

文章编号: 2095-4980(2020)03-0470-07

## 基于信息量制约的遥感图像融合算法

王芳<sup>1</sup>, 陈燕<sup>2</sup>

(1.重庆商务职业学院 出版传媒系, 重庆 401331; 2.四川大学 空天科学与工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 为了改善遥感图像的融合质量, 制定了信息量制约法则用于获取融合遥感图像。利用亮度-色调-饱和度(IHS)变换从多光谱(MS)图像中获取亮度(I)分量。基于非下采样剪切波变换(NSST), 获取 I 分量与全色(PAN)图像完成分解, 得到 I 分量与 PAN 图像的高低频系数。最后, 利用低频系数的均值以及区域能量信息, 建立信息量制约法则, 分析不同低频系数对融合系数的影响程度, 设计不同的融合方法对这些低频系数进行融合。采用改进的平均梯度度量模型完成高频系数融合。通过 NSST 逆变换对计算融合后的高低频系数, 输出新的亮度分量, 将其与原始的色调(H)、饱和度(S)分量组合, 通过 IHS 逆变换, 获取融合结果。实验数据显示, 相对已有的融合算法, 所提算法的融合图像所含的信息量更为丰富, 且光谱扭曲度更小。

**关键词:** 遥感图像融合; 非下采样剪切波变换; 信息量制约; 区域能量; 平均梯度; 光谱扭曲  
**中图分类号:** TN911.73; TP391      **文献标志码**      **doi:** 10.11805/TKYDA2019127

## Remote sensing image fusion algorithm based on information constraint

WANG Fang<sup>1</sup>, CHEN Yan<sup>2</sup>

(1.Department of Publishing and Media, Chongqing Business Vocational College, Chongqing 401331, China;  
2.School of Manufacturing Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

**Abstract:** In order to improve the fusion quality of remote sensing image, a remote sensing image fusion algorithm based on non-downsampling shear wave transform coupled information quantity restriction rule is proposed. Multi-Spectral(MS) images are decomposed by using Intensity-Hue-Saturation(IHS) transformation to extract the brightness (I) component of MS images. Then, based on non-downsampling shear wave transform, I component and PANchromatic(PAN) image are decomposed to obtain high and low frequency coefficients. Finally, using the mean value of low-frequency coefficients and regional energy information, the information quantity restriction rule is established, and the influence degree of different low-frequency coefficients on fusion coefficients is analyzed. Different fusion methods are designed to fuse these low-frequency coefficients. The improved average gradient measurement model is adopted to finish the fusion of high frequency coefficients. The fused high and low frequency coefficients are computed by the inverse transformation of Non-Subsampled Shearlet Transform(NSST), and new brightness components are output. The fused remote sensing images are formed by combining them with the original Hue and Saturation components through the inverse transformation of IHS. The experimental results show that compared with the existing fusion scheme, the fusion image of the proposed algorithm contains more information and less spectral distortion.

**Keywords:** remote sensing image fusion; non-downsampling Shearlet transform; information constraints; regional energy; average gradient; spectral distortion

遥感图像已用于包括地形地貌识别、大气环境检测以及土地资源规划在内的多个领域。受制于当前传感器技术, 人们获取到的单幅遥感图像不能同时含有较好的光谱与空间分辨力<sup>[1-2]</sup>。得益于计算机科学技术的发展,

收稿日期: 2019-04-16; 修回日期: 2019-07-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1300704); 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2018jcyjAX0301); 2019 重庆市教委科技项目重点项目(KJZD-K201904401)

作者简介: 王芳(1978-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为图像处理、遥感测绘、大数据。email:WangF1978pro@126.com

