

基于2代Curvelet改进IHS变换的遥感图像融合

蒋年德^{1),2)} 王耀南¹⁾ 毛建旭¹⁾

¹⁾(湖南大学电气与信息工程学院,长沙 410082) ²⁾(东华理工大学信息工程学院,抚州 344000)

摘要 Curvelet变换是继小波变换之后,能更适合于图像处理的一种新的多尺度变换分析方法,它比小波变换更加适合分析2维图像中的曲线或直线状的边缘特征,同时也具有很强的方向性。为了将该变换应用于图像融合,首先对第2代Curvelet变换理论进行了综述,然后在对基于第2代Curvelet变换的遥感图像融合方法进行研究的基础上,提出了一种与IHS变换结合的融合方法。最后用高分辨率全色图像与低分辨率多谱图像进行了融合实验,实验结果表明,将Curvelet变换引入图像融合,能够更好地提取原始遥感图像的特征,不仅可为融合图像提供更多的信息,而且融合图像能在较好地保留光谱信息的同时,使空间细节信息也得到增强。

关键词 遥感图像融合 Curvelet变换 IHS变换 小波

中图分类号:TP391.41 TP751 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)12-2376-07

Using the Second Generation Curvelet to Improve IHS Transform Merge Remote Sensing Images

JIANG Nian-de^{1),2)}, WANG Yao-nan¹⁾, MAO Jian-xu¹⁾

¹⁾(College of Electric & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082)

²⁾(School of Information Engineering, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000)

Abstract Curvelet, as a new multi-scale analysis algorithm, is more suitable for image processing than wavelet, and is more appropriate for the analysis of the image edges such as curve and line characteristics. In addition, the representation contains more directional information. In this paper the theory and implementation of the second generation Curvelet transform is reviewed. The methods of remote sensing image fusion are proposed based on Curvelet transform and the scheme using Curvelet and IHS transform is described in detail. The processing of fusion is performed with the high resolution panchromatic and low resolution multispectral remote sensing images. The result of experiment indicates that the performance of Curvelet-based image fusion method excels those of based IHS or wavelet transform. When the Curvelet transform is introduced to image fusion, original images are characterized better and more information for fusion is obtained. It not only preserves spectral information of the original multispectral image well, but also enhances spatial information with more details.

Keywords remote sensing image fusion, Curvelet transform, IHS transform, wavelet

1 引言

近些年来,多传感器图像融合技术在医学、机器视觉、环境保护、农业产量评估和遥感等领域取得了较广泛的应用^[1,2]。图像融合是指对由不同类型的传感器所获取的同一景物图像数据

进行配准后,再采用一定方法将各图像的优点或互补性有机地结合起来产生新图像的技术。遥感图像融合方法主要有 Brovey、IHS^[3]、PCA^[4]、高通滤波(HPF)^[5]和小波变换^[6-10]等融合方法,但上述方法都有一定局限性,如IHS变换融合易产生光谱退化,主分量(PCA)变换融合又会失去其原有的物理特性,而高通滤波融合则滤掉

基金项目:国家自然科学基金项目(60375001);江西省自然科学基金项目(2007GZS0472)

收稿日期:2006-12-09;改回日期:2007-10-08

第一作者简介:蒋年德(1971~),男,2000年于东华理工大学信息工程学院获硕士学位,副教授。主要研究智能信息处理与融合、图像处理等。E-mail:cjnd@163.com

了高分辨率波段图像大部分的纹理信息。

小波变换以其时-频局域化和多尺度/多分辨思想,广泛地应用于图像融合、去噪、增强、特征提取等,但小波变换法也有局限性,它只能反映信号的零维奇异性,即只能反映奇异“点”的位置和特性,而难以表达更高维的特征。针对小波多尺度分析的弱点,1999 年, Candès 和 Donoho 提出了 Curvelet 变换理论^[11,12],国内外学者的研究成果表明, Curvelet 变换理论可较好地应用于图像去噪^[13,14]、特征提取^[15], Choi 及 Alparone 等人则将 Curvelet 应用于遥感图像的融合^[16,17],并取得了较好的融合效果,但他们采用的是第 1 代 Curvelet 变换。2004 年, Candès 等人提出了第 2 代 Curvelet 变换^[18,19],并于 2005 年给出了实现第 2 代 Curvelet 变换的快速算法^[19]。第 2 代 Curvelet 变换克服了第 1 代 Curvelet 变换实现的许多缺点,相对于第 1 代 Curvelet 变换来说,第 2 代 Curvelet 变换采用了更简单的结构,它只有尺度、方向和位置 3 个参量,而第 1 代 Curvelet 变换的实现却需要 7 个参量;另外,第 2 代 Curvelet 变换大大减少了数据冗余量,其快速算法更便于理解。李晖晖等人对基于第 2 代 Curvelet 变换的多聚焦图像融合进行了初步研究^[20],本文则仅对第 2 代 Curvelet 变换在遥感图像融合中的应用进行研究。

