

## 基于非下采样剪切波变换的国产高分遥感影像融合

成飞飞<sup>1</sup>, 付志涛<sup>1\*\*\*</sup>, 牛宝胜<sup>1\*\*</sup>, 黄亮<sup>1,2\*</sup>, 季欣然<sup>1</sup>, 孙宇<sup>1</sup><sup>1</sup>昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;<sup>2</sup>云南省高校高原山区空间信息测绘技术应用工程研究中心, 云南 昆明 650093

**摘要** 针对高分遥感影像融合存在影像间相关性差、融合亮度差异明显的问题,提出了一种基于非下采样剪切波变换(NSST)的国产高分全色与多光谱遥感影像融合方法。选取高分一号、高分二号和高分七号遥感影像作为实验数据,通过强度-色调-饱和度(IHS)提取多光谱影像的亮度分量;利用NSST算法对亮度分量和全色影像提取高频和低频信息,并充分考虑高频和低频之间的关系,设计有效的影像融合策略;最终采用IHS和NSST得到融合影像。与Brovey、Gram-Schmidt(GS)、Hue-Saturation-Value(HSV)、Co-occurrence filtering(COF)等方法对比验证,通过主观和客观评价相结合的方式对融合影像进行综合评价,结果表明所提方法是一种可行的遥感影像融合方法。

**关键词** 遥感; 影像融合; 非下采样剪切波变换; 高分卫星影像

中图分类号 TP751

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1228001

## Fusion of Domestic High Resolution Remote Sensing Images Based on the Non-Subsampled Shearlet Transform

Cheng Feifei<sup>1</sup>, Fu Zhitao<sup>1\*\*\*</sup>, Niu Baosheng<sup>1\*\*</sup>, Huang Liang<sup>1,2\*</sup>, Ji Xinran<sup>1</sup>, Sun Yu<sup>1</sup><sup>1</sup>Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology,  
Kunming 650093, Yunnan, China;<sup>2</sup>Surveying and Mapping Geo-Informatics Technology Research Center on Plateau Mountains of Yunnan  
Higher Education, Kunming 650093, Yunnan, China

**Abstract** To address the problems of poor inter-image correlation and obvious differences in fused brightness in high resolution remote sensing image fusion, this paper proposes a method for fusing domestic high-resolution panchromatic and multispectral remote sensing using the non-subsampled shearlet transform. Remote sensing images of GF-1, GF-2, and GF-7 are selected as the experimental data. The intensity-hue-saturation (IHS) algorithm is used to extract the luminance component of the multispectral image; the non-subsampled shearlet transform (NSST) algorithm is used to extract the high frequency and low frequency information from the luminance component and the panchromatic image; and the relationship between high frequency and low frequency is fully considered when designing an effective image fusion strategy. Finally, the fused image is obtained by the IHS and NSST algorithms. By comparing the proposed method to Brovey, Gram-Schmidt (GS), Hue-saturation-value (HSV), and Co-occurrence filtering (COF) algorithms, it is determined that the proposed method is a feasible remote sensing image fusion method with the combination of subjective and objective evaluation for the fused images.

**Key words** remote sensing; image fusion; non-subsampled shearlet transform; GF satellite image

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-05-15; 录用日期: 2021-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(41961053,41961039)、省级项目(人培)(KKSYS201921019)

通信作者: kmhuangliang@163.com; \*\*1521581642@qq.com; \*\*\*zhitaofu@126.com

## 1 引言

我国的高分卫星专项工程开启了国产的高分辨率对地观测系统,将为中国现代农业、资源监测、交通建设、环境治理、公共安全等重要领域<sup>[1-2]</sup>提供信息服务和决策支持,满足国家经济建设和社会发展需求,对于促进中国空间基础设施建设,推动卫星应用和战略性新兴产业发展具有重大意义。我国的高分系列卫星覆盖了从全色、多光谱到高光谱,从光学到雷达,从太阳同步轨道到地球同步轨道等多种类型,构成了一个具有高空间分辨率、高时间分辨率和高光谱分辨率能力的对地观测系统,然而其庞大的数据量,使得中低分辨率的卫星数据处理方法不再适用。为此,如何快速而高效地提高卫星数据的空间光谱分辨率已经成为目前影像融合领域<sup>[3-4]</sup>的研究热点。

融合的关键是如何在提高融合影像空间分辨率的同时尽量保持原始光谱特性,提高影像信息提取能力。目前为提高影像数据的整体质量,人们在国产高分卫星遥感影像全色/多光谱波段的融合方法方面已经开展了大量的研究,并成功应用到变化检测<sup>[5-6]</sup>、目标提取<sup>[7]</sup>、土地利用分类<sup>[8]</sup>和地质应用<sup>[9]</sup>等领域。郭会敏等<sup>[10]</sup>将主成分分析(PCA)、Gram-Schmidt(GS)、Pan-sharpening 等 3 种传统融合方法与 Elbakry、Proxy-sharpening 和基于亮度调节的平滑滤波(SFIM)等以全色波段为尺度因子的融合方法进行对比,结果表明 Pan-sharpening 和 SFIM 方法在定性和定量分析中光谱和空间融入度均属最优。薛晶等<sup>[11]</sup>采用了 Brovey、PCA、GS、高通滤波(HPF)、最邻近扩散(NND)等 5 种融合方法,其中 HPF 变换法的融合影像光谱畸变最小,光谱信息保持最好;NND 变换法的综合效果最好,其在可见光波段的融合效果很突出;而在近红外波段的融合上,可以考虑 PCA 法和 GS 法。陈业培等<sup>[12]</sup>采用 Brovey 变换、小波变换和超球面彩色变换(HCS)等 10 种影像融合方法对高分二号影像进行融合处理,综合考虑光谱保真度和空间细节表达以及目视效果,HCS 和 NND 方法的融合效果最佳。研究人员也将超分辨率贝叶斯算法<sup>[13]</sup>、变分法<sup>[14]</sup>和深度学习<sup>[15]</sup>等融合方法引入国产高分影像融合领域,但上述融合方法存在融合影像间相关性差、融合亮度差异明显、针对不同的影像泛化能力较差等问

