

基于非抽样剪切波变换的遥感图像融合方法*

高国荣^{1,2} 许录平¹ 冯冬竹¹

(1. 西安电子科技大学工程学院, 西安 710071; 2. 西北农林科技大学理学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 提出了一种基于 Mean-shift 分割和非抽样剪切波变换(NSST)的多光谱与高分辨率全色图像融合方法。对高分辨率图像进行 Mean-shift 分割,并利用区域方差将多光谱图像划分为需要进行空间细节增强及需要光谱特征保持的区域;然后利用 NSST 变换对高分辨率图像和多光谱图像的强度分量进行多尺度分解。分解后的低频子带采用基于四阶相关系数的融合规则进行融合,带通方向子带根据分割所得的区域按区域方差进行融合;最后进行 NSST 重构得到融合后的强度分量,经 IHS 逆变换获得高分辨率的多光谱图像。仿真实验表明,与其他 4 种相关的融合方法相比,该方法能在空间分辨率的提高与光谱信息的保持之间达到良好的平衡,使得融合图像不仅具有较好的光谱保持特性,而且其空间分辨率也能得到有效提高。

关键词: 多光谱图像 非抽样剪切波变换 融合

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0221-06

Fusion Method in Remote Sensing Image Based on NSST

Gao Guorong^{1,2} Xu Luping¹ Feng Dongzhu¹

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2. College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: A multispectral and panchromatic image fusion algorithm based on mean-shift segmentation and the non-subsampled shearlet transform (NSST) was presented. Mean-shift segmentation was performed on the panchromatic image, and the variance of each region was used to distinguish the multispectral image into regions that need to be spatially enhanced or not. Then, the multi-scale NSST was performed on the panchromatic image and the intensity component of the multispectral image. The low frequency components were fused based on the fourth-order correlation coefficient, and the band-pass frequency components were fused based on the variances of the segmented regions. At last, the fused intensity component was obtained by reconstruction of those fused components, and the inverse IHS transform was performed to obtain the fused high resolution multispectral image. Experimental results indicated that the proposed image fusion method could keep a balance between spectral preservation and spatial enhancement.

Key words: Multispectral image Non-subsampled shearlet transform Fusion

引言

高空间分辨率全色图像(PAN)与多光谱图像(MS)是由不同成像系统获得的、分别具有较高空间分辨率和较高光谱分辨率的图像。全色图像反映了

目标场景的空间结构信息,能详尽地表达地物的细节特征,可以准确地获得目标的细节信息,但光谱信息缺失;多光谱图像具有丰富的光谱信息,有利于对地物的识别与解译,可以方便地辨识不同的地物,但其空间分辨率较低。图像融合技术可以将全色图像

收稿日期: 2012-12-24 修回日期: 2013-01-10

* 国家自然科学基金资助项目(61172138,61203202)

作者简介: 高国荣,博士生,西北农林科技大学讲师,主要从事多尺度几何分析及数字图像处理研究,E-mail: lypggr@yahoo.com.cn

通讯作者: 许录平,教授,博士生导师,主要从事信息融合技术及其应用研究,E-mail: xd203@yahoo.com.cn

与多光谱图像间的互补信息有机地结合起来,从而获得具有较高空间分辨率和光谱分辨率的图像,在尽可能保留多光谱图像光谱特性的前提下,有效提高图像的空间细节表现能力,在土地利用调查、城区识别和森林资源调查等遥感应用领域中有着广泛的应用^[1]。

