle f, \varphi_{j, l, k} \rangle \quad (1)$$

式中, $\varphi_{j, l, k}$ 表示 Curvelet 函数; j, l, k 分别表示尺度、方向、位置参量。

离散 Curvelet 变换如式(2)所示:

$$C^D(j, l, k) = \sum_{0 \leq t_1, t_2 < n} f[t_1, t_2] \overline{\varphi_{j, l, k}^D[t_1, t_2]} \quad (2)$$

式中, $f[t_1, t_2]$ ($0 \leq t_1, t_2 < n$) 为笛卡尔坐标系下的输入。图 1 是离散 Curvelet 变换尺度角度分割示意图,图中阴影部分表示某尺度、某方向上的 Curvelet 函数支撑区间。在最粗尺度(即最内一层)下, Curvelet 函数没有引入方向变量,此处的 Curvelet 变换与小波变换类似,满足各向同性的特点;而在 j 尺度下, Curvelet 变换等间隔等斜率地将该尺度下的频带划分成 $2^{\lfloor j/2 \rfloor}$ 个大小为 $2^j \times 2^{j/2}$ 的楔形区域,其中, $\lfloor j/2 \rfloor$ 表示 $j/2$ 取整,楔形区域满足各项异性尺度的特征。

1.2 快速离散 Curvelet 变换

本文的遥感影像融合算法采用基于 Wrap 的算法实现,实际上是在基于 USFF 的方法上增加了 Wrap 步骤。

1) 对于给定的一个笛卡尔坐标下的二维函数进行二维 FFT 变换,得到二维频域表示:

$$\hat{f}[n_1, n_2], -\frac{n}{2} \leq n_1, n_2 \leq \frac{n}{2} \quad (j, l) \quad (3)$$

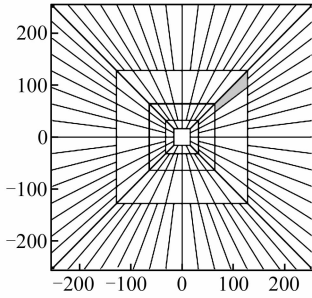


图1 离散 Curvelet 变换尺度角度分割示意图
Fig. 1 Diagram of Discrete Curvelet Tiling of Scale and Angle

2) 在频域,对每一对尺度角度 (j, l) ,重采样 $\hat{f}[t_1, t_2]$,得到采样值:

$$\hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan\theta_l], (n_1, n_2) \in P_j \quad (4)$$

3) 将内插后的 \hat{f} 与窗函数 \tilde{U}_j 相乘得到:

$$\hat{f}[n_1, n_2] = \hat{f}[n_1, n_2 - n_1 \tan\theta_l] \tilde{U}_j[n_1, n_2] \quad (5)$$

4) 围绕原点 Wrapping 局部化 $\hat{f}[n_1, n_2]$ 。

5) 对 $\hat{f}_{j,l}$ 进行二维 FFT 逆变换,由此即可得到离散的 Curvelet 变换系数集合 $C^D(j, l, k)$ 。

2 快速离散 Curvelet 变换用于遥感影像融合

快速离散 Curvelet 变换用于遥感影像融合的基本思想是:将原始遥感影像分解变换为一系列多尺度多方向的频带,利用分解后的系数结构,对不同尺度、不同方向上的频带采用不同的融合处理算法,从而实现原始影像多尺度多方向细节信息的融合。

本文根据此思想提出了一种基于快速离散 Curvelet 变换的遥感多光谱影像与全色影像的融合算法。该算法中,设 N 为分解尺度或级数,则经过快速离散 Curvelet 变换得到的系数分为3个层次:最内层,也就是第一层称为 Coarse 尺度层,由低频系数组成;最外层,也就是第 N 层称为 Finest 尺度层,由高频系数组成;中间的第2层至第 $N-1$ 层称为 Detail 尺度层,由多个方向的中高频系数组成。一幅影像即可由这些多尺度多方向的系数来描述。算法步骤描述如下所示。

1) 用双线性内插法将低分辨率的光谱影像重采样至高分辨率全色影像相同的像素大小,并进行严格的空间配准。

2) 对全色影像与原始多光谱影像各波段分别进行快速离散 Curvelet 变换,得到一系列 Curvelet 系数。

3) 分别对粗尺度的低频子带和细尺度的中

高频子带采取如下不同的融合策略进行融合。

① 由于低频子带体现的是影像的光谱特征,因此,对粗尺度的低频子带的主要处理原则是要尽可能地保存低分辨率多光谱影像的光谱特征,同时,尽可能将高分辨率全色影像的细节特征添加到多光谱影像中。考虑到影像像元的空间差异性,局部处理比全局处理具有更大的优势。本文采取的低频子带融合策略为局部标准差加权策略。