题,所以寻找一种相关性强且泛化能力强的算法至关重要。

本文以高分一号(GF-1)、高分二号(GF-2)和高分七号(GF-7)卫星影像的全色(Panchromatic, PAN)与多光谱(Multispectral, MS)影像为数据源,提出了一种基于非下采样剪切波变换(Non-subsampled shearlet transform, NSST)<sup>[16-17]</sup>的高分 PAN 与 MS 遥感影像融合方法,充分考虑高频和低频之间的关系;针对空间相关性差的问题,高频部分采用了边界测度调制脉冲耦合神经网络(Pulse coupled neural network, PCNN)<sup>[16]</sup>策略模型,通过改变结构大小以适应不同的尺度,增强影像间的相关程度;针对融合后亮度效果差异大的问题,低频部分采用了活跃度水平测量加权局部能量(Weighted local energy, WLE)的融合策略,解决了亮度差异大的问题;通过设计有效的融合策略,解决了影像之间相关性差和融合影像亮度差异大的问题,并采用主观和客观评价组合的方式进行综合评价,验证本文提出遥感影像方法的可行性。

## 2 实验方法

### 2.1 基本理论

#### 2.1.1 非下采样剪切波变换

NSST 进行影像融合处理,不仅具有多尺度特性、较强的平移不变性和方向敏感性,相比非下采样轮廓波变换(Non-subsampled contourlet transform, NSCT),可以处理更小尺度的影像特征。NSST 主要由多尺度分解和方向局部化两部分组成。该过程首先采用非下采样金字塔滤波器(NSPF)对第  $N$  层影像进行多尺度分解,经过一层分解后得到一个低频子带图和一个高频子带图,之后的 NSPF 分解在上次分解后的低频子带上进行;接着对多尺度分解后的子带,采用剪切滤波器进行方向局部化,对得到的高频子带进行逆离散傅里叶变换获得高频子带图,避免频谱混叠现象,使影像分解与重建效果更好。经过 NSST 后,在影像的分解和重构过程中并没有经过下采样操作,解决了变换中平移不变性的问题,保证了得到的子带影像与原始影像大小一致。

#### 2.1.2 脉冲耦合神经网络

PCNN<sup>[18]</sup>是 Eckhorn 于 20 世纪 90 年代提出的一种基于猫视觉神经构建的简化神经网络模型。

作为第三代人工神经网络,PCNN在影像融合领域取得了巨大的成功。PCNN具有很强的生物背景,能够充分提取影像的全局特征并且增强影像细节,十分有利于影像的实时处理。与人们的视觉感知一致,每一个神经元对应于影像的一个特定的像素,且每个神经元由接收域、调制域和脉冲产生器三部分组成。因此,为了提高复杂遥感融合影像的视觉感知效果,充分利用影像间的空间和光谱信息,将PCNN融合策略与NSST结合以获得更好的融合结果。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 融合流程

提出了一种基于NSST的高分全色与多光谱遥感影像融合方法(见图1),主要由5部分组成:IHS变换、NSST分解、高频融合、低频融合和NSST重构。具体步骤:

1) 对原影像进行辐射定标、大气校正和正射校正等预处理,得到校正后的影像裁剪成影像对;

2) 对影像对中的MS影像进行IHS变换提取亮度分量I,并将I和全色影像采用NSST进行多尺

度、多方向分解,得到高频和低频部分;

3) 针对高频分量,采用一种边界调制测量的PCNN模型融合策略,克服了影像间空间相关性差的问题,MSMG表示多尺度形态梯度(Multi-scale morphological gradient);针对低频分量,采用WLE和基于八邻域的加权和修正拉普拉斯算子(Weighted sum of eight-neighborhood-based modified Laplacian, WSEML)的融合策略,以克服融合影像亮度差异大的问题;

4) 再将高频和低频融合部分进行NSST逆变换得到I分量,然后经过IHS逆变换得到最终融合影像;

5) 最后与其他方法进行比较,并进行定量定性评价。

### 2.2.2 高频融合策略

高频子带包含影像更多细节的像素信息。为了增强影像间的空间相关性,采用MSMG调制策略<sup>[16]</sup>从影像中提取梯度信息,可以有效地提取影像的空间信息和增强影像间的相关性,并增强周围像素间的对比度。因此,使用MSMG算子来调整链接强度 $\beta_{ij}^A$ 和 $\beta_{ij}^B$ 的值。

$$\beta_{ij}^A = M_A, \quad (1)$$

$$\beta_{ij}^B = M_B, \quad (2)$$

式中: $i$ 和 $j$ 表示影像的像素位置; $A$ 和 $B$ 表示全色和多光谱影像; $M$ 表示所有尺度上梯度的加权和。 $M_A$ 和 $M_B$ 计算公式为

$$M(x, y) = \sum_{t=1}^N w_t \cdot G_t(x, y), \quad (3)$$

式中: $G_t$ 表示梯度特征, $t$ 表示梯度级数; $(x, y)$ 为像素坐标; $w_t$ 表示第 $t$ 级梯度的权重,计算公式为

$$w_t = \frac{1}{2t + 1}. \quad (4)$$

梯度特征 $G_t$ 可以由来自影像 $f$ 的形态梯度算子表示,即

$$G_t(x, y) = f(x, y) \oplus S_{E_t} - f(x, y) \odot S_{E_t}, \quad (5)$$

$$S_{E_j} = \underbrace{S_{E1} \oplus S_{E1} \oplus \dots \oplus S_{E1}}_j, \quad j \in \{1, 2, \dots, n\}, \quad (6)$$