目前,PAN与MS图像融合的方法主要有基于IHS变换、基于主成份分析(PCA)以及基于多尺度分解的融合方法^[2-5]等。IHS变换法得到的融合图像空间分辨率较高,但其光谱信息损失严重;PCA变换法适合于多光谱图像的所有波段,虽然增加了融合结果图像的空间表现力,但其光谱分辨力受到很大影响。近年来,基于多尺度分解的图像融合技术有较大发展,常用的多尺度分解工具有小波变换^[2]、轮廓波变换^[3]以及非下采样轮廓波变换(NSCT)^[5-6]等。由于小波变换只能捕获图像中有限的方向信息,且缺乏平移不变性,因此不能高效地表示自然图像中的边缘、轮廓等细节信息;轮廓波变换虽然具有多分辨率、局域化、多方向性和各向异性等特征,但仍然缺乏平移不变性;NSCT虽然具有平移不变性,能对图像进行有效而稀疏的表示,然而其实现过程相对较复杂。剪切波变换^[7]是一种新的多尺度几何分析方法,相对于轮廓波和NSCT,剪切波变换在实现过程中没有分解方向数目和支撑基尺寸大小的限制,而且其逆变换只需对正向变换中的剪切滤波器进行加和处理,而不需要像轮廓波变换和NSCT那样对方向滤波器进行逆合成,从而具有更高的实现效率。非抽样剪切波变换^[8](NSST)是一种具有平移不变性的剪切波变换的实现方式。由于该变换具有平移不变性且具有较强的方向选择特性,因此可以有效提取源图像中的有用信息,使得融合后的图像能更好地满足后续各种应用的要求。目前,已有一些作者将其应用于多源图像的融合中,并取得了良好的效果^[9]。

本文提出一种IHS彩色空间域基于区域分割与NSST变换的PAN与MS图像融合方法。将四阶相关系数^[5]作为低频子带系数的融合依据,同时利用Mean-shift方法^[10]对源PAN图像进行区域分割,在此基础上利用区域方差指导带通方向子带系数的选取。

1 非抽样剪切波变换

对 $\forall \xi = (\xi_1, \xi_2) \in \mathbf{R}^2, \xi_1 \neq 0$,令 ψ 的傅里叶变换 $\hat{\psi}(\xi) = \hat{\psi}(\xi_1, \xi_2) = \hat{\psi}_1(\xi_1) \hat{\psi}_2\left(\frac{\xi_2}{\xi_1}\right)$,其中 ψ_1, ψ_2 满足:

(1) $\psi_1 \in L^2(\mathbf{R}^2)$,且对几乎所有的 $\xi \in \mathbf{R}$ 满足 Calderón 容许性条件: $\int_0^\infty \frac{|\hat{\psi}_1(a\xi)|^2}{a} da = 1$,其中 $\sup \hat{\psi}_1 \subset \left[-2, -\frac{1}{2}\right] \cup \left[\frac{1}{2}, 2\right]$ 。

(2) $\|\psi_2\|_{L^2} = 1, \sup \hat{\psi}_2 \subset [-1, 1]$;则对 $\forall a > 0, s \in \mathbf{R}, t \in \mathbf{R}^2$,图像 $f \in L^2(\mathbf{R}^2)$ 的剪切波变换定义为

$$SH_{\psi} f(a, s, t) = \langle f, \psi_{ast} \rangle \quad (1)$$

其中, $\psi_{ast}(x) = |\det \mathbf{M}_{as}|^{-\frac{1}{2}} \psi(\mathbf{M}_{as}^{-1}(x-t))$, $\mathbf{M}_{as} = \begin{bmatrix} a & -\sqrt{as} \\ 0 & \sqrt{a} \end{bmatrix}$ 。称 $\{\psi_{ast}(x) : a > 0, s \in \mathbf{R}, t \in \mathbf{R}^2\}$ 为连续剪切波系统。每个矩阵 \mathbf{M}_{as} 可以分解为一个剪切矩阵 $\mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} 1 & -s \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 与一个各向异性的膨胀矩阵 $\mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & \sqrt{a} \end{bmatrix}$ 的乘积,即 $\mathbf{M}_{as} = \mathbf{B}_s \mathbf{A}_a$ 。因此,每个矩阵 \mathbf{M}_{as} 就包含了2种不同的操作:由膨胀矩阵 \mathbf{A}_a 所对应的各向异性的伸缩以及由剪切矩阵 \mathbf{B}_s 所对应的剪切。

