

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902535

基于非下采样轮廓波变换耦合对比度特征的 遥感图像融合算法*

颜正恕^{1,2} 王 璟³

(1.宁波城市职业技术学院 宁波 315199; 2.宁波诺丁汉大学 宁波 315100; 3.浙江外国语学院 杭州 310012)

摘要:为了解决当前较多遥感图像融合方法忽略了图像的对比度特征,使得融合图像存在振铃效应等问题,设计了基于非下采样轮廓波变换耦合对比度特征的遥感图像融合算法。引入 HSV (hue, saturation, value) 色彩模型,提取出多光谱 (MS) 图像的 V 因子。借助非下采样轮廓波变换 (NSCT), 计算出 V 因子与全色 (PAN) 图像的不同系数。随后,利用傅里叶变换来求取图像的显著性因子,并将其与图像的区域能量特征相结合,形成低频系数融合规则,实现低频信息的融合。通过利用图像的标准差信息对图像的对比度特征进行度量,并将其与图像的平均梯度信息相结合,形成高频系数融合规则,实现高频信息的融合。最后,通过逆 NSCT 对其进行重构,以更新 V 因子。将更新后的 V 因子,联合 MS 图像的 H 因子和 S 因子,通过逆 HSV 色彩模型进行重构,得到融合结果。通过实验发现,较当前遥感图像融合技术而言,所提算法的融合图像具备更高的光谱相关系数值以及信息熵值。

关键词: 遥感图像融合; 非下采样轮廓波变换; 对比度特征; 标准差信息; HSV 色彩模型; 区域能量

中图分类号: TP391; TN29 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.2040

Remote sensing image fusion algorithm based on nonsubsampling contourlet transform and contrast characteristics

Yan Zhengshu^{1,2} Wang Jing³

(1.Ningbo City College of Vocational Technology, Ningbo 315199, China; 2.Ningbo Nottingham University, Ningbo 315100, China; 3.Zhejiang International Studies University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: In order to solve the problem as ringing effect induced by neglect of the image contrast feature in many current remote sensing image fusion methods, this paper uses the standard deviation information of the image to measure the contrast characteristics of the image, and then realizes image fusion. Hue, saturation, value (HSV) color model is introduced to extract V factor of multispectral image. With the help of NSCT, the different coefficients of V factor and panchromatic image are calculated. Then, the saliency factor of the image is obtained by Fourier transform, and combined with the regional energy characteristics of the image to form the fusion rules of low-frequency coefficients, so as to realize the fusion of low-frequency information. By using the standard deviation information of the image to measure the contrast characteristics of the image, and combining it with the average gradient information of the image, the fusion rules of high frequency coefficients are formed to realize the fusion of high frequency information. Finally, it is reconstructed by inverse NSCT to update the V factor. The updated V factor, combined with H factor and S factor of MS image, is reconstructed by inverse HSV color model, and the result is concordant. The experiments show that compared with the current remote sensing image fusion technology, this algorithm has higher spectral correlation coefficient and information entropy.

Keywords: Remote sensing image fusion; Nonsubsampling contourlet transform; Contrast characteristics; Standard deviation information; HSV color model; Regional energy

收稿日期: 2019-08-31 Received Date: 2019-08-31

* 基金项目: 国家社会科学基金 (18BWW029)、浙江省教育科学规划重点项目 (2015SB088)、浙江省哲学社会科学规划项目 (18WH30042ZD-4Z) 资助

0 引言

当下计算机科学的快速发展,为图像融合提供了良好的技术支撑^[1]。随着人们对图像质量要求的不断提升,图像融合技术已被应用于生活中的多个领域。通过图像融合技术,人们可将具有不同图像特征优势的多光谱(multi-spectral, MS)图像与全色(panchromatic, PAN)图像进行融合,以获取高质量的遥感融合图像^[2-3]。

通过专家学者的研究,涌现出了多种遥感图像融合技术。Wu等^[4]将图像经过非下采样轮廓波变换(non subsampled contourlet transform, NSCT)变换后,利用脉冲耦合神经网络方法和压缩感知方法,分别形成低、高频系数融合规则。由于该方法没有考虑图像的对比度特征,使得融合图像中具有振铃现象。谷志鹏等^[5]采用Canny方法获取图像的边缘特征后,再通过IHS方法求取MS图像的亮度分量,采用非下采样Contourlet变换获取图像的不同系数,并利用图像的区域方差特征对低频系数融合,采用粒子群优化方法联合图像的结构相似特征对高频系数融合。由于IHS方法不能较好的保持图像的光谱信息,而且基于粒子群优化方法联合图像的结构相似特征的高频系数融合方法,没有考虑图像的对比度特征,使得融合图像中具有光谱失真以及块现象。Abhishek等^[6]通过离散小波变换获取图像的高、低频系数,并通过小波系数的平均值信息融合低频系数,采用图像的邻域平均差分信息融合高频系数,通过逆离散小波变换获取融合图像。由于小波变换易丢失图像原始数据,而且图像的邻域平均差分信息不能反应图像的对比度特征,从而使得融合图像中具有模糊现象。

