

# 基于 NSCT 变换的高分三号 SAR 与光学图像融合

易维\*, 曾湧, 原征

中国资源卫星应用中心, 北京 100094

**摘要** 高分三号卫星是世界上成像模式最多的合成孔径雷达(SAR)卫星, 高分三号 SAR 图像与多光谱图像融合可以改善图像视觉效果。因此提出一种新的研究思路, 即利用非下采样轮廓波变换(NSCT)模拟出既包含多光谱波段信息又体现 SAR 图像细节信息的高分辨率图像, 则融合可不拘泥于具体算法。同时提出两种基于 NSCT 的高分辨率图像模拟方法, 利用高分三号 3 m、5 m 分辨率 SAR 图像和高分一号 16 m 分辨率图像进行实验, 采用不同融合算法验证了该思路的有效性。研究表明: 传统的 SAR 和多光谱图像直接融合的方法能够保持 SAR 的细节信息, 但噪声明显, 且光谱信息损失大; 而所提出的 NSCT 平均图像和平均 NSCT 图像可以保留融合结果的光谱信息, 且模拟的光谱信息前者比后者更贴近多光谱。

**关键词** 图像处理; 合成孔径雷达与可见光图像; 非下采样轮廓波变换; 高分三号卫星; 评价指标

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1110002

## Fusion of GF-3 SAR and Optical Images Based on the Nonsubsampled Contourlet Transform

Yi Wei\*, Zeng Yong, Yuan Zheng

China Center for Resource Satellite Data and Applications, Beijing 100094, China

**Abstract** Among the existing synthetic-aperture radar (SAR) satellites, the GF-3 offers the most kinds of imaging modes. The fusion of the GF-3 SAR images with the multi-spectral images can improve the visual quality of the SAR images. We show how to use the nonsubsampled contourlet transform (NSCT) for simulating high-resolution images such that both the details of the SAR image and the spectral information of the multi-spectral image can be retained. This method ensures that the fusion of SAR and multi-spectral images is not limited by a specific algorithm. To verify the effectiveness of the proposed idea, two types of resolutions are used as the experimental data: the GF-3 satellite SAR images with resolutions of 3 m and 5 m, respectively, and the GF-1 satellite multi-spectral images with a resolution of 16 m. We perform comparative experiments with different fusion algorithms. The results show the effectiveness of the proposed approach. The traditional method that directly fuses the SAR and multi-spectral images can keep the details of the SAR image. However, the noise is obvious and some information of the multi-spectral image remains. The NSCT average images and the average NSCT images can retain the spectral information. The spectral information of NSCT average images is closer to the multi-spectral images than the average NSCT images.

**Key words** image processing; synthetic-aperture radar and optical image; nonsubsampled contourlet transform; GF-3 satellite; evaluation index

**OCIS codes** 100.2000; 100.2960; 350.2660; 350.5730

## 1 引 言

高分三号卫星是“国家高分辨率对地观测系统重大专项”中唯一的合成孔径雷达(SAR)卫星, 采用聚束模式图像最高分辨率可达 1 m<sup>[1]</sup>。SAR 卫星能够满足全天时、全天候的观测要求, 同时具备较强

的穿透力, 能够突出特定地物的结构细节, 但由于图像仅反应单一波段的信息, 目视效果与人眼差异较大<sup>[2-3]</sup>。采用像素级图像融合技术将 SAR 图像与多光谱图像结合, 可以有效利用两者优势, 增强图像的解译能力<sup>[4-5]</sup>。

很多学者尝试 SAR 图像和多光谱图像的像素

收稿日期: 2018-05-22; 修回日期: 2018-06-07; 录用日期: 2018-06-13

基金项目: 中国航天科技集团公司钱学森青年创新基金(政字[2017]17号)

\* E-mail: weiyi\_cresda@sina.com

级的融合,其融合规则与光学图像类似,将雷达图像取代高分辨率的全色图像,融合结果可具备雷达图像包涵的细节信息,同时保持了多光谱图像的谱段信息,常用的方法有主成分分析(PCA)、强度-色调-饱和度(IHS)、乘积变换(Brovey)、合成变量系数(SVR)和小波变换等<sup>[6-10]</sup>。而雷达与光学成像机理不同,谱段信息差异较大,融合结果会产生光谱畸变,很难达到满意的效果。