可通过遥感图像融合技术解决该问题。近年来，国内外较多学者们对其进行了研究，并提出了大量的遥感图像融合算法。如 Zhang 等<sup>[3]</sup>为了更好地描述各种地面物体，设计了一种采用复小波变换的遥感图像融合算法，通过复小波变换获取不同图像系数，构造了一种基于聚类和谐相异的自适应显著性检测方法，对遥感图像进行融合。这种方法能够融合遥感图像，但复小波变换受多方向选择的约束，融合图像具有光谱变形及模糊现象。赵学军等<sup>[4]</sup>将 MS 图像和 PAN 图像经 Shearlet 变换以及稀疏表示分解为低频与高频系数，以图像能量值为依据，分别采用比较取大法和脉冲神经网络(Pulse Coupled Neural Network, PCNN)方法融合低频及高频系数。这种方法具有较快的遥感图像融合速度，且能够克服小波变换受多方向选择约束，使分解所得系数能够较好保持光谱等信息，但由于其采用了比较取大法对系数进行融合，没有考虑不同低频系数对融合效果的影响，使融合图像含有振铃现象。Khateri 等<sup>[5]</sup>从输入图像中提取不重叠的图像块，并对图像进行学习形成字典，在此基础上通过高通滤波器完成图像融合。由于高通滤波器的空间域较小，导致这种方法的融合图像含有块效应。为了提高遥感图像的融合效果，降低其光谱扭曲，本文通过 IHS 变换从 MS 图像中提取 I 分量，并采用 NSST 变换，分解 I 分量与 PAN 图像，求取其高、低频系数。联合图像的均值与区域能量信息，建立信息量制约法则，对图像所含的光谱信息以及能量信息进行分析，以判断不同图像系数所含信息量的丰富度，以此为依据采用适当的方法融合低频系数。采用图像的对角梯度信息，对平均梯度模型进行改进，融合高频系数。利用 NSST 逆变换和 HIS 逆变换，得到融合结果，并对融合算法的性能进行实验测试。

## 1 所提遥感图像融合算法

所提遥感图像融合算法的过程见图 1。算法利用 IHS 对多光谱图像变换后，提取出 I 分量；再借助 NSST 方法，对 I 分量和全色图像完成分解，获取其不同图像系数。利用图像的均值和区域能量信息建立信息量制约法则，判断不同低频系数所含光谱与能量信息量的丰富度，选择低频系数的融合方法，融合低频系数，充分考虑不同低频系数对融合系数的影响，使融合系数更具光谱与空间特征的优良性。利用改进的平均梯度模型，对图像的水平、垂直以及对角梯度信息进行度量，以获取含有更多细节的融合高频系数。基于逆 NSST 变换及逆 IHS 变换，形成融合图像。