式中: $S_{E1}$ 表示基本结构元素; $S_{Ej}$ 表示结构化元素和; $\oplus$ 表示形态学膨胀; $\odot$ 表示形态学腐蚀。高频子带的融合可以表示为

$$H_F^{l,k} = \begin{cases} H_A^{l,k}(x, y), & \text{if } T_{xy,A} \geq T_{xy,B} \\ H_B^{l,k}(x, y), & \text{others} \end{cases}, \quad (7)$$

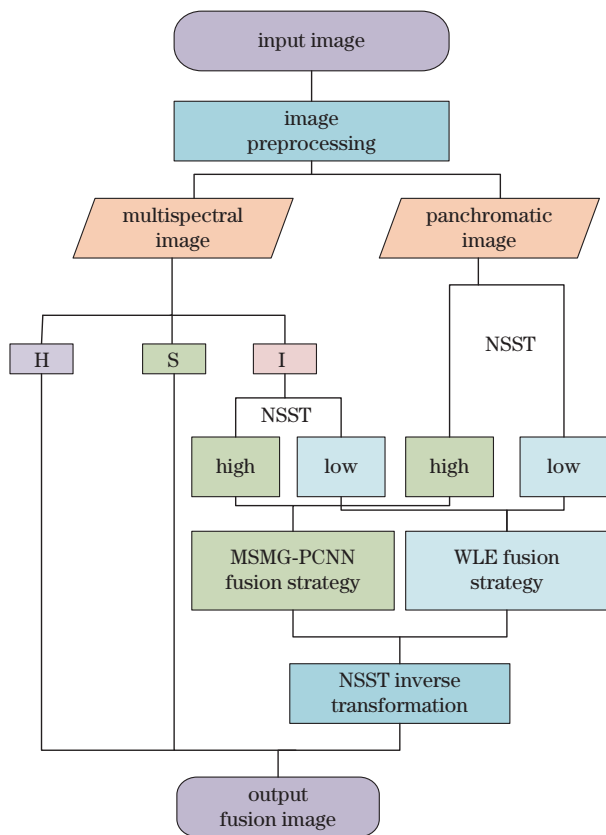


图1 影像融合流程图

Fig. 1 Image fusion flow chart

式中： $H_A^{l,k}$ 和 $H_B^{l,k}$ 代表 A 和 B 高频子带； $H_F^{l,k}$ 代表融合后的高频子带； $T_{xy,A}$ 和 $T_{xy,B}$ 为迭代次数。 $T_{ij}$ 的计算公式为

$$T_{ij} = \begin{cases} k, & \text{if } U_{ij}(k) \geq \theta_{ij}(k-1) \\ T_{ij}(k-1), & \text{others} \end{cases}, \quad (8)$$

式中： $T_{ij}$ 为迭代次数； $U_{ij}(k)$ 表示双通道输出； $\theta_{ij}$ 表示阈值下降的程度； $k$ 表示第  $k$  次输出。

### 2.2.3 低频融合策略

低频子带主要包含原影像的纹理和部分细节信息，采用活跃度水平测量 WLE( $W_{LE}$ )的融合策略，同时保持了影像融合中能量保持和细节提取<sup>[19]</sup>的两个关键因素，解决了融合亮度差异大的问题，计算公式为

$$W_{LES}(i,j) = \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r \mathbf{W} \times (m+r+1, n+r+1) \times L_S(i+m, j+n)^2, \quad (9)$$

式中： $S \in \{A, B\}$ ； $\mathbf{W}$ 是半径为  $r$  的  $(2r+1) \times (2r+1)$  加权矩阵，对于  $\mathbf{W}$  中的每个元素，它的值被设置为  $2^{2r-d}$ ，其中  $d$  是到中心的 4 个邻域的距离。例如， $3 \times 3$  归一化的  $\mathbf{W}$  是

$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

为从原影像中完全提取细节， $W_{SEML}$  称为活跃度水平度量加权和，计算公式为

$$W_{SEMLS}(i,j) = \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r \mathbf{W} \times (m+r+1, n+r+1) \times E_{MLS}(i+m, j+n), \quad (10)$$

式中， $E_{MLS}$  被定义为

$$E_{MLS}(i,j) = |2S(i,j) - S(i-1,j) - S(i+1,j)| + |2S(i,j) - S(i,j-1) - S(i,j+1)| + \frac{1}{\sqrt{2}} |2S(i,j) - S(i-1,j-1) - S(i+1,j+1)| + \frac{1}{\sqrt{2}} |2S(i,j) - S(i-1,j+1) - S(i+1,j-1)|. \quad (11)$$

$E_{MLS}$  算子考虑了对角系数的影响，充分利用相邻信息，两个对角项的权重可根据欧氏距离设置为  $1/\sqrt{2}$ 。

低频带的最终活跃度水平度量被定义为  $W_{LE}$  和  $W_{SEML}$  的乘积，因此低频子带融合可表示为

$$L_F^{l,k}(i,j) = \begin{cases} L_A^{l,k}(i,j), & \text{if } W_{LEA}(i,j) \cdot W_{SEMLA}(i,j) \geq W_{LEA}(i,j) \cdot W_{SEMLA}(i,j) \\ L_B^{l,k}(i,j) & \text{others} \end{cases}, \quad (12)$$

式中， $L_A^{l,k}$ 和 $L_B^{l,k}$ 代表 A 和 B 低频子带， $L_F^{l,k}$ 代表融合后的低频子带。

### 2.3 融合评价指标

本文采用主观和客观评价组合的方式进行综合评价，在客观评价方面用光谱角(SAM)、互信息(MI)、结构相似性(SSIM)、像素级融合质量评估( $Q^{AB/F}$ )、相对全局融合误差(ERGAS)、峰值信噪比(PSNR)、相关系数(CC)和视觉信息保真度(VIFF)8个度量来评估不同的融合方法，验证本文