为应对此类问题,多尺度几何分析方法已用于 SAR 图像和光学图像的融合研究。对单谱段图像,直接利用多尺度几何分析方法融合,不仅抑制了 SAR 图像的噪声信息,而且取得了较好的效果<sup>[11-13]</sup>。对多光谱图像,则将传统融合方法和多尺度几何分析进行结合<sup>[14-16]</sup>,先对多光谱图像进行空间变换,将主要表达信息的分量与 SAR 图像采用单谱段图像融合方式得到新的分量,再进行逆变换的方式融合,能够减少光谱畸变。但是仅限于能够进行空间变换的融合方法(如 PCA 和 IHS),在多光谱图像融合普遍应用的乘法加权和回归计算融合方法(如 Brovey 和 SVR)却鲜有与多尺度几何分析进行结合的案例。鉴于此,本研究提出一种新的研究思路,即利用多尺度分析方法中的非下采样轮廓波变换(NSCT)保持细节信息的优势,模拟出包含多光谱谱段信息且不丢失 SAR 图像本身细节的高分辨率图像,以此替代可见光融合中的全色图像,再进行后续融合。这种思路一方面以 NSCT 变换减少光谱畸变,保持 SAR 图像的细节;另一方面可以与更多融合算法结合,而不局限于空间变换的融合算法。

## 2 研究数据及预处理

本研究图像来源于高分三号和高分一号卫星。高分三号卫星是我国首颗多极化 SAR 卫星,具备 12 种成像模式,是目前世界成像模式最多的 SAR 卫星<sup>[1]</sup>。为验证本研究思路的有效性,选取的超精细条带和精细条带 1 成像图像作为验证,其标称分辨率分别为 3 m 和 5 m。高分一号卫星实现了高分辨率与大幅宽相结合的光学遥感技术<sup>[17]</sup>。2 m 高分辨率实现 >60 km 的成像幅宽,而 16 m 分辨率实现 >800 km 的成像幅宽,本文多光谱图像采用高分一号卫星 16 m 分辨率图像,具体数据信息如表 1 所示。

SAR 数据标准产品为二级,经过了相对辐射校正和系统级几何校正,采用 Transverse Mercator 投影;多光谱数据标准产品为一级,经过相对辐射校正并自带有理多项式系数(RPC)数据。因此,对多光

表 1 数据信息

Table 1 Data information

Satellite	Image type	Resolution /m	Date	Product level
GF-3	SAR	3	2017-02-15	2
GF-3	SAR	5	2017-08-28	2
GF-1	Multi-spectral	16	2017-07-12	1

谱数据进行正射处理,统一图像投影,保证相同的区域在图像上的形变一致;再对多光谱数据进行升采样,分别处理成 3 m 和 5 m 空间分辨率的图像;两幅 SAR 图像覆盖范围不一致,分别选取图中感兴趣的区域,裁取研究范围;将多光谱图像与 SAR 图像进行空间匹配。

研究范围内地物特征如图 1 所示,3 m SAR 图像主要包括盐田和道路;5 m SAR 图像主要包括农田和道路,并有少量建筑物存在。3 m SAR 图像如图 1(a)所示,而图 1(b)为对应的 16 m 分辨率多光谱真彩色合成图像;5 m SAR 图像如图 1(c)所示,而图 1(d)为对应的 16 m 分辨率多光谱真彩色合成图像。

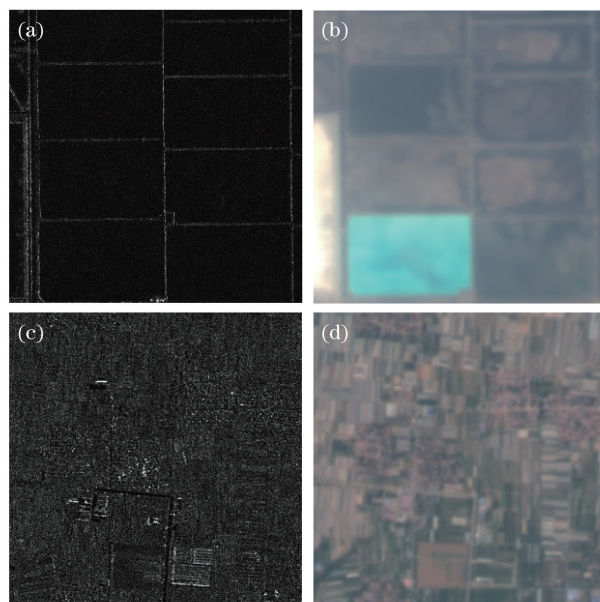


图 1 源图像。(a) 3 m SAR 图像;(b) 16 m 多光谱图像;(c) 5 m SAR 图像;(d) 16 m 多光谱图像

Fig. 1 Original images. (a) 3 m SAR image; (b) 16 m multi-spectral images; (c) 5 m SAR image; (d) 16 m multi-spectral image