图像 f 可以由其对应的剪切波变换进行重构,其重构公式为

$$f(x) = \int_{\mathbf{R}^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} \langle f, \psi_{ast} \rangle \psi_{ast}(x) \frac{da}{a^3} ds dt \quad (2)$$

NSST的离散化过程主要分两步^[9]:多尺度剖分和方向局部化。多尺度剖分是通过非下采样金字塔滤波器组实现的,而方向局部化则是通过剪切滤波器实现的。标准剪切波变换中使用的剪切滤波器是在伪极化网格中通过窗函数的平移操作实现的,此过程中有下采样操作,因而不具有平移不变性。NSST把标准的剪切滤波器从伪极化网格系统映射回到笛卡尔坐标系统,避免了下采样操作,因而具有平移不变性。具体实现过程如下:①用非下采样金字塔分解将图像分解为低通图像和细节图像。②对细节图像构建Meyer窗,进行多尺度剖分,获得不同的方向子带。③对每一个方向子带进行傅里叶逆变换,从而得到非抽样剪切波系数。

2 Mean-shift 图像分割算法

Mean-shift^[10]是一种无参数核密度估计的迭代算法,其核心是对特征空间的样本点进行聚类,样本点沿梯度上升方向收敛至密度梯度为零的点即模态点。设 \mathbf{x} 表示图像中节点的特征向量,考虑到图像的空间信息和灰度或颜色信息,每一个节点的特征向量表示为 $\mathbf{x} = (x^r, x^s)$,其中 x^s 表示节点的坐标, x^r

表示该节点的灰度或颜色。设 $\{x_i\} (i=1, 2, \dots, n)$ 为图像空间中任意包含 n 点的特征向量的集合 S_h , 在点 x 处, 定义向量

$$M_h(x) = \frac{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \omega(x_i) x_i}{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \omega(x_i)} - x \quad (3)$$

式中 $K(x)$ ——核函数 h ——窗口宽度
 $\omega(x_i)$ ——采样点 x_i 的权重

通常, 离 x 较近的采样点被赋予较大的权重, 即离 x 越近的采样点对估计 x 周围的统计特性越有效, 反之亦然。

将式(3)中右边第一项记为 $m_h(x)$, 即

$$m_h(x) = \frac{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \omega(x_i) x_i}{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \omega(x_i)} \quad (4)$$

从初始节点开始, 进行 Mean-shift 迭代, 对未标记节点 x , 计算 $m_h(x)$ 并将其赋给 x , 并计算下一点的 $m_h(x)$, 重复这个过程, 直到满足终止条件 $\|m_h(x) - x\| < \varepsilon$ 为止。将从初始点开始所经过的所有节点赋予同一个标记。若在此过程中计算得到的下一节点已经被标记, 则迭代停止, 将从起始节点开始所经过的所有节点都赋予与该标记过的节点相同的标记。重复这个过程, 直到所有节点都被标记。

3 融合算法

全色图像与多光谱图像融合的具体步骤:

(1) 对全色 PAN 图像和多光谱 MS 图像进行配准。

(2) 将 MS 图像由 RGB 彩色空间转换到 IHS 彩色空间。

(3) 对 PAN 图像和 MS 图像的强度分量 I 进行直方图匹配。

记 MS 图像的强度分量为 I , 其均值为 μ_1 , 标准差为 σ_1 ; PAN 图像为 P , 其均值为 μ_2 , 标准差为 σ_2 ; 直方图匹配后的 PAN 图像为 P' , 则直方图匹配方法为^[11]

$$P' = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} (P - \mu_2) + \mu_1 \quad (5)$$

(4) 对 I 分量和直方图匹配后的 PAN 图像 P' 进行融合, 得融合图像的强度分量 I_F ; 具体融合方法如下: ①对 MS 图像的强度分量 I 和直方图匹配后的 PAN 图像 P' 进行多尺度 NSST 变换, 分别得到一个低频子带图像和多个带通方向子带图像。②对由

①得到的低频子带图像和带通方向子带图像, 分别采用不同的融合规则进行融合。③对经融合处理的低频子带系数与各带通方向子带系数进行 NSST 逆变换, 得到融合增强后的强度分量 I_F 。