2 第 2 代 Curvelet 变换理论与实现

本节仅对 Candès 等人提出的第 2 代 Curvelet 变换公式及实现算法进行简单论述,有关详细的理论及其算法实现可参见文献[18,19]。

2.1 连续 Curvelet 变换公式

在 2 维空间 \mathbf{R}^2 中,设 $\mathbf{x}(\mathbf{x} = (x,y))$ 为空间位置, $\boldsymbol{\omega}$ 表示频率变量, r, θ 分别表示频率域下的极坐标变量;另设存在光滑、非负、实值的 $W(r)$ 和 $V(t)$, 满足下面的允许条件:

$$\sum_{j=-\infty}^{\infty} W^2(2^j r) = 1 \quad r \in (3/4, 3/2) \quad (1)$$

$$\sum_{l=-\infty}^{\infty} V^2(t-l) = 1 \quad t \in (-1/2, 1/2) \quad (2)$$

式中,称 $W(r)$ 为半径窗, $V(t)$ 为角窗。同小波变换理论相类似,设 $\varphi_j(\mathbf{x})$ 表示母 Curvelet 函数,其傅里叶变换为 $\hat{\varphi}_j(\boldsymbol{\omega}) = U_j(\boldsymbol{\omega})$, 傅里叶频率域的“频率窗”定义为

$$U_j(r, \theta) = 2^{-\frac{3j}{4}} W(2^{-j} r) V\left(\frac{2^{\lfloor \frac{j}{2} \rfloor} \theta}{2\pi}\right) \quad (3)$$

式中, $\lfloor \frac{j}{2} \rfloor$ 表示 $\frac{j}{2}$ 的整数部分值,称支撑 U_j 为极坐标下的“楔形”窗。当引入间隔相同的旋转序列 $\theta_l = 2\pi \cdot 2^{-\lfloor \frac{j}{2} \rfloor} \cdot l, l = 0, 1, \dots, 0 \leq \theta_l \leq 2\pi$ 和位移参数系列 $k = (k_1, k_2) \in \mathbf{Z}^2$ 后,则尺度 2^{-j} 下所有的 Curvelets 可通过旋转和平移获得。因此,对于尺度 2^{-j} 下、方向 θ_l 和位置 $\mathbf{x}_k^{(j,l)} = \mathbf{R}_{\theta_l}^{-1}(k_1 \cdot 2^{-j}, k_2 \cdot 2^{\frac{j}{2}})$ 的 Curvelets 变换可由下式给出:

$$\varphi_{j,l,k}(\mathbf{x}) = \varphi_j(\mathbf{R}_{\theta_l}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_k^{(j,l)})) \quad (4)$$

式中, \mathbf{R}_{θ} 表示弧度 θ 的旋转矩阵。

设 $f \in L^2(\mathbf{R}^2)$, 则 Curvelet 变换定义如下:

$$c(j, l, k) = \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle = \int_{\mathbf{R}^2} f(\mathbf{x}) \overline{\varphi_{j,l,k}(\mathbf{x})} d\mathbf{x} \quad (5)$$

在频率域中,实现 Curvelet 变换算法更为方便,其频率域中的 Curvelet 变换为

$$\begin{aligned} c(j, l, k) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int \hat{f}(\boldsymbol{\omega}) \overline{\hat{\varphi}_{j,l,k}(\boldsymbol{\omega})} d\boldsymbol{\omega} \\ &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int \hat{f}(\boldsymbol{\omega}) U_j(\mathbf{R}_{\theta_l} \boldsymbol{\omega}) e^{i\langle \mathbf{x}_k^{(j,l)}, \boldsymbol{\omega} \rangle} d\boldsymbol{\omega} \end{aligned} \quad (6)$$

由式(5)定义可知,对于任意函数 $f(x,y) \in L^2(\mathbf{R}^2)$ 可由 Curvelet 级数表示,即

$$f = \sum_{j,l,k} \langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle \varphi_{j,l,k} \quad (7)$$

且满足以下 Parseval 关系

$$\sum_{j,l,k} |\langle f, \varphi_{j,l,k} \rangle|^2 = \|f\|_{L^2(\mathbf{R}^2)}^2, \forall f \in L^2(\mathbf{R}^2) \quad (8)$$

设低通窗口 W_0 服从条件 $|W_0(r)|^2 + \sum_{j \geq 0} |W(2^{-j} r)|^2 = 1$, 对于 $k_1, k_2 \in \mathbf{Z}$, 粗尺度的 Curvelet 变换定义如下:

$$\begin{aligned} \varphi_{j_0,k}(\mathbf{x}) &= \varphi_{j_0}(\mathbf{x} - 2^{-j_0} k), \\ \hat{\varphi}_{j_0}(\boldsymbol{\omega}) &= 2^{-j_0} W_0(2^{-j_0} |\boldsymbol{\omega}|) \end{aligned} \quad (9)$$