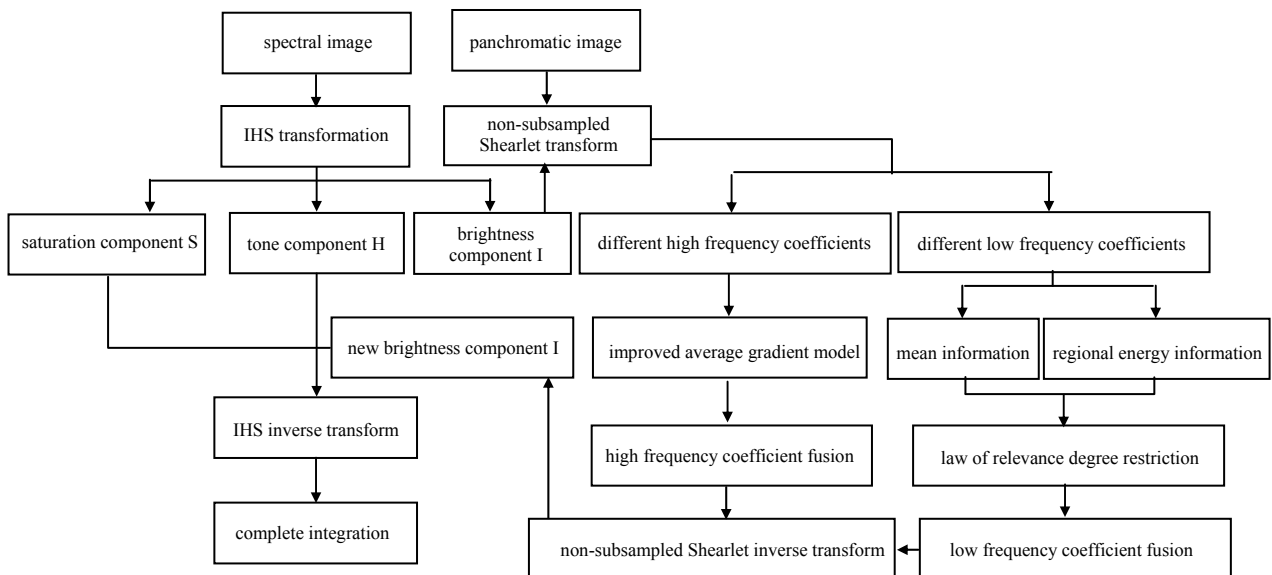


Fig.1 Process of the proposed remote sensing image fusion algorithm

图 1 所提遥感图像融合算法的过程

### 1.1 提取亮度分量

IHS 变换可利用 I,H,S 分量对图像的颜色进行描述<sup>[6-7]</sup>。其中，I 分量描述光谱图像的亮度大小，H 分量描述光谱图像的主波长，S 分量描述光谱图像的饱和度<sup>[6]</sup>。相对于常用的红绿蓝 RGB (Red-Green-Blue)颜色描述方法，IHS 变换中的 I,H,S 分量之间的独立性更强，当对其中一个分量做处理时，其他分量保持不变。因此，本文采用 IHS 变换提取图像的 I 分量。

借助变量  $e, k$ , HIS 变换的过程为<sup>[7]</sup>:

$$\begin{bmatrix} I \\ e \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -\sqrt{2}/6 & -\sqrt{2}/6 & \sqrt{2}/6 \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$H = \arctan^{-1}\left(\frac{k}{e}\right) \quad (2)$$

$$S = \sqrt{e^2 + k^2} \quad (3)$$

同样, 利用  $e, k$  也可实现 IHS 的逆变换, 将 IHS 变换转换到 RGB 颜色空间:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{6} & 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} & 1/\sqrt{6} & -1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{3} & -2/\sqrt{6} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I \\ e \\ k \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过式(1)~式(3), 可获取 MS 图像中的 I 分量。以图 2(a)所示的 MS 图像为例, 利用上述过程, 输出的 I 分量见图 2(b)。由图可见, 通过 IHS 变换提取的 I 分量较好地保留了 MS 图像的亮度信息。

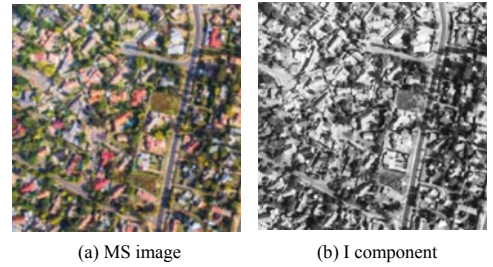


Fig.2 Extraction of I component by HIS transform  
图 2 HIS 变换提取 I 分量结果

### 1.2 非下采样剪切波变换

Shearlet 变换是一种经典的分解方法<sup>[8]</sup>, 其兼顾了多尺度性与多方向性。在 Shearlet 逆变换过程中, 只需对 Shearlet 滤波器的值进行求和运算, 无需考虑方向滤波器的值, 使 Shearlet 变换过程比 Contourlet 等变换相对简单和快速<sup>[8]</sup>。

Shearlet 变换的过程主要通过计算合成小波来实现。对于尺度、方向以及平移量分别为  $u, s$  及  $l$  的二维合成小波, 其膨胀仿射系统  $A_{pq}(\varphi)$  为<sup>[9]</sup>:

$$A_{pq}(\varphi) = \left\{ \varphi_{u,s,l}(x) = |\det \mathbf{p}|^{1/2} \varphi(\mathbf{q}^s \mathbf{p}^u x - l) \mid u, s \in \mathbb{Z}, l \in \mathbb{Z}^2 \right\} \quad (5)$$

式中:  $\varphi \in L^2(\mathbb{R}^2)$ ;  $\mathbf{p}, \mathbf{q}$  分别为  $2 \times 2$  的矩阵。

当  $\mathbf{p}, \mathbf{q}$  满足式(6)时,  $A_{pq}(\varphi)$  即为 Shearlet 变换。

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}, \mathbf{q} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Shearlet 变换虽特性优良, 但其平移不变性较差。为解决这个问题, 文献[10]提出了非下采样剪切波变换(NSST), NSST 的滤波器无需下采样环节, 从而实现了 NSST 的平移不变性<sup>[10]</sup>。

NSST 分解图像时, 非下采样金字塔(Non-Subsample Pyramid, NSP)主要完成多尺度分解, 而剪切滤波(Shearlet Filters, SF)则是针对多方向分解<sup>[10]</sup>。NSST 对图像 I 的分解示意图如图 3 所示<sup>[11]</sup>。从图 3 中发现, 每进行一次 NSP 计算, 都将生成一个低频系数和一个高频系数, 然后在生成的低频系数上迭代进行 NSP 计算, 从而实现多尺度的分解。以图 2(b)和图 4(a)所示的 PAN 图像为例, 对二者实施 NSST 变换后, 所得的不同系数分别如图 4(b)和图 4(c)所示。