(5) 对步骤(4)所得的强度分量 I_F 、源 MS 图像的 H 分量和 S 分量, 由 IHS 彩色空间转换到 RGB 彩色空间, 得到融合后的多光谱图像。

融合规则直接决定最终融合效果, 因此, 它是图像融合算法的核心。由于 NSST 分解后的低频子带和带通方向子带的物理意义不同, 因此在融合时就应该采用不同的融合规则来处理。

图像经 NSST 分解后的低频子带系数可视为对原始图像的近似描述。多光谱图像与高空间分辨率全色图像融合的目的是要在尽可能保持多光谱图像光谱特征的前提下, 通过有效注入高空间分辨率全色图像中的空间细节信息, 来提高多光谱图像的空间分辨率。文献[12]指出, 低频子带系数的融合方式不仅对融合结果图像的光谱特征有较大影响, 而且对其空间分辨率也有一定的影响。因而在 NSST 域对 MS 图像的强度分量 I 与 PAN 图像融合时, 如果仅仅采用加权平均法来获得融合图像的低频子带系数, 就会在一定程度上改变所得融合图像的光谱信息, 引起最终所得融合图像彩色信息的畸变; 如果简单地将 MS 图像的 I 分量所对应的低频分量作为融合图像的低频分量^[2], 这样虽然能使融合图像的光谱信息尽可能地保持不变, 却会在一定程度上降低最终所得融合图像的空间分辨率。为了在保持融合图像的光谱信息与提高融合图像的空间分辨率之间达到平衡, 本研究采用局部四阶相关系数^[5]来确定融合图像的低频子带系数。四阶相关系数相对于基于二阶矩的相关系数来说, 具有更多的优点, 从而可以更好地度量两幅图像之间的相关性, 其定义为

$$C_{A,B} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A(i,j) - \mu_A)^2 (B(i,j) - \mu_B)^2}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A(i,j) - \mu_A)^4 \right] \left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (B(i,j) - \mu_B)^4 \right]}} \quad (6)$$

式中 μ_A, μ_B ——图像 A 与 B 的均值

对于任意像素 (i, j) , 考虑以像素 (i, j) 为中心, 大小为 $M \times N$ 的窗口, 计算该窗口内 MS 图像的 I 分量所对应的低频子带系数与 PAN 图像所对应的低频子带系数的局部四阶相关系数 $C(i, j)$ 。如果 $C(i, j)$ 较大, 说明对应位置处两幅图像的低频子带系数具有很强的相关性, 此时将 MS 图像的 I 分量

所对应的低频子带系数 $l_{MS}^L(i, j)$ 作为融合图像对应位置的低频子带系数 $l_F^L(i, j)$, 从而可以使得融合图像对应位置的光谱信息保持不变, 并能在一定程度上保持 PAN 图像的空间分辨率; 如果 $C(i, j)$ 较小, 说明对应位置处两幅图像的低频子带系数相关性很弱, 从而在源 PAN 图像内, 该位置很可能对应着较强的空间细节信息; 为了使得融合图像的空间分辨率得到有效提高, 该位置的低频子带系数应来自 PAN 图像对应位置的低频子带系数 $l_{PAN}^L(i, j)$ 。具体融合规则为

$$l_F^L(i, j) = \begin{cases} l_{MS}^L(i, j) & (C(i, j) > \lambda) \\ l_{PAN}^L(i, j) & (\text{其他}) \end{cases} \quad (7)$$