由上式可知,由于粗尺度的 Curvelet 变换没有方向性,因此,整个 Curvelet 变换是由具有方向性的细尺度的 $(\varphi_{j,l,k})_{j \geq j_0, l, k}$ 和各方向同性的粗尺度父小波 $(\varphi_{j_0,k})_k$ 构成。

2.2 离散 Curvelet 变换及实现算法

式(3)给出的是连续域中的频率窗 U_j , 它虽可将频域光滑地划分成角度不同的环形 ($2^j \leq r \leq 2^{j+1}, -\pi \cdot 2^{-j/2} \leq \theta \leq \pi \cdot 2^{-j/2}$), 但是这种分割不适合 2 维笛卡儿坐标系处理,因此可采用同中心的正方形区域来代替。这种情况下,可使用 \tilde{W}_j 和 V_j

来定义笛卡儿坐标系下的局部窗,见下式:

$$\tilde{U}_j(\omega) = \tilde{W}_j(\omega) V_j(\omega) \quad (10)$$

对于半径窗 $W(r)$, 设 $W_j(\omega) = W(2^{-j}\omega)$, 并且有如下表达式:

$$\tilde{W}_j(\omega) = \sqrt{\Phi_{j+1}^2(\omega) - \Phi_j^2(\omega)} \quad j \geq 0$$

式中, 1 维低通窗口的内积 Φ 定义为

$$\Phi_j(\omega_1, \omega_2) = \phi(2^{-j}\omega_1)\phi(2^{-j}\omega_2) \quad (11)$$

规定函数 ϕ 值在 0 与 1 之间并且在区间 $[-1/2, 1/2]$ 内其值等于 1, 在区间 $[-2, 2]$ 外, 其值等于 0。 \tilde{W}_j 和 Φ 有如下关系式成立:

$$\Phi_0(\omega)^2 + \sum_{j \geq 0} \tilde{W}_j^2(\omega) = 1 \quad (12)$$

对于角窗 $V(t)$, 设 $V_j(\omega) = V(2^{\lfloor j/2 \rfloor} \omega_2 / \omega_1)$ 成立, 若引入同间隔的斜率 $\tan \theta_l = l \cdot 2^{-\lfloor j/2 \rfloor}$, $l = -2^{\lfloor j/2 \rfloor}, \dots, 2^{\lfloor j/2 \rfloor} - 1$, 并定义

$$\tilde{U}_{j,l}(\omega) = W_j(\omega) V_j(S_{\theta_l} \omega) \quad (13)$$

式中, $S_{\theta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\tan \theta & 1 \end{bmatrix}$ 为剪切矩阵, 则离散

Curvelet 变换被定义为

$$\tilde{\varphi}_{j,l,k}(\mathbf{x}) = 2^{3j/4} \tilde{\varphi}_j(S_{\theta_l}^T(\mathbf{x} - S_{\theta_l}^T \mathbf{b})) \quad (14)$$

式中, \mathbf{b} 取离散值 $(k_1 \cdot 2^{-j}, k_2 \cdot 2^{-j/2})$ 。

Curvelet 变换系数, 由下式计算:

$$c(j, l, k) = \int \hat{f}(\omega) \tilde{U}_j(S_{\theta_l}^{-1} \omega) e^{i(S_{\theta_l}^T \mathbf{b}, \omega)} d\omega \quad (15)$$

Candès 等人在文献 [19] 中详细给出了两种采用傅里叶变换基来实现离散 Curvelet 变换的快速算法, 有兴趣的读者请参见相关文献。

2.3 Curvelet 变换与 Wavelet 变换的区别

Curvelet 变换是在研究小波变换的基础上发展起来的, 它能克服小波变换在表达图像边缘的方向特性等方面的内在缺陷。Curvelet 变换是以边缘为基本表示元素, 不仅具有完备性, 且能很好地适合图像的特点。这种变换的主要特征是具有很好的方向性和各向异性, 不但能为图像处理提供更多的信息, 并能准确地将图像中的边缘捕获到不同尺度、不同频率的子带中。和小波变换一样, Curvelet 变换也是一种多尺度变换, 其框架元素是以尺度和位置为参数, 但与小波变换不同的是, 它还有方向参量, 也就是说, Curvelet 金字塔包中含有高度方向特殊性的元素。