为了改善融合质量,本文提出了一种基于非下采样轮廓波变换耦合对比度特征的遥感图像融合算法。将经过HSV(Hue, Saturation, Value)计算所得的V因子与PAN图像通过NSCT变换,以得到不同的图像系数。将图像经过傅里叶变换,求取显著性因子,并将其用于低频系数融合。采用图像的标准差信息反应图像的对比度特征,并将其用于高频系数融合。利用逆NSCT和逆HSV对图像进行重构,获取融合图像。实验中,将本文所设计算法用于遥感图像的融合,并通过观察融合图像的视觉效果,以及融合图像的光谱相关系数值和信息熵值,分析了所设计算法的有效性及其优越性。

1 本文遥感图像融合算法

基于非下采样轮廓波变换耦合对比度特征的遥感图像融合算法的过程如图1所示。通过观察图1可知,本文遥感图像融合算法大致可分为提取MS图像V因子、

获取图像不同系数以及不同系数的融合3部分,每部分的主要过程如下。

1)提取MS图像V因子。采用HSV色彩模型,将MS图像变换成H因子、S因子、V因子,并提取出V因子用以与PAN图像进行融合。HSV色彩模型变换MS图像时,能够较好的保留源图的光谱信息,有助于提高融合图像的光谱特性。

2)获取图像不同系数。采用NSCT变换,将V因子和PAN图像在多尺度和多方向上进行分解,以获取其对应的不同系数。NSCT变换在多尺度和多方向上具有良好的特性,使得分解所得的图像系数能够较好的保留源图的细节信息。

3)不同系数的融合。将图像经过傅里叶变换,形成图像的显著性因子,以度量图像的显著特征,并通过该因子与图像的区域能量特征融合低频系数,使得其不仅能够更好的包含图像的概貌特征,而且还能更多的包含图像的边缘等显著信息。利用图像的标准差信息与平均梯度信息,分别对图像的对比度特征以及纹理等细节特征进行度量,获取融合高频系数。使得融合高频系数在具有良好纹理等细节特征的同时,还具有较好的对比度。通过逆NSCT对融合系数进行重构,获取更新后的V因子 \hat{V} ,通过逆HSV对 \hat{V} 及H、S因子进行重构,获取融合图像。

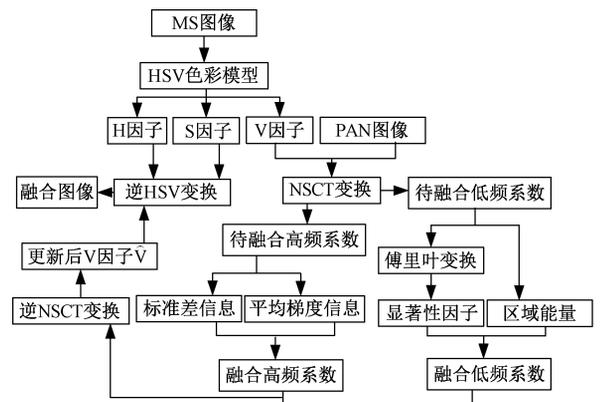


图1 所提遥感图像融合算法的过程

Fig.1 The process of this remote sensing image fusion algorithm

1.1 提取MS图像V因子

MS图像中包含了丰富的色彩信息,这些信息可以通过常规的RGB色彩模型来表述,也可以通过HSV色彩模型来表述。在图像融合中,需要将MS图像进行变换,以提取出其与PAN图像相近的信息进行融合^[7]。在RGB色彩模型中,色彩信息通过红(red, R)、绿(green, G)、蓝(blue, B)来表示,但其耦合性较强,不易于变换分解^[8]。而HSV色彩模型中,色彩信息通过H、S、V因子来表示,其独立性较强,便于变换分解。在HSV色彩模

型中, V 因子表述的信息与 PAN 图像最为相近。因此需要从 MS 图像中提取出 V 因子, 用于和 PAN 图像进行融合操作。

HSV 色彩模型如图 2 所示, 由 H、S、V 因子组成的锥形结构^[9]。从图 2 可见, 在该结构中 H 因子利用角度的变化过程来描述图像的色调信息, S 因子和 V 因子分别利用 [0, 1] 的数据变化过程来描述图像的饱和度以及亮度信息。HSV 色彩模型对 MS 图像的变换过程如下^[10] :

$$H = \begin{cases} 240 + 60(R - B)/(m - n), B = m \\ 120 + 60(G - B)/(m - n), G = m \\ 360 + 60(R - B)/(m - n), R = m \& G < B \\ 60(G - B)/(m - n), R = m \& G \geq B \\ 0, S = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} (m - n)/m, m \neq 0 \\ 0, m = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$V = m \quad (3)$$