## 3 研究方法

### 3.1 研究思路

参照光学图像融合方法,若不产生光谱畸变,则需要高分辨率图像的信息尽可能包含多光谱谱段,

且不丢失 SAR 图像本身的细节,融合可不拘泥于具体算法,因此研究的关键是模拟包含 SAR 信息和多光谱信息的高分辨率图像。NSCT 变换能够很好的分解出图像中的细节和近似光谱信息,采用 NSCT 变换将 SAR 图像细节和多光谱的光谱信息结合,并

利用 Brovey、IHS、PCA、SVR 等 4 种融合算法进行验证。其评价方式由主观和客观指标结合,主观评价主要采用人工判别,而客观评价采用平均梯度、熵、相关系数、光谱扭曲度等 4 个独立指标和 1 个综合指标,具体实验流程如图 2 所示。

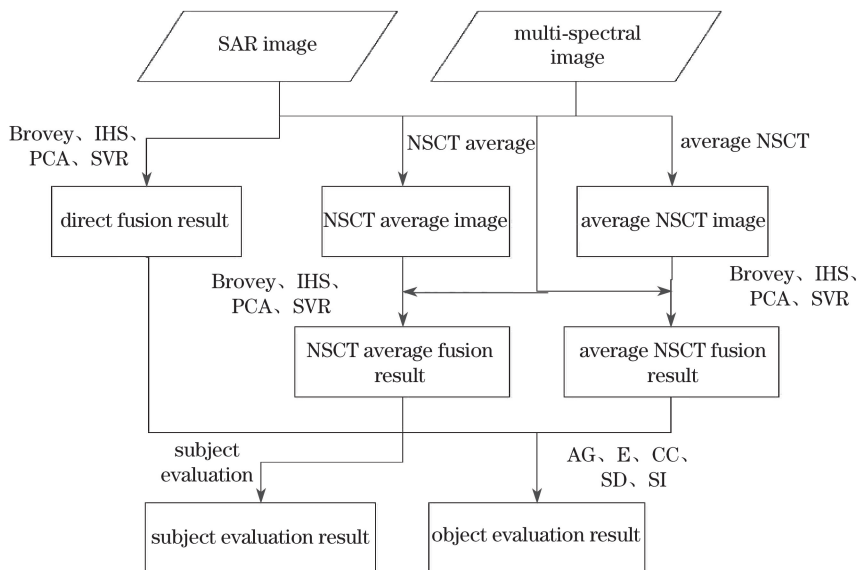


图 2 研究流程

Fig. 2 Flow chart of the research process

### 3.2 NSCT 变换

da Cunha 等<sup>[18]</sup>提出了 NSCT 变换理论,其核心思想是采用非下采样的拉普拉斯金字塔滤波器(NSPFB)和非下采样方向滤波器(NSDFB)对图像进行多尺度、多方向分解。NSPFB 对图像进行多尺度分解,以保证图像变换具有多分辨率特性;NSDFB 对得到各尺度子带图像进行方向分解,以保证图像变换具有多方向特性,从而得到了不同尺度、不同方向子带的图像。图 3 所示为 NSCT 分解后频域划分示例。