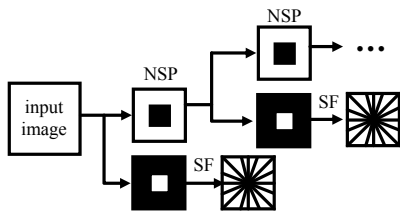


Fig.3 Process of NSST transformation  
图 3 NSST 变换过程

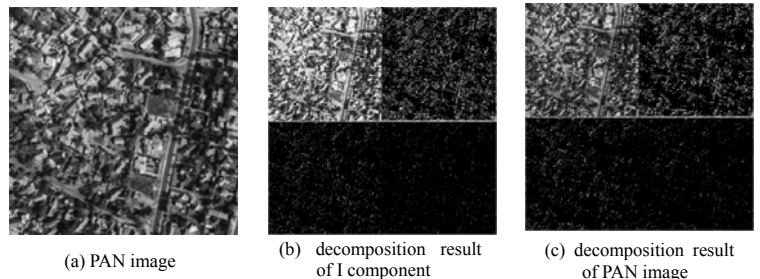


Fig.4 NSST decomposition results  
图 4 NSST 分解结果

### 1.3 低频系数融合

图像的主要能量以及光谱信息大部分集中在低频系数上, 因此, 可通过对低频系数所含的能量信息以及光谱信息进行度量, 用以判断不同低频系数对融合效果产生的影响, 从而选取合适的融合规则。图像的均值信息描述了图像的亮度特征, 可用于度量图像的光谱信息。而图像的区域能量信息描述了图像所含的能量特征, 可

用于度量图像的空间信息。因此本文利用图像的均值以及区域能量信息，建立信息量制约法则，用于低频系数的融合。

对于尺寸为  $M \times N$  的图像  $F$ ，其对应的均值  $JA$  为<sup>[12]</sup>：

$$JA = \frac{1}{MN} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N F(x, y) \quad (7)$$

以像素点  $p(i, j)$  为中心建立尺寸为  $M \times N$  邻域，该邻域对应的区域能量  $EN$  为<sup>[13]</sup>：

$$EN = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N |p(i+x, j+y)|^2 \quad (8)$$

式中  $p(i, j)$  为像素点的灰度。

首先，通过式(7)求取不同低频系数  $WA$  与  $WB$  对应的均值  $WA_{JA}$  与  $WB_{JA}$ ，通过式(8)求取不同低频系数  $WA$  与  $WB$  对应的区域能量  $WA_{EN}$  与  $WB_{EN}$ 。然后，比较  $WA_{JA}$  与  $WB_{JA}$  及  $WA_{EN}$  与  $WB_{EN}$  的大小，若满足  $WA_{JA} > WB_{JA}$ ，且  $WA_{EN} > WB_{EN}$ ，则说明  $WA$  在光谱信息以及空间信息上，对融合效果的影响较大；反之，说明  $WB$  对融合效果的影响较大。为此，本文设计差异低频系数融合规则获取融合低频系数  $WAB$ ：

$$WAB = \begin{cases} WA, & WA_{JA} > WB_{JA} \text{ 且 } WA_{EN} > WB_{EN} \\ WB, & WB_{JA} > WA_{JA} \text{ 且 } WB_{EN} > WA_{EN} \end{cases} \quad (9)$$

最后，若  $WA_{JA}$  与  $WB_{JA}$  及  $WA_{EN}$  与  $WB_{EN}$  不满足式(9)所示的融合条件时，说明  $WA$  与  $WB$  在光谱信息以及空间信息上，对融合效果的影响都较大，此时应将  $WA$  与  $WB$  都引入到低频系数的融合过程中，采用下列规则获取融合低频系数  $WAB$ ：

$$WAB = \frac{WA(WA_{JA} + WA_{EN}) + WB(WB_{JA} + WB_{EN})}{WA_{JA} + WA_{EN} + WB_{JA} + WB_{EN}} \quad (10)$$

#### 1.4 高频系数融合

图像的纹理等细节特征主要集中在高频系数上。图像的平均梯度可反映图像轮廓等细节内容。本文将利用图像的平均梯度特征获取融合高频系数。

对于尺寸为  $M \times N$  的图像，其对应的平均梯度  $JT$  为<sup>[14]</sup>：

$$JT = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{\nabla k_x^2 + \nabla k_y^2}{2}}}{MN} \quad (11)$$