提出的遥感影像方法的可行性。

## 3 结果与讨论

### 3.1 实验设置

为验证本文方法的优越性和适用性，分别选取 GF-1、GF-2 和 GF-7 影像作为实验数据(见表 1)。图 2 中(a)~(b)为 GF-1 影像，(c)~(d)为 GF-2 影像，(e)~(f)为 GF-7 影像，利用 ENVI5.3.1 对 GF-1、GF-2 和 GF-7 卫星 PAN 影像和 MS 影像进行

表 1 研究区域影像信息

Table 1 Study area image information

Experimental data	Acquisition time	Revisit period /d	Spatial resolution		Crop image block size /pixel×pixel
			Multispectral image /m	Panchromatic image /m	
GF-1	2015-10-24	4	8.0	2.00	256×256
GF-2	2017-01-19	5	3.2	0.80	512×512
GF-7	2020-09-07	/	2.6	0.65	512×512

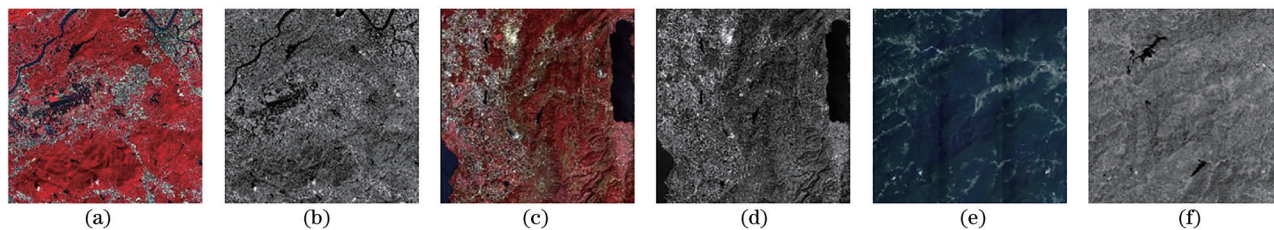


图2 研究区域影像图。(a) GF-1 MS; (b) GF-1 PAN; (c) GF-2 MS; (d) GF-2 PAN; (e) GF-7 MS; (f) GF-7 PAN

Fig. 2 Study area image. (a) GF-1 MS; (b) GF-1 PAN; (c) GF-2 MS; (d) GF-2 PAN; (e) GF-7 MS; (f) GF-7 PAN

大气校正、辐射校正和正射校正等预处理,将经过预处理后的 PAN 和 MS 影像进行裁剪,分别用 Brovey、GS、HSV、COF<sup>[20]</sup> 以及本文提出的方法进行融合实验。通过 5 种方法将裁剪后原始 PAN 影像和原始 MS 影像进行融合。在该融合算法模型中,在充分考虑时间效率的情况下,使用了以下参数: NSST 分解层数为 4, 迭代次数  $k=200$ , 每个级别的方向参数设置为 32、32、16、16, 在充分考虑时

间效率的情况下,实验参数 MSMG 算子尺度数  $t=3$ , 半径  $r=1$ , 窗口大小为  $3 \times 3$ 。

### 3.2 第一组数据与实验结果

图 3 为 GF-1 卫星裁剪建筑、耕地和水体的影像对, 图 4 为采用 Brovey、GS、HSV、COF 和本文方法得到的融合结果。表 2 为第一组实验数据经过各种方法进行遥感影像融合得到的客观评价结果。