由于 Curvelet 变换可同时对图像的平滑部分和

边缘部分提供稀疏表达, 以使得对应边缘的大系数不像在小波变换结果中传播到那么多的尺度分量中, 因此能取得很好的能量集中效果。另外, 小波变换只提供“点”的特性, 而 Curvelet 变换由于具有很强的方向性, 可直接获得对直线, 甚至平面等高维特征变化特性的描述。Curvelet 变换遵守一个尺度规则, 即每个子块的频率带宽 w 、长度 d 都近似满足关系 $w = d^2$, 即宽度是长度的平方。由于 Curvelet 变换的实质是子带分块的多尺度分析, 它具有各向异性特点和小波变换的多尺度特点, 因此它的出现对于 2 维信号分析具有里程碑式的意义 [13]。

3 基于 Curvelet 变换的遥感图像融合方法

Curvelet 变换的目的是先将原始遥感图像分别分解到一系列频率信道中, 然后利用其分解后的结构, 对不同分解层、不同方向频带分别进行融合处理, 即可有效地将来自不同图像的细节融合在一起。融合时, 可将被融合图像各自携带的不同特征与细节信息, 分别在多个分解层、多个方向频带上进行融合。本文将基于小波变换的图像融合算法推广发展到基于第 2 代的 Curvelet 变换融合, 这里先给出两种常见的融合规则算法, 然后讨论用第 2 代 Curvelet 变换改进 IHS 变换来融合低分率的多光谱图像和高分辨率的全色遥感图像。

3.1 Curvelet 系数替换融合

该规则是基于文献 [7, 8] 提出的小波变换融合模型。融合时, 先将多光谱图像与全色图像分别进行 Curvelet 变换分解, 然后以多光谱图像的尺度系数和全色图像的 Curvelet 系数进行逆 Curvelet 变换来获得融合图像, 融合中舍弃了多光谱图像的 Curvelet 系数。采用该融合规则, 虽然融合图像的空间分辨率提高了, 但由于没有顾及多光谱图像及全色图像的光谱差异, 因此可能导致小目标的光谱信息丢失。

3.2 Curvelet 系数相加融合

其思想来源于文献 [7], 与同替换融合规则不同的是, 其融合的 Curvelet 系数是选取多光谱图像、全色图像的 Curvelet 系数之和, 其获得的融合图像不仅提高了空间分辨率, 同时能在很大程度上保持光谱信息, 但是由于增加了 Curvelet 系数的幅度值, 因此在图像的可视效果上, 其融合图像效果不如采

用替换规则融合所得的图像。

3.3 基于 Curvelet 的改进 IHS 变换融合

IHS 变换融合法是遥感图像融合常用的方法之一, IHS 变换法的主要原理是:先将多光谱图像经过 IHS 变换得到强度、色度和饱和度分量 I, H, S , 然后用高分辨率的全色图像代替强度分量 I , 再进行 IHS 反变换即得到具有高空间分辨率的多光谱图像, 其融合图像在空间分辨率和清晰度上比原多光谱图像有相当大的提高, 但是由于融合处理过程是直接进行替换, 因此可导致光谱信息的大量丢失。针对传统 IHS 变换法的光谱信息丢失问题, 本文结合第 2 代 Curvelet 变换提出了一种改进算法。其具体处理步骤如下:

(1) 先对低分辨率多光谱图像与高分辨率的全色图像进行配准, 然后将低分辨多光谱图像从 RGB 空间变换到 IHS 空间。

(2) 先对全色图像与强度分量 I 直方图进行匹配, 然后对多光谱图像的强度分量 I 和全色图像分别进行 Curvelet 变换, 而低分辨率多光谱图像的色度、饱和度分量 H, S 则保持不变。

(3) 然后分别对粗尺度的低频子图像与细尺度的高频子带图像进行如下融合处理:

① 对于低频部分处理的主要目的是为了尽可能地保留低分辨率多光谱图像的特征, 同时将高分辨率全色图像的一些特征添加到低分辨率多光谱图像中, 其算法描述如下:

设 $A_{M1}, A_{Pan}, \hat{A}_{M1}$ 分别表示多光谱强度分量的低频部分子图像、高分辨率全色图像的低频部分子图像和融合后多光谱强度分量的低频子图像, 则多光谱图像与全色图像的低频部分共有的特征为

$$A_{un} = \min(A_{M1}, A_{Pan}) \quad (16)$$

全色图像的低频部分的特有特征计算如下:

$$\hat{A}_{Pan} = A_{Pan} - A_{un} \quad (17)$$

融合后的多光谱图像的强度分量的低频部分为

$$\hat{A}_{M1} = A_{M1} + \frac{\text{std}(A_{Pan})}{\text{std}(A_{Pan}) + \text{std}(A_{M1})} \cdot \hat{A}_{Pan} \quad (18)$$

式中, std 表示基于 Curvelet 块的标准偏差。

② 高频子带图像的融合, 计算出的多光谱强度分量图像和高分辨率全色图像经 Curvelet 变换分解后, 再采用替换规则, 即用全色图像的 Curvelet 系数 (设用 $c_{j,l,k}^{Pan}$ 标记第 j 层第 l 方向第 k 位置的子图像系数) 替换多光谱强度分量图像的 Curvelet 系数。