式中  $\nabla k_x, \nabla k_y$  为点  $k$  在  $x, y$  上的一阶差分。从式(11)可见，其没有考虑像素点在对角线上的梯度特征。为了更准确地反映图像细节信息，将像素点在对角线上的梯度值  $\nabla k_{xy}$  引入到平均梯度的计算过程中，形成改进的平均梯度模型  $\overline{JT}$ ：

$$\overline{JT} = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{\nabla k_x^2 + \nabla k_y^2 + \nabla k_{xy}^2}{3}}}{MN} \quad (12)$$

利用式(12)计算不同高频系数  $UA$  与  $UB$  对应的均值  $UA_{\overline{JT}}$  与  $UB_{\overline{JT}}$ ，以求取融合高频系数  $UAB$ ：

$$UAB = \frac{UA \times UA_{\overline{JT}} + UB \times UB_{\overline{JT}}}{UA_{\overline{JT}} + UB_{\overline{JT}}} \quad (13)$$

以  $WAB$  及  $UAB$  为依据，利用逆 NSST 变换和逆 IHS 变换获取融合结果。

以图 2(a) 所提的 MS 图像及图 4(a) 中的 PAN 图像为样本，根据上述过程，形成的融合结果见图 5。观察融合结果发现，融合图像的光谱以及空间特性都较为理想。



Fig.5 Fusion results  
图 5 融合结果

#### 1.5 算法的复杂度分析

根据算法的融合过程发现，其复杂度主要集中在 IHS 变换、NSST 变换、低频系数融合和高频融合这 4 个阶段。令 MS, PAN 图像的大小均为  $M \times N$ ，利用 IHS 变换处理 MS 图像的复杂度为  $O(3MN)$ 。利用 NSST 变换处



理 I 分量和 PAN 图像的复杂度为  $O(MN \times \log \sqrt{MN})$ 。对于低频系数融合过程, 令 MS, PAN 图像经过分解后得到的低频系数数量分别为  $a, b$ , 则其复杂度为  $O(a+b)$ 。同样, 令 MS, PAN 图像经过分解后得到的高频系数数量分别为  $m, n$ , 则其复杂度为  $O(m+n)$ 。综上所述, 所提算法的总复杂度为  $O(3MN+MN \times \log \sqrt{MN} + a+b+m+n)$ 。由于高频系数数量  $m$  与  $n$ 、低频系数数量  $a$  与  $b$  要远小于  $MN$ , 因此,  $O(a+b)$  与  $O(m+n)$  可忽略不计。故本文算法的复杂度近似为  $O(3MN+MN \times \log \sqrt{MN})$ 。可见, 所提算法的复杂度比较低, 没有出现指数幂运算, 为简单的线性乘法运算, 故具有较高的融合效率。

## 2 仿真实验分析

从 IKONOS 卫星及 QuickBird 卫星拍摄的图像中各选取一组尺寸为  $512 \times 512$  的静态遥感图像进行实验。实验采用 Matlab 2014 软件, 在 Windows 7 操作系统、Intel I3 处理器的联想计算机上进行, 并与文献[15–18]中算法进行对比, 以便更直观地观测所提算法的融合性能。