式中 λ ——给定的阈值

图像经 NSST 分解后的带通方向子带系数主要包含图像在各个方向的边缘细节信息。带通方向子带系数融合的目的是: 一方面要尽可能地获取高分辨率图像的空间细节信息; 另一方面要在那些无需空间增强的区域保留多光谱图像的光谱信息, 以最大限度地减少融合图像的光谱失真。本文利用 Mean-shift 分割算法分割 PAN 图像所得到的不同区域内的灰度方差来指导带通方向子带系数的融合。对于分割得到的某一区域, 如果其方差较小, 则说明该区域比较平滑, 没有较多的细节信息, 从而无需对其进行空间细节增强, 该区域带通方向子带系数的融合应侧重于保持该区域多光谱图像的光谱信息, 因此融合图像在该区域内的带通方向子带系数应来自多光谱图像 I 分量所对应的带通方向子带系数; 否则, 如果其方差较大, 则说明该区域包含了较多的空间细节信息, 从而该区域就是需要进行空间细节增强的区域, 融合图像在该区域内的带通方向子带系数就应来自 PAN 图像所对应的带通方向子带系数; 从而可以在光谱信息保持与空间细节信息增强之间达到较好的平衡。带通方向子带系数的融合规则为

$$d_F^{m,n}(i, j) = \begin{cases} d_{MS}^{m,n}(i, j) & (\sigma_s < \mu) \\ d_{PAN}^{m,n}(i, j) & (\text{其他}) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $d_{MS}^{m,n}(i, j)$ 、 $d_{PAN}^{m,n}(i, j)$ 、 $d_F^{m,n}(i, j)$ ——源 MS 图像的 I 分量、PAN 图像以及融合图像的 I 分量在 m 尺度、 n 方向的带通方向子带系数

σ_s ——分割所得包含像素 (i, j) 区域的方差

μ ——阈值

4 仿真实验与结果分析

为了验证本文融合算法的有效性, 选取两组同

一场景的高分辨率全色图像与多光谱图像进行融合实验, 并与 IHS 变换法、基于 PCA 的融合方法, 文献[2]以及文献[5]的方法进行对比融合实验。其中, 文献[2]的方法采用 db4 小波进行两层小波分解; 文献[5]中的 NSCT 分解以及本文的 NSST 分解参数均为 2、2、3、3。

图 1a、1b 与图 2a、2b 为两组源高分辨率全色图像与多光谱图像, 图 1c ~ 1g 与图 2c ~ 2g 为分别采用不同融合方法得到的融合结果图像。从融合图像的视觉效果上看, 基于 IHS 变换与基于 PCA 的融合方法的融合结果图像虽然都较好地继承了源高分辨率全色图像的空间细节信息, 具有较高的空间分辨率, 但其光谱失真都非常严重; 而文献[2]的方法融合的结果虽然较好保留了源多光谱图像的光谱信息, 光谱信息保持的较好, 但融合图像较模糊, 其空间分辨率很低; 文献[5]的方法与本文方法都既很好地继承了源多光谱图像的光谱信息, 又有效保持了源 PAN 图像较高的分辨率, 其视觉效果非常接近、且都优于前 3 种方法融合的结果。比较图 1f 与 1g 对应方框内的图像可以发现: 本文方法所得的融合结果图像在空间分辨率以及光谱信息的保持上都优于文献[5]方法所得的结果。

对于高分辨率全色图像与多光谱图像融合结果, 除了用目视效果这种简单有效的定性评价外, 还可以采用相应的评价指标进行定量的分析与评价。本文采用相对平均光谱误差指数 (RASE)、相对整体维数综合误差 (ERGAS)^[2,5]、融合图像与全色图像 PAN 经过高通滤波后的相关系数的均值 (SCC)^[12] 以及融合图像空间频率 (SF)^[13] 4 个指标来客观定量地评价融合图像光谱信息的保持程度和空间分辨率的提高程度。RASE 与 ERGAS 反映了融合图像保持源多光谱图像光谱信息的程度, 它们的值越小, 说明融合图像光谱信息的保持就越好; SCC 反映了融合图像保持源高分辨率全色图像空间细节信息的程度, 其值越大, 说明融合结果图像空间细节信息的保持就越好, 其空间分辨率就越高; SF 反映了融合结果图像空间总体活跃的程度, 其值越大, 表明融合图像越清晰。