(4) 将融合后的各层 Curvelet 系数 $c_{j,l,k}^{Pan}$ 与融合后的多光谱图像的强度分量的低频部 \hat{A}_{M1} 通过 Curvelet 逆变换进行重构, 即可得到融合的多光谱图像强度分量 \hat{I} 。

(5) 将分量 \hat{I}, H, S 执行 IHS 反变换到 RGB 空间, 即得到最终的高分辨率多光谱融合图像。

4 实验结果与分析

分别以 TM 多光谱图像 (分辨率为 30 m) 与 SPOT 全色图像 (分辨率为 10 m)、QuickBird-2 多光谱图像 (分辨率为 2.8 m) 与全色图像 (分辨率为 0.7 m) 为例来进行实验, 实验时先对多光谱图像与全色图像进行配准, 并重采样到全色图像分辨率, 图像大小为 512×512 , 见图 1(a)、图 1(b) 和图 2(a)、图 2(b)。为比较各种融合方法的融合效果, 分别对 IHS 变换、PCA 变换、Mallat 算法、à trous 算法, IHS 结合 WT 变换等图像融合方法进行了相应实验, 实验中采用的小波为样条正交小波, 小波与 Curvelet 分解层数为 4, 并使用相同的融合规则, 这里仅给出部分融合方法融合结果 (使用替换规则), 分别见图 1(c) ~ 图 1(h) 及图 2(c) ~ 图 2(h)。

通过研究图 1 和图 2 可以发现, 各融合图像均比原始的多光谱图像清晰, 通过对比各融合方法融合结果图像发现, 本文提出的用 Curvelet 变换来改进 IHS 变换的方法, 其融合后的结果图像中各景物表现更自然, 可视效果优于其他融合方法。根据 Wald 等人提出的融合图像评价标准^[10,21], 本文采用如下几个指标从量上对各融合方法进行综合比较。这几个指标分别是: ① 相关系数, 其反映了两幅图像的相关程度, 即两幅图像的相关系数越接近于 1, 表示两幅图像的接近度越好; ② 无量纲的全局误差 (erreur relative adimensionnelle de synthèse, ERGAS) 来说, ERGAS 值从整体上反映了融合图像的质量情况, 其值越小, 融合图像的光谱质量越高, 其定义为

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{RMSE^2(B_i)}{M_i^2} \right)} \quad (19)$$

式中, h 是全色图像的分辨率, l 为多光谱图像的分辨率, N 是融合图像的波段数, M_i 表示波段数为 i 的多光谱图像的像素平均值; ③ 通用的图像质量评价指标 (UIQI)^[22], UIQI 从相关信息损失、像素辐射

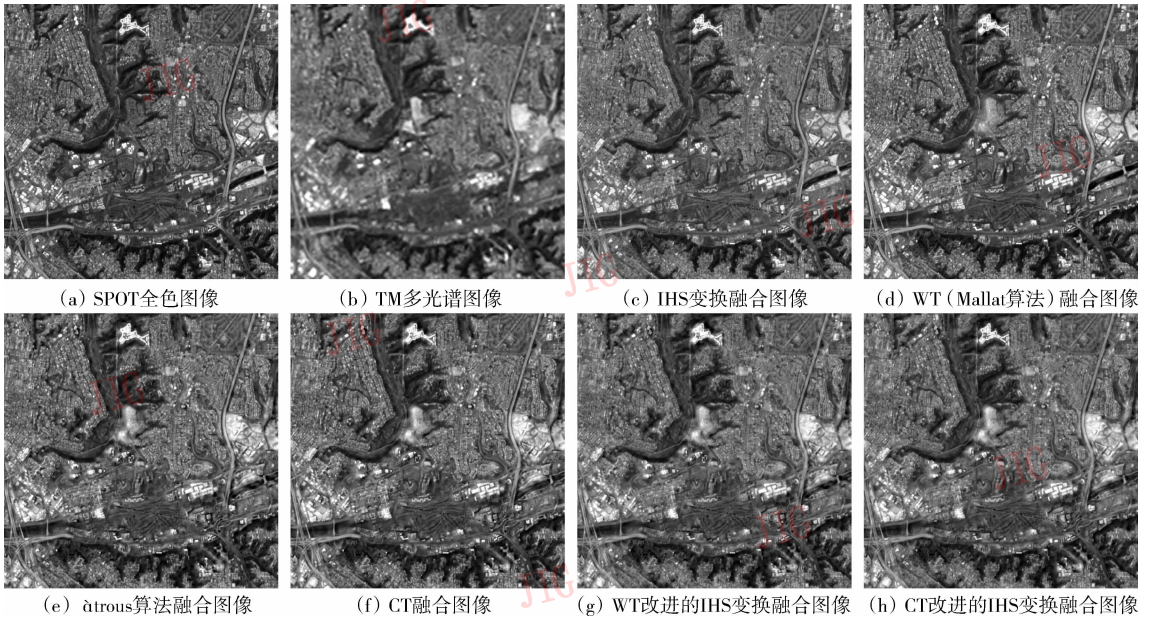


图 1 SPOT 全色图像与 TM 多光谱图像融合结果
Fig. 1 Fusion result on SPOT panchromatic and TM multispectral images