其中, $m = \max(R, G, B)$, $n = \min(R, G, B)$ 。

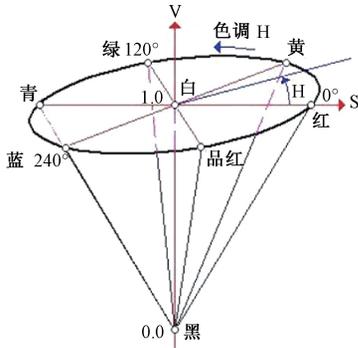


图 2 HSV 色彩模型示意图
Fig.2 HSV color model diagram

假设 360° 和 0° 时的 H 因子值为同一个值, 且令 s 表示 H 因子值除以 60° 所得的商值, y 表示 H 因子值除以 60° 所得的余值。则逆 HSV 的计算过程为:

$$\begin{cases} R = V, G = c, B = a, (s = 0) \\ R = b, G = V, B = a, (s = 1) \\ R = a, G = V, B = c, (s = 2) \\ R = a, G = b, B = V, (s = 3) \\ R = c, G = a, B = V, (s = 4) \\ R = V, G = \alpha, B = b, (s = 5) \end{cases} \quad (4)$$

式中: a, b, c 表示与 S 因子及 V 因子相关的变换系数, 其计算过程分别为:

$$\begin{cases} a = V(1 - S) \\ b = V(1 - Sy) \\ c = V(1 - S(1 - y)) \end{cases} \quad (5)$$

通过 HSV 色彩模型提取 MS 图像中的 V 因子结果

示意图如图 3 所示。通过观察图 3 可知, HSV 色彩模型提取 MS 图像(图 3(a)) 的 V 因子(图 3(b)), 能够较好的保留 MS 图像中的亮度信息。

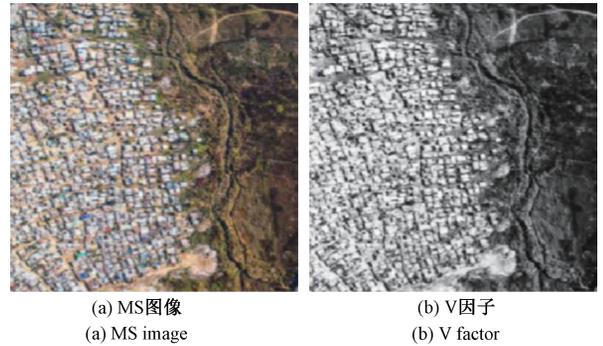


图 3 MS 图像中的 V 因子提取结果
Fig.3 V factor extraction results in MS image

1.2 获取图像不同系数

在当前多种图像分解方法中, NSCT 不仅具有多方向性等特征, 而且其还具有图像细节特征保留度高以及易于实现等特点^[11]。对此, 本文将采用 NSCT 变换来获取 V 因子及 PAN 图像的低频及高频系数。

NSCT 变换通过非下采样特征金字塔 (nonsampled pyramid, NSP) 和滤波器 (nonsampled directional filter bank, NSDFB) 对图像分解。该过程如图 4 所示^[12]。图 4 中 NSP 由双通道的 NSDFB 构成, 其在多尺度上分解图像。而 NSDFB 在多方向上分解图像。从而获取到图像的不同系数。

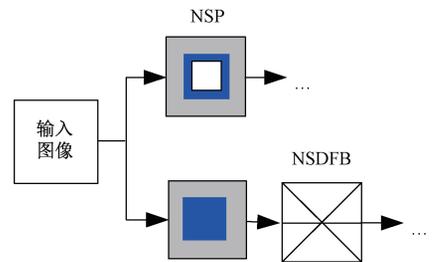


图 4 NSCT 变换的分解过程
Fig.4 Decomposition process of NSCT transformation

将 V 因子(图 3(b)) 与 PAN 图像(图 5(a)), 经过 NSCT 变换所得的不同系数分别如图 5(b) 与 (c) 所示。

1.3 不同系数的融合

通过 NSCT 变换获取图像的低、高频系数后, 需要将这些系数进行融合。低频系数所包含源图内容的丰富度可以通过其能量信息进行表述。当其所含源图内容越丰富时, 其能量值也就越大。同时低频系数中的显著内容对融合图像的空间特性也具有较大的影响, 当显著内容得到较好表达时, 图像会显得更为清晰, 色彩信息也将更