表 1 与表 2 分别给出了不同融合方法对 2 组源图像融合结果的客观评价指标。从表 1 与表 2 可以看出: 基于 IHS 变换与基于 PCA 的融合方法, 其融合所得的结果图像空间分辨率是最高的, 然而光谱信息的畸变却非常严重; 而文献[2]的融合方法, 其光谱信息的保持是最好的, 然而其空间分辨率却最差。这说明, 这些融合方法都难以在空间分辨率的提高与光谱信息的保持之间达到较好的平衡, 融合

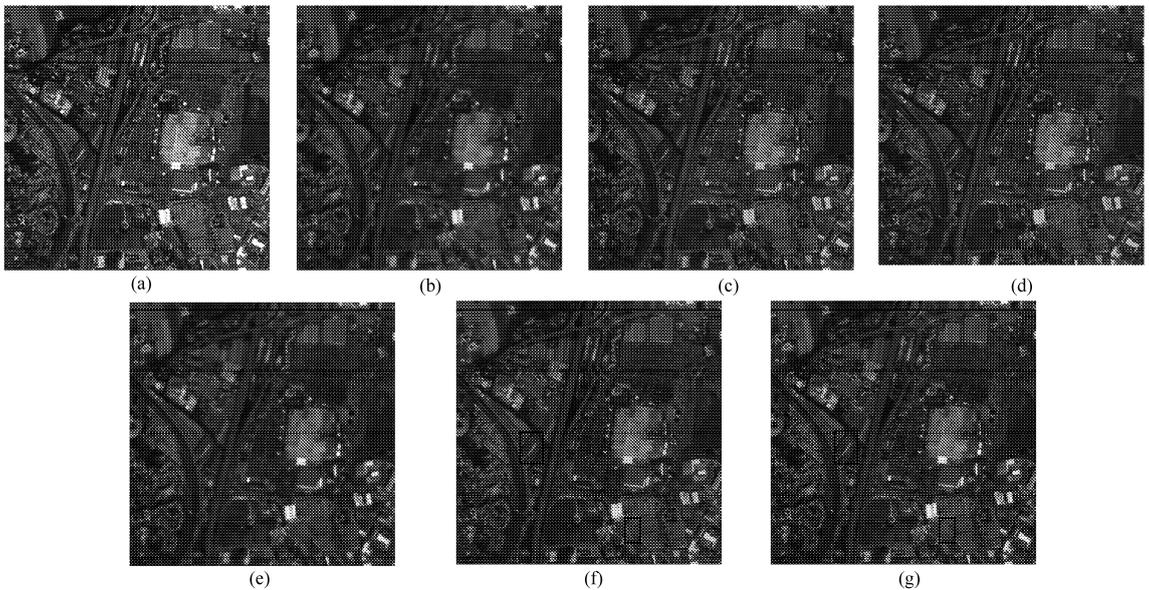


图 1 第 1 组源图像以及不同方法融合的结果图像

Fig. 1 The first group source images and fusion images of different algorithms

(a) 源 PAN 图像 (b) 源 MS 图像 (c) IHS 变换融合图像 (d) PCA 变换融合图像
(e) 文献[2]融合图像 (f) 文献[5]融合图像 (g) 本文方法融合图像