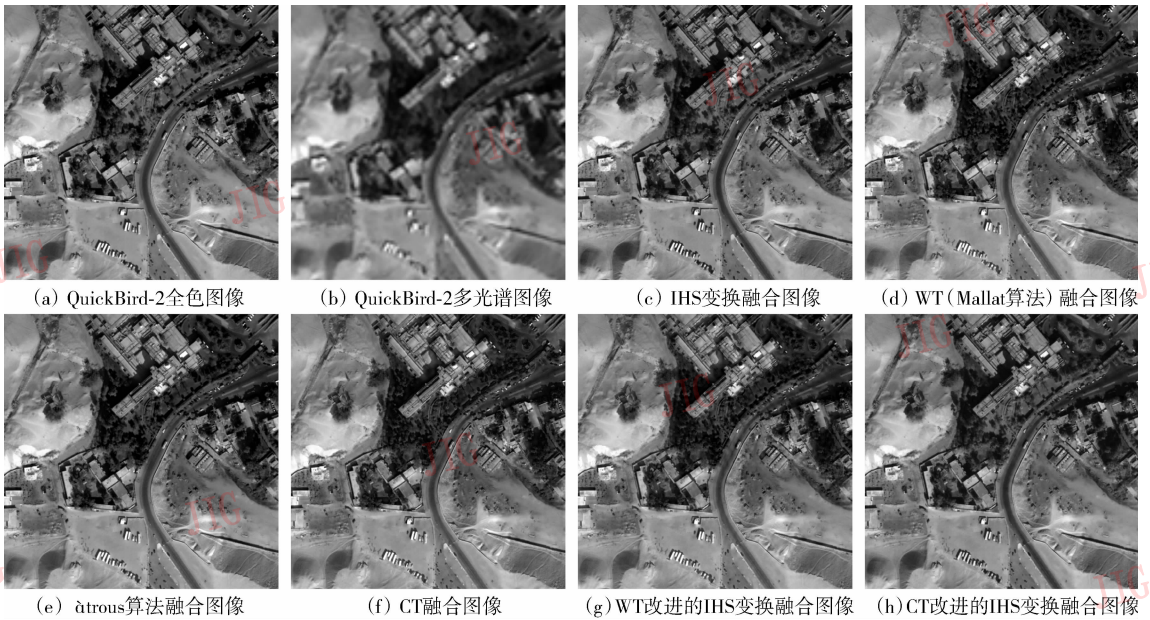


图 2 QuickBird-2 全色图像与多光谱图像融合结果
Fig. 2 Fusion result on QuickBird-2 panchromatic and multispectral images

扭曲和对比度扭曲 3 个方面反映了两幅图像的相似程度,通过比较融合前后图像的 UIQI 值,即可知道它们的相似情况,如果融合前后两幅图像完全一样,则其值应为 1。UIQI 的计算式如下:

$$UIQI = \frac{4\sigma_{XY} \cdot \bar{I}_0 \cdot \bar{I}_F}{(\sigma_{I_0}^2 + \sigma_{I_F}^2) [(\bar{I}_0)^2 + (\bar{I}_F)^2]}$$

式中, \bar{I}_0, \bar{I}_F 分别是原始图像 I_0 、融合图像 I_F 的像素平均值, $\sigma_{I_0}^2, \sigma_{I_F}^2$ 分别是图像 I_0, I_F 的方差, $\sigma_{I_0 I_F}$ 是 I_0 与 I_F 的协方差;④融合计算时间。计算出的相关系数、ERGAS、UIQI 值和融合计算时间见表 1, 表 2, 其中,为了区分各项指标的最佳值,本文用粗体将其标出。

表 1 TM 多光谱图像与 SPOT 全色图像不同融合方法性能评价

Tab. 1 Performance evaluation for different fusion methods of TM multispectral and SPOT panchromatic images