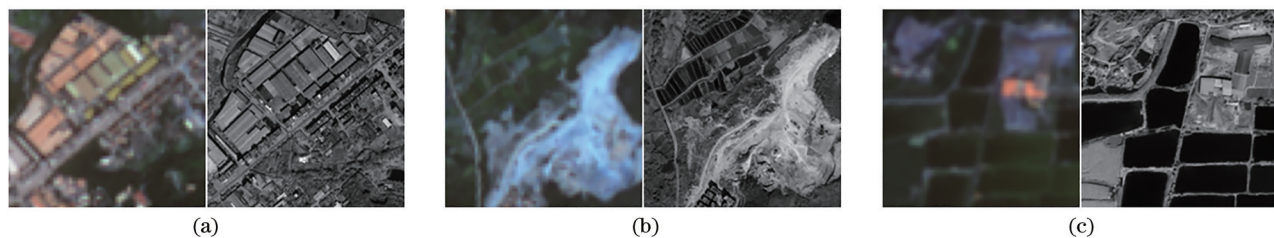


图3 裁剪GF-1影像图。(a)建筑; (b)耕地; (c)水体

Fig. 3 Cropped GF-1 images. (a) Building; (b) plow; (c) water

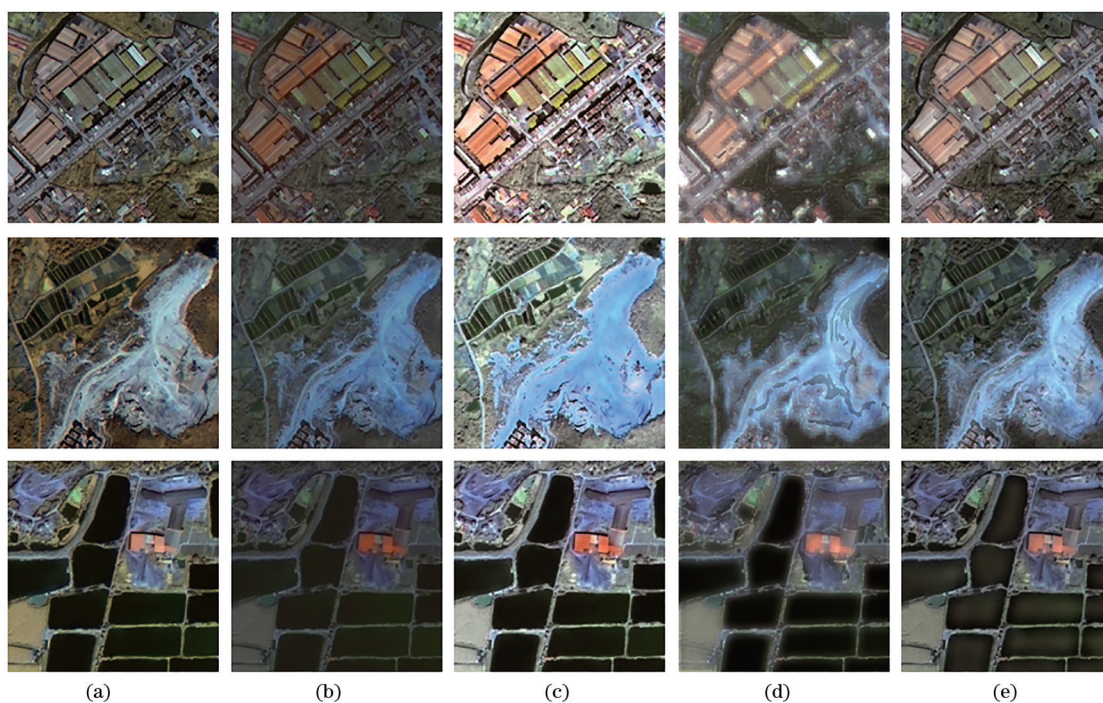


图4 GF-1影像图融合效果。(a) Brovey; (b) GS; (c) HSV; (d) COF; (e) 本文方法

Fig. 4 GF-1 image fusion effect. (a) Brovey; (b) GS; (c) HSV; (d) COF; (e) ours

表 2 GF-1 影像融合客观评价指标

Table 2 Objective evaluation index of GF-1 image fusion

Image source	Image fusion method	Evaluation index							
		SAM ↓	MI ↑	SSIM ↑	$Q^{AB/F}$ ↑	ERGAS ↓	PSNR ↑	CC ↑	VIFF ↑
GF-1	Brovey	7.7366	1.7376	0.4086	0.1485	94.2994	35.5118	0.5537	0.2613
	GS	2.5964	<b>4.1207</b>	0.8126	0.4696	69.2078	41.6688	0.8139	0.1873
	HSV	4.1977	1.5296	0.3044	0.1187	158.7498	24.4165	0.3291	0.0568
	COF	0.2014	3.3265	0.6823	0.3524	<b>63.5375</b>	<b>47.5872</b>	0.8113	0.4694
	Ours	<b>0.1891</b>	3.0287	<b>0.9055</b>	<b>0.7053</b>	66.2150	45.8573	<b>0.8413</b>	<b>0.6572</b>

Notes: The thickened part is the optimal value. ↑ is the larger, the better and ↓ is the smaller, the better.

由图 4 可知,GS 和本文方法相较于其他融合方法,具有愈加丰富的光谱和纹理等特征,且更加符合人眼特性,说明本文方法采用的融合策略较好地保持了空间特征,大大减少了光谱失真现象的发生;而 Brovey 和 HSV 融合的结果存在严重的光谱失真现象;COF 方法存在严重的虚影现象。由表 2 可知,本文方法在 SAM、SSIM、 $Q^{AB/F}$ 、CC、VIFF 总体上达到最优的效果;而 ERGAS、PSNR 获得次优效果,存在一定的信息失真和扭曲现象,丢失部分原影像的信息;MI 取得一般的值,说明存在一定的信息丢失现象,说明本文方法在融合时还需进一步提升融合策略。本文方法相较传统 Brovey、GS、HSV 和 COF 方法,空间细节表现能力得到了有效提高,同时融合影像光谱畸变程度变小,边缘、轮廓更为清晰,视觉效果更佳,总体在主观和客观评价方面获得最优值。

### 3.3 第二组数据与实验结果

图 5 为 GF-2 卫星裁剪建筑、耕地和水体的影像对,图 6 为采用 Brovey、GS、HSV、COF 和本文方法得到的融合结果。表 3 为第一组实验数据经过各种

方法进行遥感影像融合得到的客观评价结果。

由图 6 可知, Brovey、GS 和本文方法相较于其他融合方法,具备愈加丰富的光谱和纹理等特征,空间相关性好,光谱差异小,且更加符合人眼特性,说明本文方法采用的融合策略不仅可以适应较低分辨率的遥感影像,也适应高分辨率的遥感影像,而 HSV 融合的结果存在严重的光谱失真现象,COF 出现一定的虚影现象。由表 3 可知,本文方法在 SSIM、 $Q^{AB/F}$ 、ERGAS、PSNR、CC、VIFF 都获得了最优值,在 SAM 和 MI 获得次优值,说明本文方法总体上都达到了最优的效果。与第一组 GF-1 影像相比,采用了较高分辨率 GF-2 遥感影像,ERGAS 和 PSNR 达到了最优值,说明本文方法更适合高分辨的影像。

### 3.4 第三组数据与实验结果

图 7 为 GF-7 卫星裁剪建筑、耕地和水体的影像对,图 8 为采用 Brovey、GS、HSV、COF 和本文方法得到的融合结果图。表 4 为第一组实验数据经过各种方法进行遥感影像融合得到的客观评价结果。

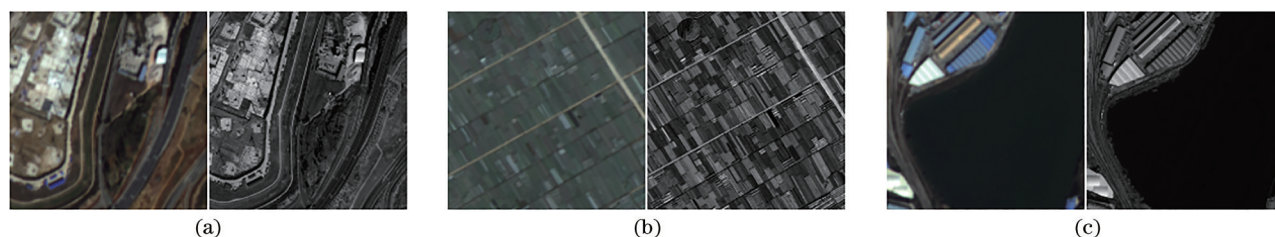


图 5 裁剪 GF-2 影像图。(a) 建筑; (b) 耕地; (c) 水体

Fig. 5 Cropped GF-2 images. (a) Building; (b) plow; (c) water

由图 8 可以看出,COF 和本文方法相较于其他融合方法,颜色信息与原图像相似,光谱失真较小,但 COF 方法在空间结果方面出现严重伪影,导致地物的轮廓不清晰。Brovey、GS 和 HSV 融合的结果相比于原影像融合后结果偏蓝。由表 4 可知,本文