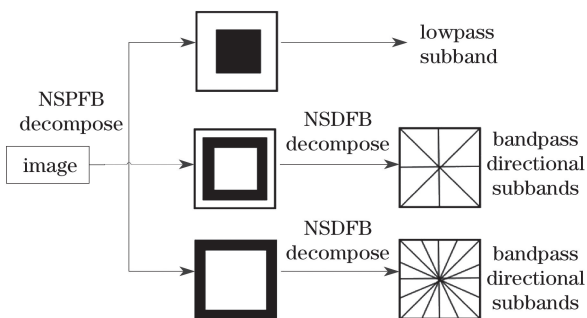


图 3 NSCT 滤波器组织结构图

Fig. 3 Diagram of the NSCT filter structure

在此过程中,模拟出尽可能包含多光谱谱段,且不丢失 SAR 图像本身细节的高分辨率图像是关键步骤。由于 SAR 图像谱段与可见光不一致,谱段信

息来源于多光谱,因此提出两种高分辨率图像的生成方法以作对比。

第一种方法是直接利用 4 个多光谱图像灰度值加权平均得到多光谱平均图像,将 NSCT 分解多光谱平均图像的低通子带作为新图像的低通子带,多光谱平均图像和 SAR 图像带通方向子带系数的最大值作为新图像的带通方向子带系数,再进行 NSCT 反变换生成高分辨图像。由于此方法模拟的高分辨图像先对多光谱图像平均再做 NSCT 变换,故取名为平均 NSCT 图像,模拟过程如图 4 所示。

第二种方法是先通过 NSCT 变换将 4 个多光谱图像分别进行低通子带和带通方向子带分解,取 4 个谱段低通子带系数平均值作为新图像的低通子带,多光谱图像和 SAR 图像带通方向子带系数的最大值作为新图像的带通方向子带系数,再进行 NSCT 反变换生成高分辨图像。由于第二种高分辨图像先对多光谱进行 NSCT 变换再进行低通子带系数平均,故取名 NSCT 平均图像,模拟过程如图 5 所示。