方法	相关系数			UIQI 值			ERGAS 值	计算时间(s)
	波段 1	波段 2	波段 3	波段 1	波段 2	波段 3		
IHS	0.595 7	0.628 6	0.793 9	0.594 0	0.626 0	0.792 1	5.268 8	3.382 395
PCA	0.548 3	0.570 7	0.733 4	0.547 9	0.570 0	0.732 2	4.373 4	0.858 776
WT	0.698 2	0.687 0	0.701 2	0.695 4	0.683 5	0.699 9	3.611 0	8.100 230
àtrous	0.785 0	0.773 5	0.791 3	0.780 8	0.768 8	0.788 8	4.265 7	5.047 886
WT + IHS	0.806 7	0.819 5	0.892 7	0.804 2	0.817 6	0.892 5	2.340 9	5.456 329
CT	0.789 7	0.778 2	0.794 5	0.785 7	0.773 7	0.792 4	3.325 0	391.604 586
CT + IHS	0.811 7	0.824 1	0.895 1	0.809 3	0.822 3	0.894 9	2.279 8	135.955 390

表 2 QuickBird-2 多光谱图像与全色图像不同融合方法性能评价

Tab. 2 Performance evaluation for different fusion methods of QuickBird-2 multispectral and panchromatic images

方法	相关系数			UIQI 值			ERGAS 值	计算时间(s)
	波段 1	波段 2	波段 3	波段 1	波段 2	波段 3		
IHS	0.895 2	0.883 3	0.874 8	0.895 0	0.883 3	0.874 6	1.467 5	3.383 390
PCA	0.888 8	0.883 4	0.884 0	0.888 7	0.888 34	0.883 7	1.447 7	0.859 770
WT	0.934 2	0.925 3	0.910 4	0.932 1	0.922 8	0.908 4	0.806 6	8.100 734
àtrous	0.947 2	0.941 6	0.935 4	0.945 7	0.939 9	0.933 9	1.071 0	5.048 896
WT + IHS	0.951 1	0.947 0	0.944 7	0.949 8	0.945 5	0.943 5	0.715 9	5.457 299
CT	0.948 4	0.943 3	0.937 6	0.947 2	0.941 9	0.936 5	0.775 2	391.618 861
CT + IHS	0.954 7	0.950 4	0.949 3	0.953 6	0.949 2	0.948 1	0.660 4	135.958 451

从表 1 和表 2 的客观评价测值可见:① 3 种指标值的变化趋势是大致相同的, IHS 变换融合方法与 PCA 变换融合方法两者的指标值相当, 处于同一水平, 比其他方法都差;② 在小波变换融合方法中, 基于 àtrous 算法的融合方法好于 Mallat 算法, 若用小波变换(这里采用 Mallat 算法实现)来改进 IHS 变换进行融合, 则融合效果好于 àtrous 算法或 Mallat 算法的融合效果;③ 基于 Curvelet 变换(CT)的融合方法, 除融合时间外, 其余的各指标值均优于其他方法;④ 采用相同的替换规则, 基于 Curvelet 变换的融合结果, 其相关系数、UIQI 指标值均高于采用小波变换的融合结果, 其 ERGAS 值低于小波变换的融合结果;⑤ 用 Curvelet 变换来改进 HIS 变换方法的融合结果, 其相关系数和 UIQI 值最大, ERGAS 值最小, 这表明用 Curvelet 变换结合 IHS 变换方法进行融合后, 其融合图像在光谱信息的保持、像素辐射扭曲和对比度扭曲等几个方面均优于 IHS、PCA、小波变换等其他融合方法。另外, 融合计算过程所需要的时间, 以 PCA 变换融合方法最少, 而使用 Curvelet 变换进行融合需要的时间远高于其他融合方法。实验中还发现, 随着图像数据量的增大, 融合计算所需的时间成倍增长。

由表 1 与表 2 分析可知, 与其他方法相比, 本文提出的基于 Curvelet 变换的改进的 IHS 变换融合方法, 其融合得到的图像具有较低的 ERGAS 值和高的 UIQI 值、相关系数值, 这说明用本文方法融合的图像不仅损失的相关信息最小、像素辐射扭曲和对比度扭曲程度低, 而且与融合前的多光谱图像相似程度最高, 整体上图像融合质量情况优于其他方法。因此, 基于 Curvelet 变换的图像融合方法融合所获得的融合图像较之其他方法, 如小波变换能更好地保留原始图像的有用信息。

5 结 论

有效的图像融合方法应该能很好地保留图像的重要特征, 由于这些特征通常出现在图像不同的位置和不同的尺度上, 因此可用多分辨率分析方法很好地实现这一目标。本文研究了第 2 代 Curvelet 多尺度变换理论, 并将其应用于图像融合, 进而提出了基于 Curvelet 变换的对低分辨率多光谱图像与高分辨率图像进行融合的方法。实践表明, Curvelet 变换对图像几何特征有较优的表达能力, 并可有效地提取原始遥感图像的特征为融合图像提供更多的信