方法在 SSIM、CC 达到了最优的效果,而 SAM、 $Q^{AB/F}$ 、ERGAS、PSNR 获得次优效果。虽然 COF 方法在 SAM、ERGAS 和 PSNR 在客观评价指标上获得最优,但是视觉效果相比本文方法较差。从实验结果可知,相比 GF-1 和 GF-2 影像,本文方法在融

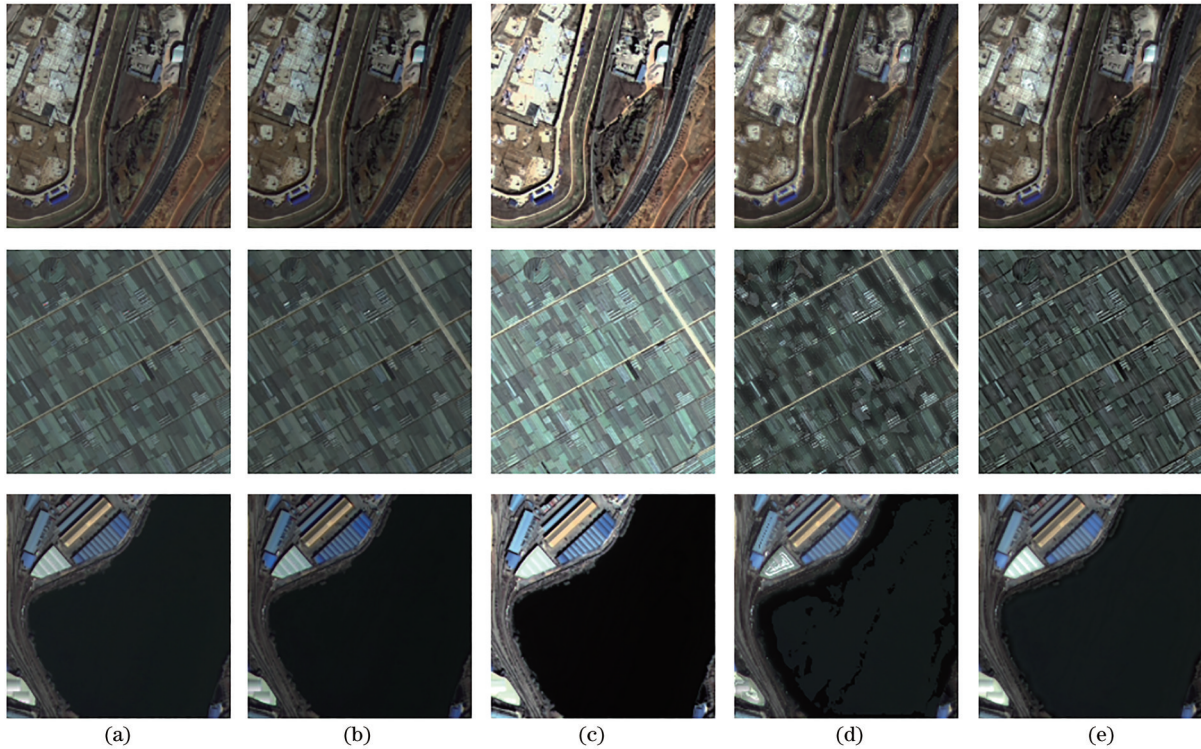


图6 GF-2影像图融合效果图。(a) Brovey; (b) GS; (c) HSV; (d) COF; (e) 本文方法

Fig. 6 GF-2 image fusion effect. (a) Brovey; (b) GS; (c) HSV; (d) COF; (e) ours

表3 GF-2影像融合客观评价指标

Table 3 Objective evaluation index of GF-2 image fusion

Image source	Image fusion method	Evaluation index							
		SAM ↓	MI ↑	SSIM ↑	$Q^{AB/F}$ ↑	ERGAS ↓	PSNR ↑	CC ↑	VIFF ↑
GF-2	Brovey	0.3621	2.0939	0.5496	0.2211	55.0622	51.6353	0.7499	0.3367
	GS	2.0431	2.1633	0.6585	0.2539	59.5750	49.9990	0.7280	0.2809
	HSV	0.7273	2.1734	0.4916	0.2150	144.4246	31.7399	0.7217	0.6638
	COF	<b>0.1705</b>	<b>3.4190</b>	0.7589	0.4534	49.2401	54.7475	0.8780	0.6086
	Ours	0.1782	3.0032	<b>0.8794</b>	<b>0.7057</b>	<b>46.0542</b>	<b>57.0434</b>	<b>0.8891</b>	<b>0.7322</b>