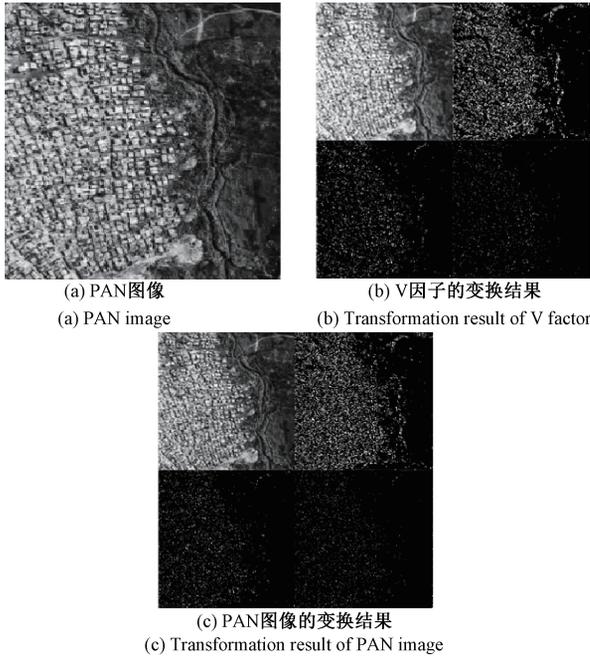


图5 V因子及PAN图像的NSCT变换结果

Fig.5 NSCT results of V factor and PAN image

为丰富。由此,本文将利用图像的显著性与区域能量来完成低频系数的融合。

对于图像 $I(x,y)$ 而言,其窗口 H 的区域能量 E_l 可表述为^[13]:

$$E_l = \sum_{i,j \in H} |I(x+i,y+j)|^2 \quad (6)$$

再将图像 $I(x,y)$ 经过快速傅里叶变换(FFT),求取其幅度谱 $Am(I)$ 与 $Ph(I)$ ^[14]:

$$Am(I) = Amp[FFT(I(x,y))] \quad (7)$$

$$Ph(I) = Pha[FFT(I(x,y))] \quad (8)$$

其中, $Amp[\cdot]$ 表示取幅值操作, $Pha[\cdot]$ 表示取相位操作。

随后,利用 $Am(I)$ 来求取 $I(x,y)$ 的对数幅度谱 $LAm(I)$:

$$LAm(I) = \lg Am(I) \quad (9)$$

根据式(9),通过均值滤波器 $h(I)$ 来求取 $I(x,y)$ 的谱残差 $R(I)$:

$$R(I) = LAm(I) - h(I) \cdot LAm(I) \quad (10)$$

最后,利用 $R(I)$ 通过傅里叶反变换 FFT^{-1} ,来形成图像的显著性因子 $S(I)$:

$$S(I) = g(x) \cdot FFT^{-1} [\exp(R(I) + Ph(I))]^2 \quad (11)$$

式中: $g(x)$ 为高斯滤波器。

综上所述,利用式(6)求取不同低频系数 A 与 B 的区域能量 E_A 和 E_B , 利用式(11)求取不同低频系数 A 与 B 的显著性因子 $S(A)$ 和 $S(B)$ 。则低频系数的融合函数 $Fu(A,B)$ 为:

$$Fu(A,B) = \frac{[E_A + S(A)] \times A + [E_B + S(B)] \times B}{E_A + S(A) + E_B + S(B)} \quad (12)$$

通过式(12)可求取融合低频系数 $Fu(A,B)$ 。另外,图像中的线条等细节信息主要通过高频系数反应。图像的平均梯度信息可以较好地对比度特征进行度量。同时高频系数的融合过程中还应注意对比度特征这一细节信息。该特征可通过图像的标准差反应。由此,本文将利用图像的标准差以及平均梯度信息对高频系数进行融合。

对于图像 $I(x,y)$ 而言,其标准差 $St(I)$ 与平均梯度 $Ag(I)$ 分别为^[15-16]:

$$St(I) = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I(x,y) - \bar{I})^2} \quad (13)$$

$$Ag(I) = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \left(\frac{\Delta x I(x,y)^2 + \Delta y I(x,y)^2}{2} \right)^{1/2} \quad (14)$$

式中: $M \times N$ 为图像 $I(x,y)$ 的尺寸; \bar{I} 为图像 $I(x,y)$ 的像素均值; Δx 和 Δy 分别表示 x 和 y 方向上的一阶差分运算。

利用式(13)求取不同高频系数 C 与 D 的标准差信息 $St(C)$ 和 $St(D)$, 利用式(14)求取不同高频系数 C 与 D 的平均梯度信息 $Ag(C)$ 和 $Ag(D)$ 。则高频系数的融合模型 $Fu(C,D)$ 为:

$$Fu(C,D) = \frac{[St(C) + Ag(C)] \times C + [St(D) + Ag(D)] \times D}{St(C) + Ag(C) + St(D) + Ag(D)} \quad (15)$$

通过式(15)可求取融合高频系数 $Fu(C,D)$ 。

将 $Fu(A,B)$ 与 $Fu(C,D)$ 通过逆 NSCT 后可获取更新后 V 因子 \hat{V} , 再将 \hat{V} 因子、 H 因子、 S 因子通过逆 HSV, 便可获得融合图像。