设 Mul_i 、Pan 分别表示经快速离散 Curvelet 变换获取的多光谱影像第 i 波段和全色影像的低频子带, $Fusion_i$ 表示融合影像的低频子带, h 和 l 分别为全色和多光谱影像的空间分辨率,则 $r=l/h$ 为两者空间分辨率的比值。取一滑动窗口进行局部处理,滑动窗口的大小 w 可以人为设置,本文实验中取 $w=2 \times r + 1$ 。在当前第 k 个滑动窗口内,定义均值的最小值为全色和多光谱影像共有的细节特征:

$$A(m, n) = \min[\mu_{Pan(k)}, \mu_{Mul_i(k)}] \quad (6)$$

式中, $\mu_{Pan(k)}$ 和 $\mu_{Mul_i(k)}$ 为全色和多光谱影像当前滑动窗口内的均值; (m, n) 为当前滑动窗口中心像元的坐标。全色低频子带第 k 个滑动窗口中心像元的细节特征可表示为:

$$\tilde{Pan}(m, n) = Pan(m, n) - A(m, n) \quad (7)$$

遵照光谱最大保存原则,融合后的多光谱影像的低频部分由式(8)计算:

$$Fusion_i(m, n) = Mul_i(m, n) + \frac{\text{std}(Pan(k))}{\text{std}(Pan(k)) + \text{std}(Mul_i(k))} \times \tilde{Pan}(m, n) \quad (8)$$

式中, $\text{std}(Pan(k))$ 和 $\text{std}(Mul_i(k))$ 分别表示全色影像和多光谱影像各波段低频子带第 k 个滑动窗口的标准差。

② 由于高频子带体现的是影像的细节特征,在快速离散 Curvelet 变换得到的子带中,Detail 层和 Finest 层是多个尺度、多个方向上的中频和高频子带,因此,对细尺度的中高频子带的主要处理原则是尽可能多地保存高分辨率全色影像的细节特征。本文采取的中高频子带融合策略为 Detail 层最大值替换策略和 Finest 层直接替换策略。

设 $C_{j,l,k}^{Mul_i}$ 、 $C_{j,l,k}^{Pan}$ 、 $C_{j,l,k}^{Fusion_i}$ 分别表示经快速离散 Curvelet 变换获取的多光谱影像、全色影像和融合影像的中高频子带。

对于 Detail 层:

$$C_{j,l,k}^{Fusion_i} = \begin{cases} C_{j,l,k}^{Mul_i}, \text{abs}(C_{j,l,k}^{Mul_i}) > \text{abs}(C_{j,l,k}^{Pan}) \\ C_{j,l,k}^{Pan}, \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

对于 Finest 层:

$$C_{j,l,k}^{Fusion_i} = C_{j,l,k}^{Pan} \quad (10)$$

式中, $\text{abs}(C_{j,l,k}^{Mul_i})$ 和 $\text{abs}(C_{j,l,k}^{Pan})$ 分别表示取 $C_{j,l,k}^{Mul_i}$ 和 $C_{j,l,k}^{Pan}$ 的绝对值。

4) 将经过上述处理的各子带进行 Curvelet 反变换,即可得到融合后的多光谱影像。

低频子带的处理以多光谱影像的光谱特征为主,融合后的多光谱影像完整地保存了多光谱影像的低频光谱信息,同时加入了全色影像的部分低频细节特征。中高频子带的处理以全色影像的细节特征为主,Detail 层中考虑到了多光谱影像的细节特征,而 Finest 层则直接用全色影像的细节特征表示融合影像的细节特征,尽可能完整地保存了全色影像的所有高频细节特征。正因为如此,本文算法中不需要将全色影像对着多光谱影像进行直方图匹配也能取得很好的融合效果。