息,同时根据融合实验结果的分析可见,本文提出的基于 Curvelet 变换的融合方法比典型的 IHS、PCA 及 WT 等融合方法可得到更好的融合效果。但是需要指出的是,由于 Curvelet 变换数字实现比较复杂,相比其他的融合方法,在融合计算时需要花费更多的时间,因此实时性较弱。正如文献[13]指出的那样,Curvelet 变换提出的时间虽然不长,对其研究也不如小波变换成熟,但目前的研究成果表明,Curvelet 变换具有良好的发展态势,对图像融合领域来说,这是一个新的非常值得研究的方向。

参考文献 (References)

- Katyal S, Kramer E L, Noz M E, *et al.* Fusion of immunoscintigraphy single photon emission computed tomography (SPECT) with CT of the chest in patients with non small cell lung cancer [J]. *Cancer Research Supplement*, 1995, **55**(12): 5759 ~ 5763.
- Pohl C, Genderen J L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **9**(5): 823 ~ 854.
- Haydn R, Dalke G W, Henkel J, *et al.* Application of the IHS color transform to the processing of multisensor data and image enhancement [A]. In: *Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing of Arid and Semi-Arid Lands* [C], Cairo, Egypt, 1982: 599 ~ 616.
- Yesou H, Besnus Y, Polet Y. Extraction of spectral information from landsat tm data and merger with spot panchromatic imagery—A contribution to the study of Geological structures [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1993, **48**(5): 23 ~ 26.
- Shettigara V K. A generalized component substitution technique for spatial enhancement of multispectral images using a higher resolution data set [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, **58**(5): 561 ~ 567.
- Nunez J, Otazu X, Fors O, *et al.* Multiresolution based image fusion with additive wavelet decomposition [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1999, **37**(3): 1204 ~ 1211.
- Yocky D A. Image merging and data fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet transform [J]. *Journals of Optical Society of American*, 1995, **12A**(9): 1834 ~ 1841.
- Mangolini M, Ranchin T, Waïld L. Fusion d'images SPOT multispectrales (XS) et panchromatique (P) et d'images radar [A]. In: *Proceedings of Conference 'From Optics to Radar: Spot and ERS Application'* [C], Paris, France, 1993: 199 ~ 209.
- Zhang Z, Blum R S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion schemes with a performance study for a digital camera application [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1999, **87**(8): 1315 ~ 1326.
- Wald L, Ranchin T, Mangolini M. Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images [J]. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 1997, **63**(6): 691 ~ 699.
- Donoho D L, Duncan M R. Digital Curvelet transform: strategy, implementation and experiments [A]. In: *Proceedings of SPIE* [C], San Jose, CA, USA: SPIE Press, 2000, **4056**: 12 ~ 30.
- Candès E J, Donoho D L. Curvelets—a surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges [A]. In: *Cohen A, Rabut C, Schumaker L L (Eds). Curve and Surface Fitting: Saint-Malo* [C], Nashville, TN, USA: Vanderbilt University Press, 1999: 1 ~ 10.
- Long Gang, Xiao Lei, Chen Xue-quan. Overview of the applications of curvelet transform in image processing [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, **42**(8): 1331 ~ 1337. [隆刚, 肖磊, 陈学. Curvelet 变换在图像处理中的应用综述 [J]. *计算机研究与发展*, 2005, **42**(8): 1331 ~ 1337.]
- Starck J L, Candes E J, Donoho D L. The Curvelet transform for image denoising [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(6): 670 ~ 684.
- Starck J L, Murtagh F, Candes E J, *et al.* Gray and color image contrast enhancement by the Curvelet transform [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, **12**(6): 706 ~ 717.
- Choi M, Kim R Y, Kim M G. The Curvelet transform for image fusion [EB/OL]. <http://amath.kaist.ac.kr/research/paper/04-12.pdf>, 2004, 12.
- Choi M, Kim R Y, Nam M R, *et al.* Fusion of multispectral and panchromatic satellite images using the Curvelet transform [J]. *IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters*, 2005, **2**(2): 136 ~ 140.
- Candès E J, Donoho D L. New tight frames of curve lets and optimal representations of objects with C^2 singularities [J]. *Communication on Pure and Application of Math*, 2004, **57**(2): 219 ~ 266.
- Candès E J, Demanet L, Donoho D L, *et al.* Fast Discrete Curvelet Transforms [R]. Stanv, CA, USA: Applied and Computational Mathematics California Institute of Technology, 2005: 1 ~ 43.
- Li Hui-hui, 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 2 代 Curvelet 变换的图像融合研究 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 657 ~ 662.]
- Wald L. Quality of high resolution synthesized images: Is there a simple criterion? [A]. In: *Proceedings International Conference on Fusion of Earth Data* [C], Nice, France, 2000, **1**: 99 ~ 105.
- Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index [J]. *IEEE Signal Process Letter*, 2002, **9**(3): 81 ~ 84.