以图3(a)的MS图像与图5(a)的PAN图像为样本, 经过上述方法所得的融合图像如图6所示。从图6可见, 融合图像的色彩及空间特性都较好。

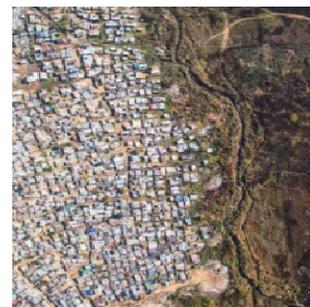


图6 融合图像

Fig.6 Fusion image

2 实验结果

在配置为 Intel i5 双核 CPU、500 GB 硬盘、Windows 7 操作系统的 Lenovo PC 上,通过 MATLAB 2010b 软件进行实验。实验中采用了文献[17-18]中算法作为对照。

实验中采用 3 种算法融合了尺寸为 512×512 的 SOPT-5 和 IKONOS 图像。图 7 所示为 SOPT-5 图像的融合结果。观察图 7 中 3 种算法的融合结果可见,文献[17]算法融合的图片中绿色植被颜色偏深,公路的亮度偏暗。框中观察区土地颜色偏黑,且植被与土地交界处存在振铃效应。文献[18]融合的图像中白色区域偏暗,框中观察区土地颜色稍微偏黑,植被与土地交界处存在块效应。本文算法融合的图片中,绿色植被与白色区域颜色都较为正常,公路的亮度也较为正常。其观察区不存在块效应以及振铃效应,但存在轻微模糊现象。图 8 所示为 3 种算法对 IKONOS 图像的融合结果。对比图 8 中 3 种算法的融合结果可以发现,文献[17]算法融合的图片整体亮度偏暗淡,而且框中观察区建筑物边缘具有块效应,白色区域颜色偏蓝。文献[18]算法融合的图片整体亮度偏亮,而且框中观察区街道边缘具有不连续现象,花坛边缘具有块效应。本文算法融合的图片亮度和颜色都较为正常,而且框中观察区建筑物边缘及花坛边缘不存在块效应及不连续效应,但街道变边缘具有一处轻微不连续现象。由此可见,本文算法融合的图片色彩信息较为丰富和正常,图像质量较好,不存在振铃效应,具有良好的视觉效果。究其原因因为本文算法采用了 HSV 色彩模型对 MS 图像进行了变换,使得获取的 V 因子较好的保留了 MS 图像的光谱信息。同时本文算法还利用了图像的显著性特征以及区域能量特征融合了低频系数,使得融合图像具有丰富的色彩信息,以及包含了丰富的源图内容,从而提高了融合图像的光谱及空间信息丰富度,使得融合图像具有较好的质量。

为了客观验证本文算法的融合性能,利用 3 种算法对 10 组不同的 QuickBird 图像进行了融合测试。并对 3 种算法融合图像的光谱相关系数(spectral correlation coefficient, SCC)以及信息熵(information entropy, IE)进行了统计,以分析 3 种算法的融合性能。其中 SCC 度量了融合图像与 MS 图像的相关性,从其相关性上反应了融合图像所包含 MS 图像的光谱丰富度,SCC 值越大,说明融合图像具有更好的光谱特征。IE 从融合图像所含信息丰富度方面反应了融合图像的质量,IE 值越大,说明融合图像的质量越好。

对于 $M \times N$ 大小的融合图像 $Fu(x, y)$ 和 MS 图像 $MS(x, y)$, SCC 与 IE 值的计算过程分别为^[19-20]:

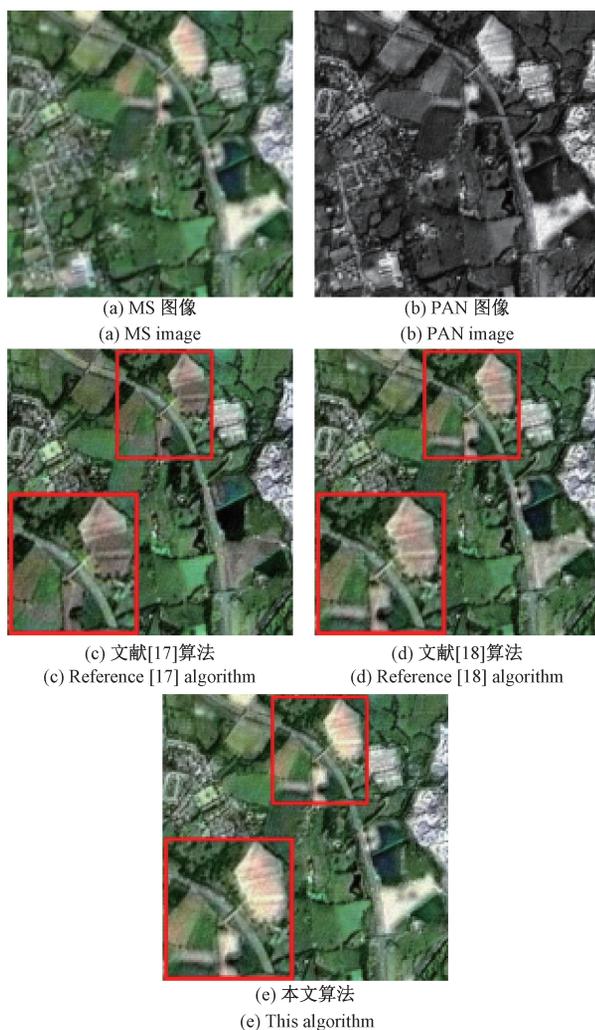


图 7 三种算法对 SOPT-5 图像的融合结果

Fig.7 Fusion results of three algorithms for SOPT-5 image

$$SCC = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [Fu(x, y) - Fu'] [MS(x, y) - MS']}{\sqrt{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [Fu(x, y) - Fu']^2 \times \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N [MS(x, y) - MS']^2}} \quad (16)$$

$$IE = - \sum_{i=0}^{K-1} U_i \log_2 U_i \quad (17)$$

其中, Fu' 与 MS' 分别为 $Fu(x, y)$ 与 $MS(x, y)$ 的像素均值; K 为 $Fu(x, y)$ 的灰度级数量; U_i 为灰度级为 i 的点出现的概率。

3 种算法融合图像的 IE 值与 SCC 值如图 9 所示。从图 9 可见,本文算法融合图像的 IE 值与 SCC 值都高于文献[17-18]算法。在对第 9 组图像实施融合时,本文算法融合图像的 IE 值与 SCC 值分别为 7.933 和 0.965,文献[18]算法融合图像的 IE 值与 SCC 值分别为 7.781 和

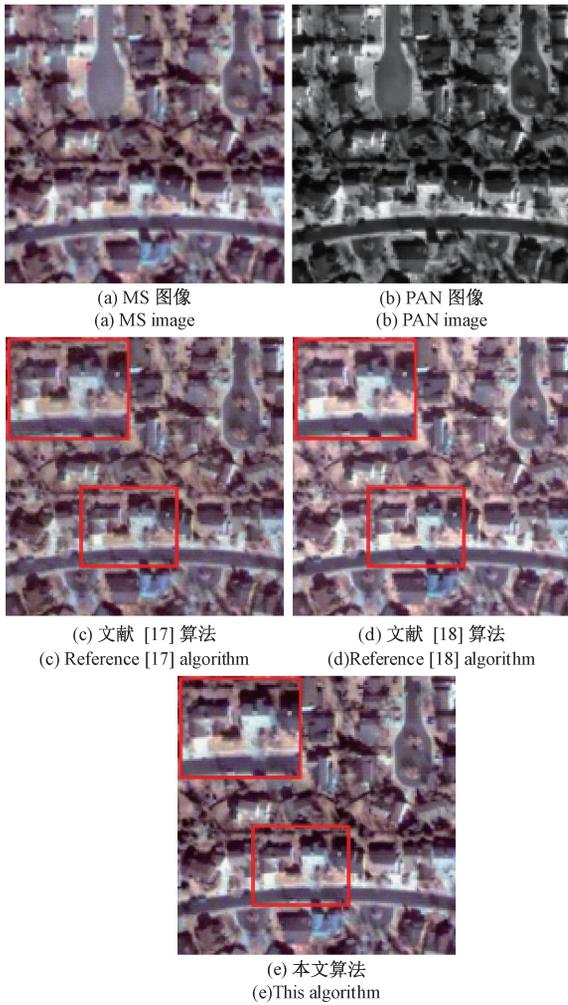


图 8 三种算法对 IKONOS 图像的融合结果

Fig.8 Fusion results of three algorithms for IKONOS image

0.939, 文献[17]算法融合图像的 IE 值与 SCC 值分别为 7.712 和 0.910。由此说明, 本文算法融合图像具有较高的 IE 值与 SCC 值, 融合图像的信息丰富度较高, 光谱质量较好, 本文算法具有良好的融合性能。因为本文算法采用了 NSCT 变换获取了图像的不同系数, 使得分解所得系数能够包含丰富的源图信息。另外本文算法还采用图像的标准差信息与平均梯度信息作为高频系数的融合依据, 在考虑图像细节特征的同时还考虑了图像的对比度特征。从而使得本文算法的融合性能得以提高。文献[17]算法利用模糊回转变换方法分解图像, 使用 if-then 规则融合低频系数, 并将 PAN 图像的高频信息直接注入到 MS 图像中, 获取融合图像。由于模糊的 if-then 规则依赖于参数的调整, 而且注入 PAN 图像高频信息进 MS 图像中的方法没有考虑图像间的包容性以及对比度特征, 从而使得文献[17]算法的融合性能不佳。文献[18]算法利用主成分分析方法提取了图像的第一主成分, 并采用 Curvelet 变换获取了图像的不同系数, 分别