3 实验与分析

3.1 质量评价指标

为了比较各种融合方法的融合效果,实验中还采取了其他 3 种方法:IHS 融合法、PCA 融合法、小波变换融合法。

1) 结构相似度^[6]。结构相似度越大,表明影像融合效果越好。设 X 和 Y 表示待比较的两幅影像,则它们之间的结构相似度定义为:

$$SSIM(X,Y) = \frac{(2\mu_X\mu_Y + C_1)(2\sigma_{XY} + C_2)}{(\mu_X^2 + \mu_Y^2 + C_1)(\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + C_2)} \quad (11)$$

式中, μ_X 和 μ_Y 是 X 和 Y 的均值; σ_X^2 和 σ_Y^2 表示 X 和 Y 的方差; σ_{XY} 是 X 和 Y 的协方差; C_1 、 C_2 是小的常量,是为避免分母为 0 而设置的。在影像融合中,设 A 、 B 、 F 分别为全色影像、多光谱影像和融合影像,则总的结构相似度可以表示为:

$$SSIM(F,A,B) = SSIM(F,A) + SSIM(F,B) \quad (12)$$

2) 光谱偏差指数,反映了融合结果对多光谱影像的光谱保持度:

$$d = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j \frac{|I_{i,j} - \hat{I}_{i,j}|}{I_{i,j}} \quad (13)$$

式中, $I_{i,j}$ 和 $\hat{I}_{i,j}$ 分别表示融合前后多光谱影像的灰度值。

3) 光谱相关系数,反映了融合结果影像与原始多光谱影像在光谱特征上的相似性,相似度越高,表示融合后的影像对多光谱影像的光谱特征保持度越高。

4) 通用图像质量评价指标 UIQI^[7]。从相关信息损失、辐射值扭曲和对比度扭曲 3 个方面衡量融合前后影像的相似度,其值越大,表示融合质量越高:

$$UIQI = \frac{4\delta_{xy}\bar{x}\bar{y}}{(\delta_x^2 + \delta_y^2)[(\bar{x})^2 + (\bar{y})^2]} \quad (14)$$

式中, \bar{x} 和 \bar{y} 分别表示原始多光谱影像和融合结果影像的均值; δ_x 和 δ_y 表示原始多光谱影像和融合结果影像的方差;而 δ_{xy} 表示它们的协方差。

3.2 不同融合方法的实验及质量评价

以北京地区 IKONOS 全色影像(分辨率为 1 m,见图 2(a))和 IKONOS 多光谱影像(分辨率为 4 m,图 2(b))来进行实验。多光谱影像采用 R、G、B 3 波段合成的真彩色影像,实验影像大小为 512 像素×512 像素,采用双线性内插法对多光谱影像进行重采样,并与全色影像严格配准,配准精度控制在 0.5 个像素以内。图 2(c)~2(f)给出了上述方法的融合结果,其中,小波变换采用的小波基为 db4 小波基,级数为 4 级,采用与 Curvelet 融合相同的融合策略。

从融合结果影像可以看出,各融合方法都能很好地提高原始多光谱影像的空间分辨率,计算出的各项质量评价指标如表 1 所示。

结构相似度、光谱相关系数和 UIQI 越大,光谱偏差指数越小,表明融合效果越好。从表 1 的

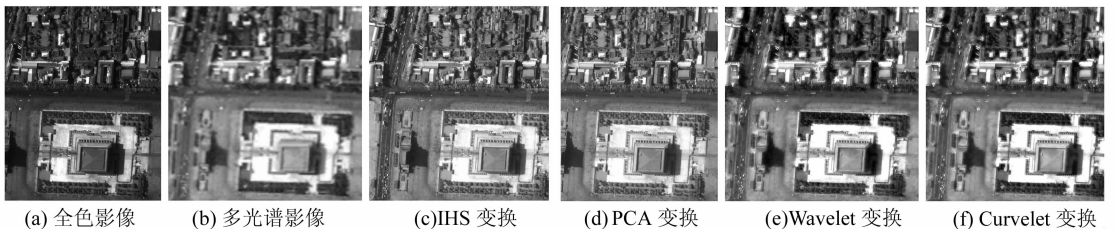


图 2 北京地区的 IKONOS 全色和多光谱影像以及变换融合结果

Fig. 2 IKONOS PAN and MS Images of Beijing Area and Fusion Results of IHS,PCA, Wavelet and Curvelet Transform Respectively