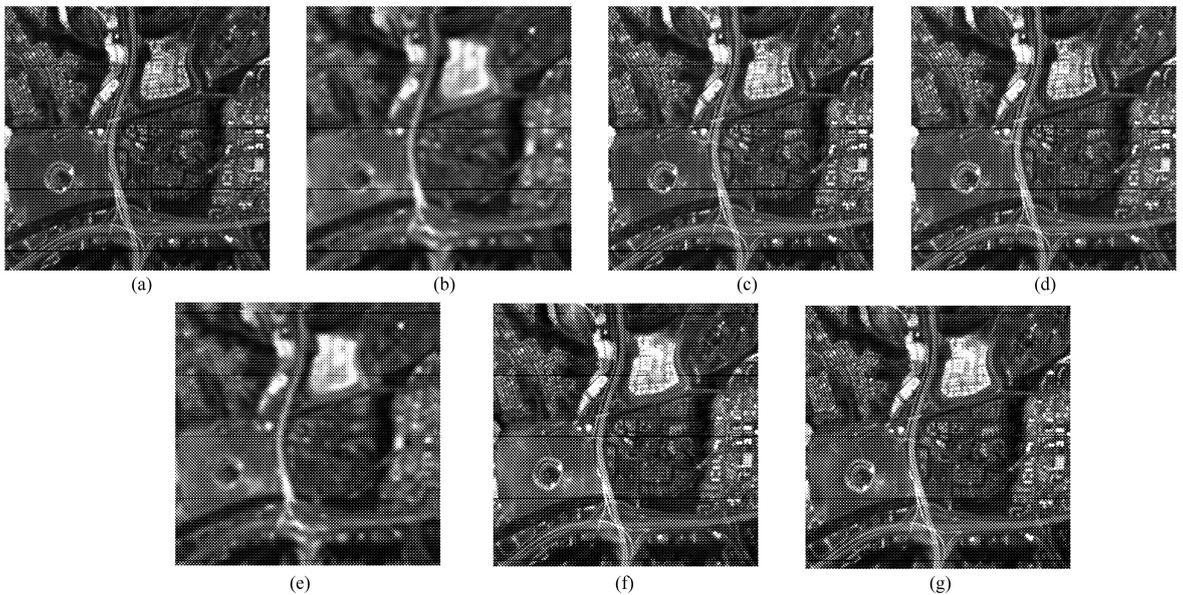


图 2 第 2 组源图像以及不同方法融合的结果图像

Fig. 2 The second group source images and fusion images of different algorithms

(a) 源 PAN 图像 (b) 源 MS 图像 (c) IHS 变换融合图像 (d) PCA 变换融合图像
(e) 文献[2]融合图像 (f) 文献[5]融合图像 (g) 本文方法融合图像

图像空间分辨率的有效提高必然伴随着光谱信息的较大失真;同样的,融合图像光谱信息的有效保持也必然伴随着空间分辨率提高的不足。而本文方法以及文献[5]的融合结果,却在融合图像空间分辨率的提高与光谱信息的保持之间达到了较好的平衡,使得融合图像不仅具有较好的光谱保持特性,而且其空间分辨率也得到了有效的提高。而且,本文方法融合所得结果,其各项评价指标优于文献[5]所得的结果,这说明本文方法在空间细节信

息的增强与光谱信息的保持上都优于文献[5]的方法。

不同融合方法在同一平台上的耗时情况如表 3 所示。结合表 3 可以得出,虽然基于 IHS 变换、基于 PCA 以及文献[2]的融合方法耗时相对较少,但是由于其融合效果都欠佳,因此不是十分有效的融合算法;而相对于融合效果较好的文献[5]的方法而言,本文方法不仅耗时更少,而且其融合效果也更优。

表1 第1组图像不同算法的融合性能比较

Tab.1 Fusion performance comparison of different algorithms on the first group source image

评价指标	IHS	PCA	文献[2]	文献[5]	本文
	变换法	变换法	方法	方法	方法
SF	11.216 3	9.212 4	6.603 0	8.285 6	8.296 8
SCC	0.992 5	0.970 2	0.634 3	0.963 4	0.967 8
RASE/%	24.94	25.67	0.48	1.70	1.57
ERGAS	0.300	0.300	0.007	0.025	0.023

表2 第2组图像不同算法的融合性能比较

Tab.2 Fusion performance comparison of different algorithms on the second group source image

评价指标	IHS	PCA	文献[2]	文献[5]	本文
	变换法	变换法	方法	方法	方法
SF	13.216 3	13.331 5	8.883 1	13.119 5	13.344 5
SCC	0.995 9	0.998 5	0.659 7	0.972 0	0.983 1
RASE/%	15.28	18.96	1.53	3.59	3.42
ERGAS	0.180	0.220	0.015	0.038	0.035