### 3.3 融合方法

#### 1) Brovey 融合

Brovey 融合假设高分辨图像与多光谱图像的光谱响应范围相同,通过归一化后的多光谱图像与

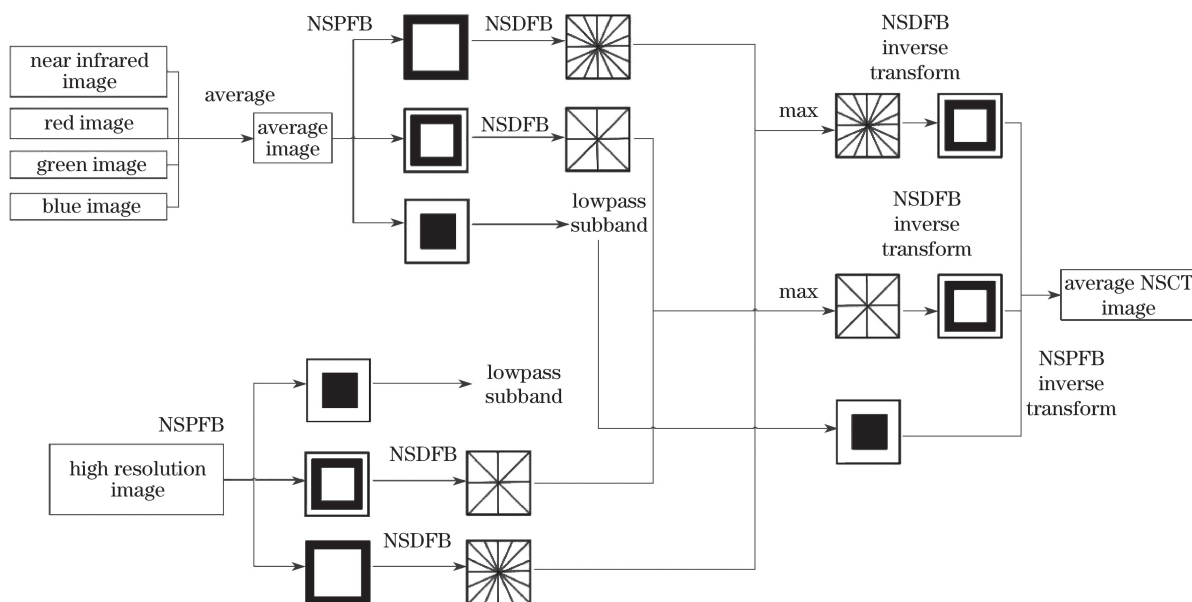


图 4 平均 NSCT 图像模拟流程

Fig. 4 Average NSCT image simulation process

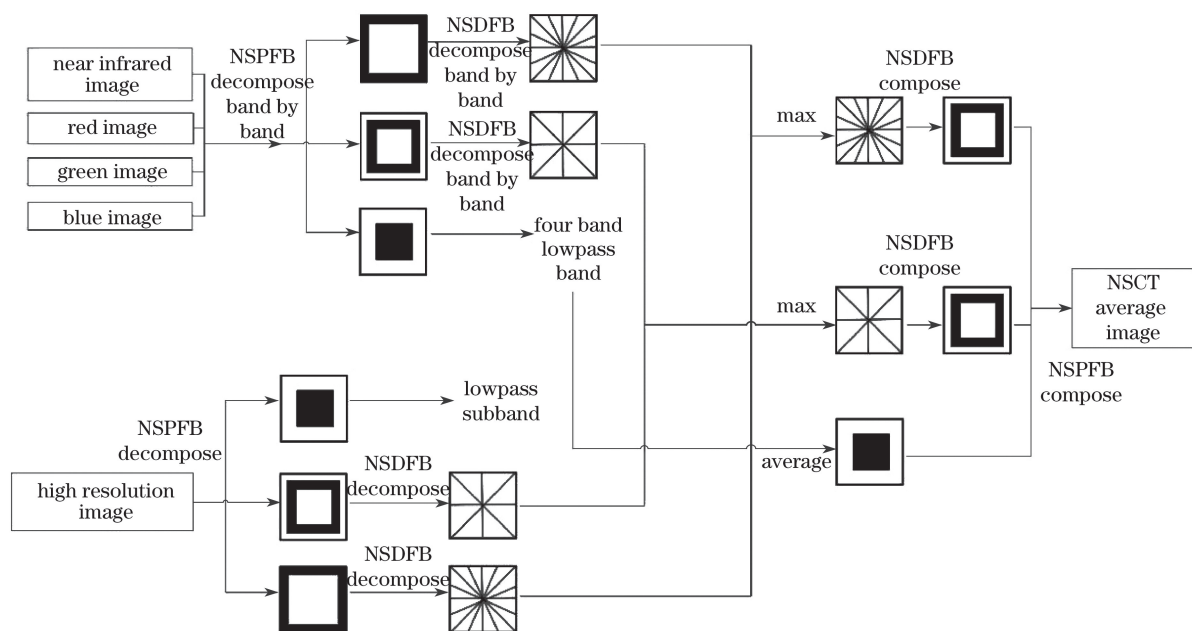


图 5 NSCT 平均图像模拟流程

Fig. 5 NSCT average image simulation process

高分辨率图像的乘积获取融合后的图像各波段,通常采用红(R)、绿(G)、蓝(B)进行归一化。本文模拟的高分辨率包含4个波段的信息,因此归一化纳入近红外(NIR)图像。

### 2) IHS 融合

IHS 融合是一种空间变换方法,通过 IHS 正变换可以将多光谱的 RGB 色彩空间变换到 IHS 空间,分别得到  $I$ 、 $H$ 、 $S$  分量,其中  $I$  分量为 IHS 空间中的亮度信息,将高分辨图像经过拉伸使其方差和

均值与  $I$  分量一致,再用拉伸后的图像替换  $I$  分量,得到  $I'$ ,最后将  $I'$ 、 $H$  和  $S$  进行 IHS 逆变换回到 RGB 空间则可得融合图像。

### 3) PCA 融合

PCA 融合也是一种空间变换方法,多光谱图像之间存在强相关性,完成 PCA 变换后能够转换成相互正交的分量。PCA 变换通过计算 4 个多光谱图像的协方差矩阵得到相应的特征值和特征向量,并按照特征值由大到小排序。特征值的大小表征信息

量的大小,因此变换后的各个分量按照信息量依次递减,第一分量包含信息量最大。PCA 融合规则是将高分辨率图像经过拉伸使其方差和均值与第一分量一致,然后用拉伸后的图像替换第一分量,再进行 PCA 逆变换生成融合图像。

#### 4) SVR 融合

SVR 融合的基本原理是以多光谱图像的灰度值为因变量,高分辨率图像的灰度值为自变量进行回归分析,得到各个谱段的回归系数后再合成高分辨率图像。利用真实高分辨图像与合成高分辨率图像的比值得到细节信息,多光谱图像每个像素的灰度值分别乘以对应的比值则可以突出细节信息。

### 3.4 评价指标

#### 3.4.1 主观评价

主观评价是一种定性的评价方法,与评价人员的视觉感官相关,操作简单快捷,直观性较强。通过图像显示工具呈现效果,依靠对融合图像放大、缩小、对比等操作结合人眼视觉感知图像的优劣,重点关注融合图像与多光谱图像的亮度差异,颜色失真程度和细节信息表达等方面。