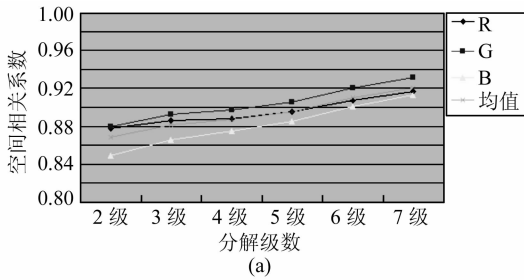
表1 不同融合方法的客观评价结果

Tab.1 Objective Evaluation Results of Different

Fusion Methods

		IHS	PCA	Wavelet	Curvelet
结构相似度	R	1.728 9	1.711 8	1.748 8	1.757 6
	G	1.663 2	1.677 9	1.720 5	1.725 4
	B	1.644 8	1.645 3	1.699 2	1.700 6
	均值	1.679 0	1.678 3	1.722 8	1.727 8
光谱偏差指数	R	0.398 3	0.424 8	0.245 4	0.198 4
	G	0.266 1	0.252 8	0.179 5	0.153 2
	B	0.272 6	0.284 9	0.183 8	0.157 1
	均值	0.312 3	0.320 8	0.202 9	0.169 6
光谱相关系数	R	0.841 3	0.819 3	0.945 9	0.950 4
	G	0.801 8	0.814 6	0.934 1	0.937 6
	B	0.784 4	0.781 5	0.924 9	0.931 0
	均值	0.809 2	0.805 2	0.935 0	0.939 7
UIQI	R	0.841 3	0.819 3	0.935 0	0.942 7
	G	0.801 7	0.814 6	0.919 3	0.926 3
	B	0.784 3	0.781 5	0.909 7	0.919 2
	均值	0.809 1	0.805 1	0.921 3	0.929 4

客观评价结果可以看出,采用本文提出的子带融合



规则的 Wavelet 变换和 Curvelet 变换所得到的融合影像在各指标上均比传统的 IHS 和 PCA 变换要高很多,说明本文提出的子带融合规则较传统方法能更好地保持空间细节信息和光谱信息,而 Curvelet 变换的结果又要好于 Wavelet 变换,说明 Curvelet 变换在影像融合中具有更大的优势。

图3采用空间相关系数和光谱相关系数指标分析了分解级数对于融合质量的影响。空间相关系数是融合影像各波段与全色影像的相关系数,反映的是融合影像对全色影像空间细节信息的保持度。从图中可以看出,随着分解级数的增加,空间相关系数逐渐增大,而光谱相关系数逐渐减小,表明融合影像从全色影像中获取的空间细节信息越多,则从多光谱影像中获取的光谱信息就越少。因此,在实际应用中需要根据具体的融合需求选择合适的分解级数,一般而言,分解级数为3或者4就能在空间细节和光谱信息两者之间取得较好的平衡。

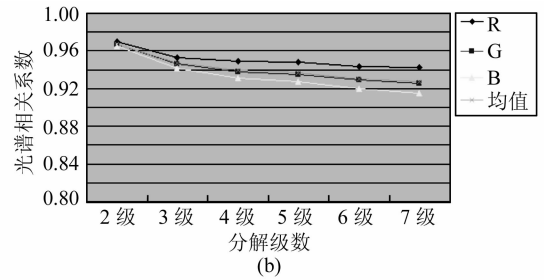


图3 分解级数对融合质量的影响

Fig.3 Effect of Decomposition Levels

图4和图5分别是 QuickBird、WorldView-2 全色和多光谱影像的融合影像。QuickBird 全色影像空间分辨率为 0.6 m,多光谱影像空间分辨率为 2.4 m,WorldView-2 全色和多光谱影像的空间分辨率分别为 0.5 m 和 2.0 m,原始影像大小均为 512 像素×512 像素,多光谱影像为 3 个波段组成的真彩色影像,采用 IHS 变换、PCA 变换、Wavelet 变换和 Curvelet 变换对这些全色和多光谱影像进行融合,融合之前都进行了严格的