图 6 为 IKONOS 图像的融合结果。从图 6 可见, 文献[15]算法融合的图像颜色偏深, 光谱扭曲较为严重, 矩形观察区中的红色建筑物具有较为严重的振铃效应; 文献[16]算法融合的图像整体偏亮, 树木颜色偏绿, 矩形观察区中的白色建筑物具有较为严重的块效应, 白色建筑物的轮廓不清晰; 文献[17]算法融合的图像亮度稍大, 树木及建筑物等颜色正常, 矩形观察区中的白色建筑物具有块效应; 文献[18]算法融合的图像亮度偏暗, 图像颜色正常, 矩形观察区中的建筑物较为模糊; 所提算法融合的图像颜色及亮度都较为正常, 矩形观察区中的白色及红色建筑物轮廓都较为清晰, 仅道路边缘存在轻微模糊现象。图 7 为不同算法对 QuickBird 图像的融合结果。观察不同算法的融合图像可见, 文献[15]算法的融合图像清晰度较低, 且颜色偏暗淡, 矩形观察区中屋顶具有严重的块效应现象, 房屋和周边植被的轮廓较为模糊; 文献[16]算法的融合图像颜色偏深, 且绿色植被颜色偏红, 矩形观察区中屋顶具有振铃效应, 房屋边缘较为模糊; 文献[17]算法融合的图像中偏红, 矩形观察区中的树木具有严重的块效应; 文献[18]算法融合的图像亮度偏亮, 矩形观察区中建筑物与树木交界处轮廓模糊; 所提算法的融合图像稍微偏亮, 图像颜色较为正常, 图像较为清晰, 矩形观察区中屋顶及植被的轮廓都较为清晰, 且房屋整体也较为清晰。说明所提算法具有较好的融合性能, 所得图像的光谱及空间特征都较好, 具有良好的视觉效应。原因是所提算法通过低频系数的均值以及区域能量特征建立了信息量制约法则, 选用适当融合规则融合低频系数, 使其光谱以及空间信息更为丰富。并将高频系数的对角梯度值引入到平均梯度的计算过程中, 形成改进的平均梯度模型, 对图像的细节信息进行更为准确和细致的度量, 使融合高频系数包含了更丰富的细节信息, 提高了融合图像质量。

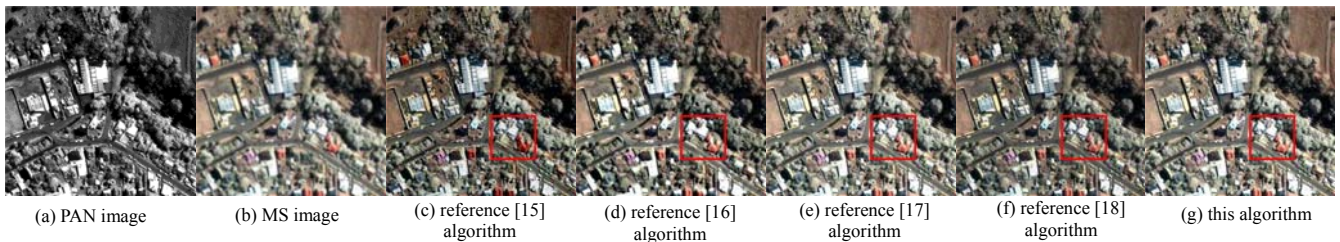


Fig.6 Fusion results of different algorithms for IKONOS images

图 6 不同算法对 IKONOS 图像的融合结果

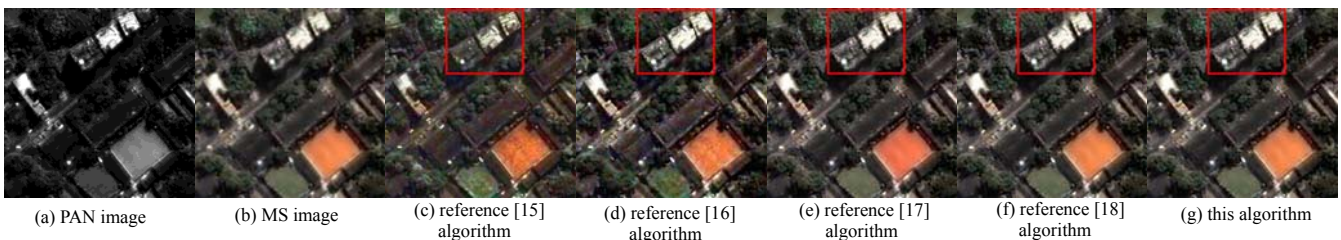


Fig.7 Fusion results of different algorithms for Quickbird images

图 7 不同算法对 Quickbird 图像的融合结果

为更为客观评估所提算法的融合性能, 采用使用较为广泛的相关系数(Correlation Coefficient, CC)以及信息熵(Information Entropy, IE)指标对各算法融合的图像进行定量测试, 分析所提算法的融合性能。其中 CC 刻画了融合图像 H 和 MS 图像 D 的色彩相关度, 色彩相关度的大小与 CC 值成正比。尺寸为  $M \times N$  的融合图像与 MS

图像，令  $H$  和  $D$  的尺寸为  $M \times N$ ，则  $CC$  的计算过程为<sup>[19]</sup>：

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [H(x,y) - \bar{H}] [D(x,y) - \bar{D}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [H(x,y) - \bar{H}]^2 \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [D(x,y) - \bar{D}]^2}} \quad (14)$$