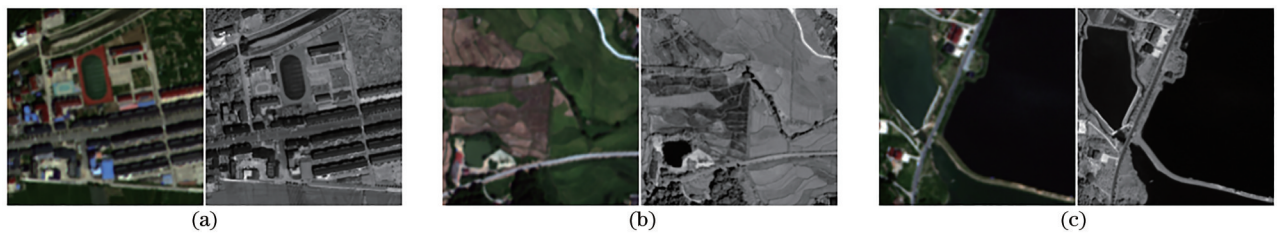


图7 裁剪GF-7影像图。(a)建筑; (b)耕地; (c)水体

Fig. 7 Cropped GF-7 images. (a) Building; (b) plow; (c) water

合更高分辨率时效果有所下降,还需进一步提升融合策略的设计。本文方法相较传统 Brovey、GS、HSV 和 COF 方法来说,在主观和客观评价方面具有一致性,在空间细节表现能力方面得到了有效提高,同时光谱畸变程度较小,边缘、轮廓更为清晰,视觉效果更佳。

综上所述,本文方法在针对 GF-1、GF-2 和 GF-7 不同分辨率的影像融合时,更好地保留了空间和光谱信息,融合的效果符合人眼视觉感知。虽然客观评价指标有差异,但总体上均达到了最优的效果。该融合策略有效地解决了空间相关性和亮度差异性等问题,说明本文方法的融合策略是可行的。

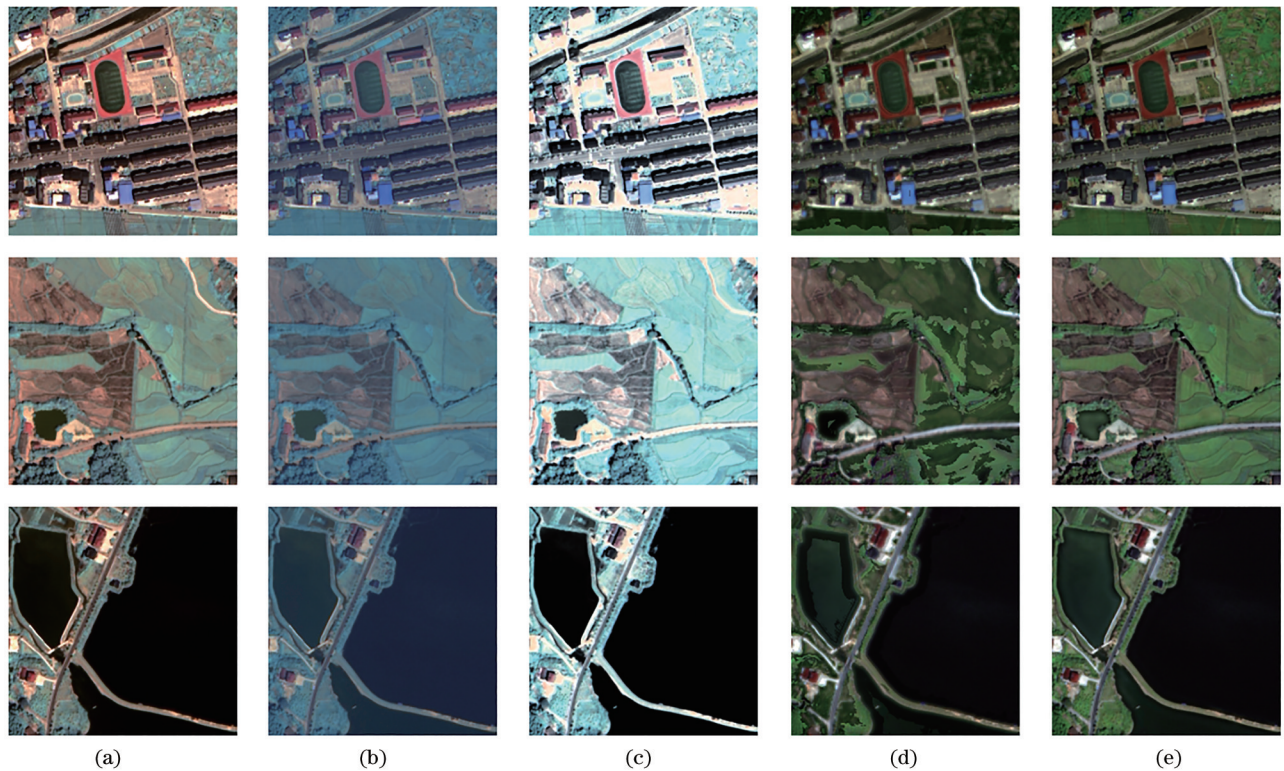


图 8 GF-7 影像图融合效果。(a) Brovey; (b) GS; (c) HSV; (d) COF; (e) 本文方法

Fig. 8 GF-7 image fusion effect. (a) Brovey; (b) GS; (c) HSV; (d) COF; (e) ours

表 4 GF-7 影像融合客观评价指标

Table 4 Objective evaluation index of GF-7 image fusion

Image source	Image fusion method	Evaluation index							
		SAM ↓	MI ↑	SSIM ↑	$Q^{AB/F}$ ↑	ERGAS ↓	PSNR ↑	CC ↑	VIFF ↑
GF-7	Brovey	19.4542	<b>5.2579</b>	0.8435	<b>0.6329</b>	209.0275	30.1183	0.8282	0.7483
	GS	12.9954	4.7994	0.7807	0.5430	165.9524	31.9917	0.8269	0.4080
	HSV	9.7949	3.4614	0.5719	0.3204	379.6045	17.6740	0.7719	<b>1.1922</b>
	COF	<b>0.2740</b>	3.7737	0.6904	0.4129	<b>81.2305</b>	<b>54.4365</b>	0.8144	0.6450
	Ours	0.3500	3.6462	<b>0.9027</b>	0.6123	109.4364	47.5092	<b>0.8770</b>	0.6966