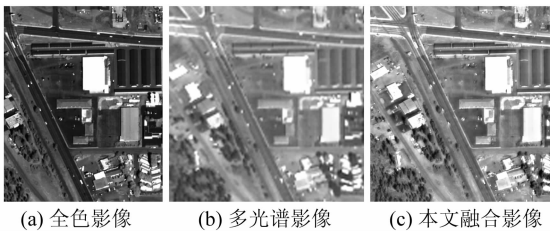


图4 QuickBird 全色和多光谱影像及本文融合影像
Fig.4 QuickBird PAN and MS Images and Fused Image

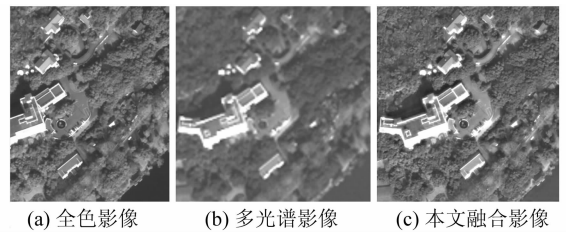


图5 WorldView-2 全色和多光谱影像及本文融合影像
Fig.5 WorldView-2 PAN and MS Images and Fused Image

几何配准。表2和表3是对 QuickBird 和 WorldView-2 影像融合实验的客观评价结果,受篇幅限

表2 QuickBird 融合影像客观评价结果

Tab.2 Objective Evaluation Results of QuickBird

Fused Images

	IHS	PCA	Wavelet	Curvelet
结构相似度	1.615 9	1.616 9	1.664 6	1.670 1
光谱偏差指数	0.167 3	0.168 0	0.138 5	0.125 8
光谱相关系数	0.792 8	0.788 8	0.880 2	0.906 0
UIQI	0.792 3	0.788 6	0.868 5	0.892 0

表 3 WorldView-2 融合影像客观评价结果

Tab. 3 Objective Evaluation Results of WorldView-2

Fused Images

	IHS	PCA	Wavelet	Curvelet
结构相似度	1.745 9	1.744 2	1.786 3	1.812 2
光谱偏差指数	0.127 2	0.132 1	0.121 4	0.112 4
光谱相关系数	0.801 5	0.795 2	0.905 5	0.923 8
UIQI	0.801 0	0.794 8	0.882 4	0.910 6

制,图 4 和图 5 中仅给出了本文提出的基于 Curvelet 变换的融合影像,表 2 和表 3 中的值为 3 个波段的评价结果的均值。

从表 2 和表 3 中可以看出,与 IKONOS 影像融合实验的结果一样,Curvelet 变换在各评价指标上均表现最优,说明了本文方法的通用性。

实验结果充分表明,本文提出的子带融合规则在保持空间细节信息和光谱信息方面具有很大的优势,基于此规则的 Curvelet 变换融合方法是非常有效的,可以获得很好的融合结果。

4 结 语

与传统方法不同的是,本文方法不需要将全色影像对着多光谱影像进行直方图匹配,能更完整地保留全色影像的空间细节信息。实验结果表明,此方法能够更优地提取出原始影像的空间和光谱信息用于影像融合,其融合结果在结构相似度、光谱偏差指数、光谱相关系数、UIQI 等方面

较传统的方法有很明显的改善。

参 考 文 献

[1] 王智均,李德仁,李清泉. 多进制小波理论在 SPOT 和 TM 影像融合中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2001,26(1):24-28

[2] 邢帅,谭兵,徐青,等. 基于复数小波变换的遥感图像融合新算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32(1):75-77

[3] 闫敬文,屈小波. 超小波分析及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008,172-173

[4] 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]. 中国图像图形学报,2008,13(12):2 376-2 382

[5] Choi M, Kim R Y, Nam M R, et al. Fusion of Multispectral and Panchromatic Satellite Images Using the Curvelet Transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005,2(2):136-140

[6] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004,13(4): 600-612

[7] Wang Z, Bovik A C. A Universal Image Quality Index[J]. IEEE Signal Process Letter, 2002,9(3): 81-84

第一作者简介:刘军,博士生,研究方向为遥感图像处理与分析。E-mail:luck0209@163.com

Fusion of Remote Sensing Images Based on Fast Discrete Curvelet Transform

LIU Jun¹ LI Deren² SHAO Zhenfeng²

(1 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: A new fusion method of remote sensing images based on fast discrete Curvelet transform (FDCT) is proposed. The FDCT is firstly done to the multi-spectrum (MS) and panchromatic (PAN) remote sensing images with space registration. Then fusion of low-frequency sub-band based on standard deviation weighted strategy, median and high frequency sub-band based on maximum replacement strategy, high frequency sub-band based on direct replacement strategy are implied. The fused image is produced by the inverse FDCT. The experimental results with IKONOS, QuickBird, WorldView-2 MS and PAN images indicate that the proposed method significantly outperform the traditional methods.

Key words: fast discrete Curvelet transform; RS image fusion; image quality evaluation