式中： $\bar{H}$  与  $\bar{D}$  为  $H$  和  $D$  的像素平均值。IE 从信息量出发，刻画了融合图像所包含的信息丰富度，信息丰富度的大小与 IE 值成正比。令融合图像的灰度阶为  $n$ ，则 IE 的计算过程为<sup>[20]</sup>：

$$IE = -\sum_{i=0}^n h(i) \log_2 h(i) \quad (15)$$

式中  $h(i)$  为各灰度频率。

定量测试的数据选自 Worldview-2 卫星数据库中的 31 组不同的遥感图像，通过各算法对这些样本进行融合，并测试融合结果的  $CC$  及  $IE$  值。各算法融合结果的  $CC$  及  $IE$  值如图 8 所示。

从图 8(a) 发现，所提算法、文献[18]、文献[17]、文献[16]算法及文献[15]算法，对第 25 组遥感图像的融合结果的  $CC$  值分别为 0.967, 0.951, 0.934, 0.912 及 0.866，所提算法融合图像的  $CC$  值最大。从图 8(b) 中  $IE$  值可见，所提算法、文献[18]、文献[17]、文献[16]算法及文献[15]算法，对第 25 组遥感图像的融合结果的  $IE$  值分别为 7.879, 7.855, 7.738, 7.679 以及 7.567，所提算法融合图像的  $IE$  值最大。

通过这 2 个指标发现，所提算法融合图像的  $CC$  值与  $IE$  值均高于对照组。较大的  $CC$  值，表明本文算法融合图像所含的光谱特征更好，与  $MS$  图像的光谱特征吻合度更为接近。与此同时，其较大的  $IE$  值表明了算法融合图像所含信息量更大，图像的纹理细节内容更丰富，图像空间特性较好，与  $PAN$  图像的相似度更高。综合  $CC$  值与  $IE$  值可以发现，所提算法融合性能较好，所融合图像具有较好的光谱特征和更为丰富的信息量。因为所提算法利用低频系数的均值以及区域能量特征建立了信息量制约法则，以图像所含信息量作为制约条件，选取合适的融合规则完成低频系数的融合，使其包含了更多的细节信息量。同时利用像素点在对角线上的梯度值改进平均梯度模型，融合高频系数，提高了其细节丰富度，改善了融合效果。

### 3 结论

本文在利用图像的均值特征以及区域能量特征，分别对图像的光谱信息以及能量信息进行度量的基础上，设计了信息量制约法则，融合遥感图像。通过  $IHS$  变换提取  $MS$  图像的  $I$  分量，并将其与  $PAN$  图像经尺度性、方向性以及平移性较好的  $NSST$  变换求取图像系数。利用图像的均值特征以及区域能量特征建立了信息量制约法则，以图像所含信息量为依据，选择适宜的融合规则获取融合低频系数，使融合低频系数能够包含更多的光谱以及能量信息。引入图像的对角线梯度值，形成改进的平均梯度模型融合高频系数。对融合的高频以及低频系数采用  $NSST$  逆变换与  $IHS$  逆变换生成融合图像。通过不同算法的融合效果，以及对 Worldview-2 卫星数据库中的 31 组遥感图像融合结果的定量分析可见，所提算法性能较好，融合图像质量较高。

#### 参考文献：

- [1] WAN Weiguo, YANG Yong, LEE Hyojong. Practical remote sensing image fusion method based on guided filter and improved SML in the NSST domain[J]. Signal, Image and Video Processing, 2018, 12(5): 959-966.
- [2] 梁兴东, 卜运成, 张福博. 灾害遥感中 SAR 三维成像技术的研究与应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019, 17(1): 46-52. (LIANG Xingdong, PU Yuncheng, ZHANG Fubo. Research and application of SAR 3D imaging technology in disaster remote sensing[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019, 17(1): 46-52.)
- [3] ZHANG Libao, ZHANG Jue. A new saliency-driven fusion method based on complex wavelet transform for remote sensing images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(12): 2433-2437.
- [4] 赵学军, 刘静. 基于 Shearlet 和稀疏表示的遥感图像融合[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(4): 255-259. (ZHAO Xuejun, LIU Jing. Remote sensing image fusion based on Shearlet and sparse representation[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(4): 255-259.)