利用绝对值取大以及基于标准差和 D-S 论据的方法对图像的低频以及高频进行了融合。由于主成分分析方法不能较为完整的保留图像的光谱信息, 而且绝对值取大方法容易产生块效应, 从而使得文献[18]算法的融合性能有所降低。

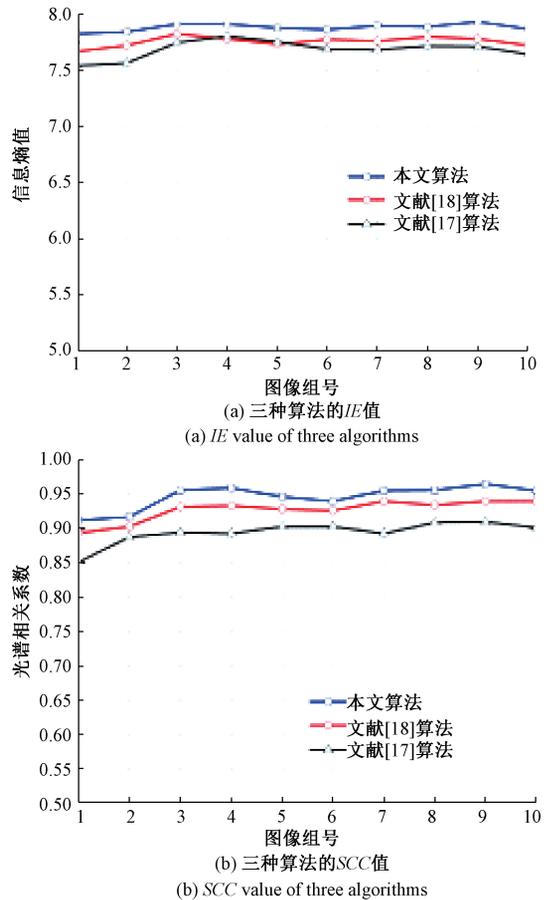


图 9 三种算法的 IE 值与 SCC 值

Fig.9 IE value and SCC value of three algorithms

3 结 论

本文在 NSCT 变换的基础上, 采用图像的标准差信息设计了一种 NSCT 变换耦合对比度特征的遥感图像融合算法。利用 HSV 色彩模型对 MS 图像进行变换, 获取了包含丰富 MS 图像光谱信息的 V 因子。利用 NSCT 变换得到了 V 因子与 PAN 图像的不同系数。利用图像的显著性与区域能量信息融合低频系数。利用图像的标准差信息和平均梯度信息融合高频系数, 采用标准差信息测量图像的对比度特征, 通过平均梯度信息测量图像的细小特征, 增强融合图像的细节表达能力。通过实验可见, 所提算法融合图像保持了较好的光谱及空间信息。