## 4 结 论

提出了一种基于 NSST 的国产高分 PAN 与 MS 遥感影像融合方法。选取 GF-1、GF-2 和 GF-7 不同分辨率的高分遥感影像作为实验数据,利用边界测度调制 PCNN 策略模型和 WLE 活跃度水平度量策略的融合策略,较好地解决影像间空间相关弱和融合影像亮度差异大的问题。通过大量实验验证本文方法的可靠性和泛化能力,该融合方法在影像呈现出的边缘细节、光谱畸变等视觉效果及定量评价指标总体优于基于 Brovey、GS、HSV 和 COF 等方法,但还需在融合高分分辨率时采用更适合的融合策略,使得融合效果进一步提升。在未来的研究中,将重点研究更适合国产高分遥感影像的融合策略。

## 参 考 文 献

[1] 王永吉, 明艳芳, 梁天辰, 等. 基于改进 LCCD 算法的高分六号 WFV 数据云检测研究[J]. 光学学报, 2020, 40(21): 2128001.  
Wang Y J, Ming Y F, Liang T C, et al. GF-6 WFV data cloud detection based on improved LCCD algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(21): 2128001.

[2] 易维, 曾湧, 原征. 基于 NSCT 变换的高分三号 SAR 与光学图像融合[J]. 光学学报, 2018, 38(11): 1110002.  
Yi W, Zeng Y, Yuan Z. Fusion of GF-3 SAR and optical images based on the nonsubsamped contourlet transform[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(11): 1110002.

[3] Ghamisi P, Rasti B, Yokoya N, et al. Multisource and multitemporal data fusion in remote sensing: a



- comprehensive review of the state of the art[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2019, 7(1): 6-39.
- [4] 毛士艺, 赵巍. 多传感器图像融合技术综述[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 512-518.  
Mao S Y, Zhao W. Comments on multisensor image fusion techniques[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 512-518.
- [5] 孙中平, 白金婷, 史园莉, 等. 基于高分影像的面向对象土地利用变化检测方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(S1): 297-303.  
Sun Z P, Bai J T, Shi Y L, et al. Object-oriented detection of land use changes based on high spatial resolution remote sensing image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(S1): 297-303.
- [6] 付青, 郭晨, 罗文浪. 基于高分一号卫星遥感影像的土地利用变化检测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(16): 162802.  
Fu Q, Guo C, Luo W L. Land use change detection based on GF-1 satellite remote sensing images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(16): 162802.
- [7] 吉长东, 康仲林. 高分六号卫星城市建成区提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 0428003.  
Ji C D, Kang Z L. Extraction method of urban area from GF-6 satellite[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 0428003.
- [8] 马长辉. 基于高分影像的土地覆盖分类方法研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2018: 1-61.  
Ma C H. Land cover classification method based on high-resolution imagery[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2018: 1-61.
- [9] 田青林, 余长发, 潘蔚, 等. 面向地质应用的高分二号卫星影像融合方法评价[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 207-212.  
Tian Q L, Yu C F, Pan W, et al. Evaluation on fusion method for GF-2 satellite images in geological application[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(29): 207-212.
- [10] 郭会敏, 洪运富, 李营, 等. 基于高分一号卫星影像的多种融合方法比较[J]. 地理与地理信息科学, 2015, 31(1): 2, 23-26, 40.  
Guo H M, Hong Y F, Li Y, et al. Comparison of fusion methods used for GF-1 satellite image[J]. Geography and Geo-Information Science, 2015, 31(1): 2, 23-26, 40.
- [11] 薛晶, 官云兰, 李宜龙, 等. “高分二号”卫星影像融合方法对比和评价[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(2): 91-99.  
Xue J, Guan Y L, Li Y L, et al. Comparison and evaluation of image fusion algorithms for GF-2 satellite images[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(2): 91-99.
- [12] 陈业培, 孙开敏, 白婷, 等. 高分二号影像融合方法质量评价[J]. 测绘科学, 2017, 42(11): 35-40.  
Chen Y P, Sun K M, Bai T, et al. Quality assessment on image fusion methods for GF-2 data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2017, 42(11): 35-40.
- [13] 邵亚奎, 朱长明, 张新, 等. 国产高分卫星遥感影像融合方法比较与评价[J]. 测绘通报, 2019(6): 5-10.  
Shao Y K, Zhu C M, Zhang X, et al. Comparison of different fusion methods and their performance evaluation to high spatial resolution remote sensing data of GF[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(6): 5-10.
- [14] 尹峰, 孟祥超, 梁鹏. 一种国产高分卫星遥感影像差分融合方法[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(2): 100-106.  
Yin F, Meng X C, Liang P. A variational fusion method for remote sensing images of China's domestic high-resolution satellites[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2018, 30(2): 100-106.
- [15] 涂荣杰. 基于深度学习的国产高分辨率影像融合方法研究[D]. 抚州: 东华理工大学, 2018.  
Tu R J. Deep learning based domestic high-resolution remote sensing images fusion[D]. Fuzhou: East China Institute of Technology, 2018.
- [16] Tan W, Tiwari P, Pandey H M, et al. Multimodal medical image fusion algorithm in the era of big data[J]. Neural Computing and Applications, 2020: 1-21.
- [17] 萧明伟, 李素敏, 李雁. 基于区域性 IHS\_NSST 的国产高分合成孔径雷达和光学图像融合[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(18): 181013.  
Xiao M W, Li S M, Li Y. Fusion of domestic high resolution synthetic aperture radar and optical images based on regional IHS\_NSST[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(18): 181013.
- [18] Wang Z B, Ma Y D, Cheng F Y, et al. Review of pulse-coupled neural networks[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(1): 5-13.
- [19] Yin M, Liu X N, Liu Y, et al. Medical image fusion with parameter-adaptive pulse coupled neural network in nonsubsampling shearlet transform domain[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(1): 49-64.
- [20] Tan W, Xiang P, Zhang J J, et al. Remote sensing image fusion via boundary measured dual-channel PCNN in multi-scale morphological gradient domain[J]. IEEE Access, 2020, 8: 42540-42549.