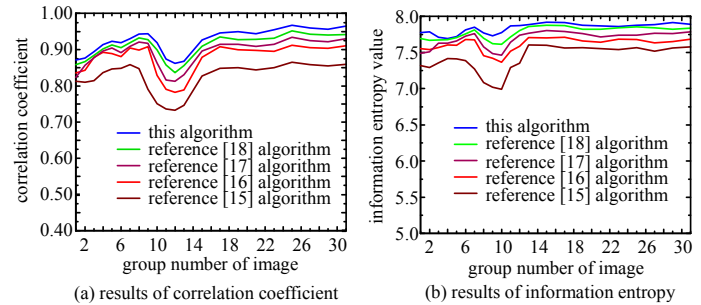


Fig.8 Quantitative index test results of fused image

图 8 融合图像定量指标测试结果

- [ 5 ] MOHAMMAD Khateri,HASSAN Ghassemian. A compressed sensing based approach for remote sensing image fusion[C]// Proceedings of the 24th Iranian Conference on Electrical Engineering. Iran:IEEE, 2016:1809–1814.
- [ 6 ] DENG Chao,WANG Zhiheng,LI Xingwang. An improved remote sensing image fusion algorithm based on IHS transformation[J]. Ksii Transactions on Internet & Information Systems, 2017,11(3):1633–1649.
- [ 7 ] DU Chaoben,GAO Shesheng. Remote sensing image fusion based on nonlinear IHS and fast nonsubsampling contourlet transform[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018,46(12):2023–2032.
- [ 8 ] TAI Jianhao,PAN Bin,ZHAO Shanshan. SAR and multispectral remote sensing image fusion method using Shearlet transform[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017,42(4):468–474.
- [ 9 ] 纪峰,李泽仁,常霞. 基于 PCA 和 NSCT 变换的遥感图像融合方法[J]. 图学学报, 2017,38(2):247–252. (JI Feng,LI Zeren,CHANG Xia. Remote sensing image fusion method based on PCA and NSCT transform[J]. Journal of Graphics, 2017,38(2):247–252.)
- [10] LI Long,FU Yiliu,CHAI Yuzhou. Image fusion based on non-sampling Shearlets and weighted area feature[J]. Journal of Applied Optics, 2017,36(5):735–741.
- [11] LIU Zhanwen,FENG Yan,CHEN Hang. A fusion algorithm for infrared and visible based on guided filtering and phase congruency in NSST domain[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017,97(1):71–77.
- [12] ZHU Pan,DING Lei,MA Xiaoqing. Fusion of infrared polarization and intensity images based on improved toggle operator[J]. Optics and Laser Technology, 2018,98(1):139–151.
- [13] WANG Feng,CHENG Yongmei. Visible and infrared image enhanced fusion based on MSSTO and NSCT transform[J]. Control and Decision, 2017,32(2):269–274.
- [14] TANG Sizhang,SHEN Chaomin,ZHANG Guixu. Adaptive regularized scheme for remote sensing image fusion[J]. Frontiers of Earth Science, 2016,10(2):236–244.
- [15] 王威,张佳娥. 引导滤波和稀疏表示相结合的遥感图像融合算法[J]. 小型微型计算机系统, 2017,3(3):601–604. (WANG Wei,ZHANG Jiae. Remote sensing image fusion method based on guided filter and sparse representation[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2017,3(3):601–604.)
- [16] WU Zhiliang,HUANG Yongdong,ZHANG Kang. Remote sensing image fusion method based on PCA and Curvelet transform[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018,46(5):687–695.
- [17] SINGH Dilbag,KAUR Manpreet,SINGH Harpreet. Remote sensing image fusion using fuzzy logic and gyrator transform[J]. Remote Sensing Letters, 2018,9(10):942–951.
- [18] WANG Duo,HE Guojin,JIAO Weili. Research on remote sensing image fusion based on compressive sensing algorithm[J]. Journal of Computers, 2018,13(5):519–526.
- [19] 张淑艳,朱娟,王超. 非下采样 Contourlet 变换耦合区域信息特征的遥感图像融合算法[J]. 计算机应用与软件, 2019,36(4):192–209. (ZHANG Shuyan,ZHU Juan,WANG Chao. Remote sensing image fusion algorithms based on information features of coupled areas of non-down-sampling Contourlet transform[J]. Computer Applications and Software, 2019,36(4):192–209.)
- [20] UDHAYA Suriya,RANGARAJAN P. Brain tumor detection using discrete wavelet transform based medical image fusion[J]. Biomedical Research, 2017,28(2):684–688.