参考文献

- [1] 徐金东,牟春晓,范宝德.图像的多尺度稀疏分解及其在遥感图像融合上的应用[J].烟台大学学报(自然科学与工 程版), 2017, 30(1):48-54.
XU J D, MU CH X, FAN B D. Multi-scale sparse decomposition of image and its application in remote sensing image fusion [J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2017, 30(1):48-54.
- [2] LI Y Y, SUN Y J, HUANG X H. an image fusion method based on sparse representation and sum modified-laplacian in NSCT domain [J]. Entropy, 2018, 20(7): 522.
- [3] 张静,陈宏涛,刘帆.结合多元经验模态分解和加权最小二乘滤波器的遥感图像融合[J].光子学报,2019, 48(5):129-142.
ZHANG J, CHEN H T, LIU F. remote sensing image fusion based on multivariate empirical mode decomposition and weighted least squares filter[J]. Acta Photonica Sinica,2019, 48(5):129-142.
- [4] WU Z L, HUANG Y D, ZHANG K. Remote sensing image multi-feature fusion based on NSCT transform and compressive sensing [C]. Proceedings of the 2nd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology, 2017, 70(1): 115-119.
- [5] 谷志鹏,贺新光.耦合边缘检测与优化的多尺度遥感图像融合法[J].计算机工程与应用,2017,53(11): 192-198.
GU ZH P, HE X G. Multiscale remote sensing image fusion method coupling edge detection and optimization [J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(11): 192-198.
- [6] ABHISHEK S, TARUN G. Novel fusion rules for discrete wavelet transform based image fusion[J]. Indian Journal of Science and Technology,2017,10(19):1-6.
- [7] 王涛,赵延芳,何福红.基于 ZY-3 和图像融合的冲沟参数提取研究 [J]. 农业现代化研究, 2016, 37 (6): 1190-1197.
WANG T, ZHAO Y F, HE F H. Extracting gully parameters using multispectral (MS) and panchromatic (PAN) fusion image of the ZiYuan-3 (ZY-3) satellite[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(6):1190-1197.
- [8] JIN X, CHEN G, HOU J Y. Multimodal sensor medical image fusion based on nonsubsampling shearlet transform and S-PCNNs in HSV space [J]. Signal Processing, 2018, 153(1): 379-395.
- [9] SAMARTH B, SANJIV V B. A fusion based visibility enhancement of single underwater hazy image [J]. International Journal of Advances in Applied Sciences, 2018,7(1):38-45.
- [10] 刘信鑫,魏嫚.可见光-近红外 HSV 图像融合的场景类字典稀疏识别方法[J].计算机应用,2018,38(12): 3355-3359,3366.
LIU J X, WEI M. Scene sparse recognition method via intra-class dictionary for visible and near- infrared HSV image fusion [J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(12): 3355-3359,3366.
- [11] LUO X, LI X, WANG P. Infrared and visible image fusion based on NSCT and stacked sparse autoencoders [J]. Multimedia Tools and Application, 2018, 77 (17): 22407-22431.
- [12] 李玉峰,尹婷婷.采用 NSCT 与 FCM 相结合的 SAR 和多光谱图像融合算法[J].信号处理,2017,33(11): 1523-1529.
LI Y F, YIN T T. The SAR and multispectral image fusion algorithm combined with NSCT and FCM [J]. Journal of Signal Processing, 2017,33(11):1523-1529.
- [13] 朱达荣,许露,汪方斌.基于快速有限剪切波变换与引导滤波的多聚焦图像融合算法[J].激光与光电子学进展,2018,55(1):196-203.
ZHU D R, XU L, WANG F B. Multi-focus image fusion algorithm based on fast finite shearlet transform and guided filter[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2018, 55(1):196-203.
- [14] ASHIRBANI S, GAURAV B, JONATHAN Q M. Mutual spectral residual approach for multifocus image fusion[J]. Digital Signal Processing,2013,23(4):1121-1135.
- [15] ZHANG L, YANG F B, JI L N. Infrared polarization and intensity image fusion algorithm based on the feature transfer[J]. Automatic Control and Computer Sciences, 2018, 52(2):135-145.
- [16] 栾静,殷明,于立萍.基于 Curvelet 和改进区域方差的遥感图像融合[J].合肥工业大学学报(自然科学版), 2015,38(9):1220-1225.
LUAN J, YIN M, YU L P. Remote sensing images fusion based on curvelet transform and improved regional variance weighting [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2015, 38 (9): 1220-1225.
- [17] SINGH D, KAUR M, SINGH H. Remote sensing image fusion using fuzzy logic and gyrator transform[J]. Remote Sensing Letters,2018,9(10):942-951.
- [18] WU Z L, HUANG Y D, ZHANG K. 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.

- [19] ZHONG J Y, YANG B, HUANG G Y. remote sensing image fusion with convolutional neural network [J]. Sensing and Imaging, 2016, 17(10): 1-16.
- [20] 薛洋, 曾庆科, 夏海英. 基于卷积神经网络超分辨率重建的遥感图像融合[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2018, 36(2): 33-41.
- XUE Y, ZENG Q K, XIAO H Y. Remote sensing image fusion based on convolutional neural network super-resolution reconstruction [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2018, 36(2): 33-41.

作者简介



颜正恕, 2003年于宁波大学获得学士学位, 2014年于澳大利亚卧龙岗大学获得硕士学位, 现为宁波诺丁汉大学修读博士研究生, 宁波城市职业技术学院副教授, 主要研究方向为图像处理、遥感测绘、计算机应用、云计算技术。

E-mail: yanzshu1981nbzy@sina.com

Yan Zhengshu received B. Sc. degree from Ningbo University in 2003, and M.Sc. degree from University of Australia Wollongong in 2014. He is a Ph. D. candidate at Nottingham University and an associate professor at Ningbo city College of Vocational Technology. His main research interests include image processing, remote sensing mapping, computer application and cloud computing technology.



王璟, 分别在1995年和2002年于安徽师范大学获得学士学位和硕士学位, 2010年于清华大学获得博士学位, 现为浙江外国语学院副教授, 主要研究方向为机器翻译、人工智能、信息处理。

E-mail: Wangjing1972zj@21cn.com

Wang Jing received B. Sc. and M. Sc. both from Anhui Normal University in 1995 and 2002, and Ph.D. from Tsinghua University in 2010, respectively. Now she is an associate professor at Zhejiang International Studies University. Her main research interests include machine translation, artificial intelligence technology and information processing.