上述的所有评价指标表明,本文所提出的融合方法不仅其融合效果要好于参与比较的其他4种方法,而且在耗时上也要大大少于效果相对较好的文献[5]所提出的融合方法。

表3 不同算法的运行时间比较

Tab.3 Running time comparison of different algorithms

源图像	IHS	PCA	文献[2]	文献[5]	本文
	变换法	变换法	方法	方法	方法
第1组	1.400 8	8.791 1	1.649 8	131.509 7	28.161 2
第2组	0.597 0	1.783 0	1.397 3	32.534 0	6.117 5

5 结束语

提出了一种结合区域分割与 NSST 变换的 MS 与 PAN 图像融合方法,通过 Mean-shift 分割源 PAN 图像,并根据分割区域内的方差将源图像划分为需要进行空间细节信息增强以及需要保持光谱特性的区域;再利用 NSST 对 PAN 图像和 MS 图像的强度分量进行多尺度分解,最后根据四阶相关系数以及区域方差对分解后的 PAN 图像和 MS 图像的强度分量进行融合重构,最终得到高分辨率的多光谱图像。仿真实验表明,本文所提出融合算法能在空间分辨率的提高与光谱信息的保持之间达到较好的平衡,使得融合图像不仅具有较好的光谱保持特性,而且其空间分辨率也能得到有效提高。

参 考 文 献

- 1 时海亮,方敏,梁锦锦.基于非亚采样 Contourlet 和 SWT 的多光谱图像和全色图像的融合算法[J].电子与信息学报,2009,31(1):124~128.
- 2 María G A, José L S, Raquel G C, et al. Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(6):1 291~1 299.
- 3 Choi M J, Kim R Y, Nam M R, et al. Fusion of multispectral and panchromatic satellite images using the curvelet transform [J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE, 2005, 2(2):136~140.
- 4 Shah V P, Younan N H, King R L. An efficient pan-sharpening method via a combined adaptive PCA approach and contourlets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(5):1 323~1 335.
- 5 Mahyari A G, Yazdi M. Panchromatic and multispectral image fusion based on maximization of both spectral and spatial similarities [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(56):1 976~1 985.
- 6 冯鑫,王晓明,党建武,等.基于改进非下采样轮廓波的图像融合算法[J].农业机械学报,2012,43(12):192~196. Feng Xin, Wang Xiaoming, Dang Jianwu, et al. Image fusion algorithm based on improved nonsubsampling contourlet [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):192~196. (in Chinese)
- 7 Guo K, Labate D. Optimally sparse multidimensional representation using shearlets [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 2007, 39(1):298~318.
- 8 Easley G R, Labate D, Wang Q L. Sparse directional image representations using the discrete shearlet transform [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2008, 25(1):25~46.
- 9 王雷,李彬,田联房.基于平移不变剪切波变换的医学图像融合[J].华南理工大学学报,2011,39(12):13~19. Wang Lei, Li Bin, Tian Lianfang. Medical image fusion based on shift-invariant shearlet transformation [J]. Journal of South China University of Technology, 2011, 39(12):13~19. (in Chinese)
- 10 周家香,朱建军,马慧云,等.改进的 Mean-shift 遥感影像分割方法[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(2):620~625. Zhou Jiexiang, Zhu Jianjun, Ma Huiyun, et al. Improved Mean-shift segmentation approach for remote sensing images [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(2):620~625. (in Chinese)
- 11 Kong W, Lei Y, Lei Y, et al. Fusion technique for grey-scale visible light and infrared images based on non-subsampling contourlet transform and intensity-hue-saturation transform [J]. IET Signal Processing, 2011, 5(1):75~80.
- 12 刘斌,彭嘉雄.基于非下采样三通道不可分对称小波的多光谱图像融合[J].电子学报,2011,39(5):1 094~1 099. Liu Bin, Peng Jiexiong. Multi-spectral image fusion method based on nonsubsampling three channels nonseparable symmetrical wavelets [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(5):1 094~1 099. (in Chinese)
- 13 Li S T, Kwok J T, Wang Y N. Combination of images with diverse focuses using the spatial frequency [J]. Information Fusion, 2001, 2(3):169~176.