#### 3.4.2 客观评价

##### 1) 平均梯度

用于描述图像的清晰程度,反映图像细节反差程度和纹理特征,平均梯度  $A_G$  计算公式为

$$A_G = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{\frac{f_x^2(i,j) + f_y^2(i,j)}{2}}, \quad (1)$$

式中: $M$  为图像的行数; $N$  为图像的列数; $f_x(i,j)$  和  $f_y(i,j)$  分别是图像坐标为  $(i,j)$  的像素在行、列方向上的一阶差分。平均梯度值越大,图像越清晰。

##### 2) 信息熵

图像的信息熵是描述图像的平均信息量,是衡量图像信息丰富的一个重要指标,信息熵  $E$  计算公式为

$$E = \sum_{i=0}^{L-1} P(i) \log_2 P(i), \quad (2)$$

式中: $P(i)$  为灰度值为  $i$  的像素数与图像总像素数的比值; $L$  为灰度级总数,其值越大,表明融合结果图像包含的信息量越大。

##### 3) 相关系数

反映融合图像和源图像线性联系的密切程度,相关系数  $C_c$  计算公式为

$$C_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f_f(i,j) - \bar{f}_f(i,j)] \times [f_o(i,j) - \bar{f}_o(i,j)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f_f(i,j) - \bar{f}_f(i,j)]^2 \times [f_o(i,j) - \bar{f}_o(i,j)]^2}}, \quad (3)$$

式中  $f_f(i,j)$  和  $f_o(i,j)$  分别为融合图像和源图像坐标为  $(i,j)$  的像素灰度值, $\bar{f}_f(i,j)$  和  $\bar{f}_o(i,j)$  分别为融合图像和源图像平均灰度值。相关系数越大,意味着融合图像颜色越接近源图像。

#### 4) 光谱扭曲度

光谱扭曲度能够客观地反映融合图像相对于源图像的光谱信息丢失情况,反映了融合图像的失真程度,光谱扭曲度  $S_D$  计算公式为

$$S_D = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{|f_f(i,j) - f_o(i,j)|}{M \times N}. \quad (4)$$

光谱扭曲度越小说明融合图像保留了源图像越多的光谱信息,亮度接近且光谱畸变小。

#### 5) 综合指标

平均梯度、信息熵、相关系数和光谱扭曲度从不同侧面反映了图像融合后质量的变化,平均梯度和信息熵主要反映融合结果的细节信息,相关系数和光谱扭曲度主要反映融合结果的颜色保真度。本研究提出一个新的客观评价指标,将 4 个指标进行合

成以表达融合的综合效果。理论上平均梯度、信息熵和相关系数数值越大,光谱扭曲度数值越小,则融合图像越好,由此得出综合指标  $S_1$  计算公式为

$$S_1 = \frac{A_G \times E \times C_c}{S_D}. \quad (5)$$

## 4 结果评价与分析

### 4.1 主观评价

3 m SAR 图像中道路信息清晰,16 m 多光谱图像盐池色彩丰富,左下侧盐池呈高亮度白色,旁边的盐池呈高亮度蓝色,其他盐池颜色较暗。SAR 与多光谱图像融合结果如图 6 所示,图 6(a)~(d) 为以 SAR 图像为高分辨率图像的融合结果,图 6(e)~(h) 为以平均 NSCT 图像为高分辨率图像的融合结果,图 6(i)~(l) 为以 NSCT 平均图像为高分辨率图像的融合结果。

从图 6 可以看出,SAR 图像直接融合的 4 种算法中,Brovoy 和 SVR 算法在体现 SAR 图像细节上

较好,但仅体现出蓝色盐池的光谱信息,并且噪声严重,IHS 和 PCA 算法色彩上较丰富,但色彩偏离原始多光谱;平均 NSCT 图像的融合结果中,Brovey、IHS 和 PCA 算法依然光谱畸变严重,并且边缘信息突兀,有“振铃效应”,而 SVR 融合结果在光谱信息和细节程度上有较大改善;NSCT 平均图像的融合结果中,光谱畸变得到了有效抑制,IHS 和 PCA 算

法仅在白色高亮区域出现明显的光谱畸变,Brovey 和 SVR 算法在蓝色盐池的色彩层次保持较好。整体而言,SAR 与多光谱图像直接融合光谱损失严重,多光谱图像加权平均再 NSCT 变换的方法恢复了光谱信息,但部分算法有光谱畸变。多光谱图像 NSCT 变换再加权平均的方法的光谱信息保持较好。

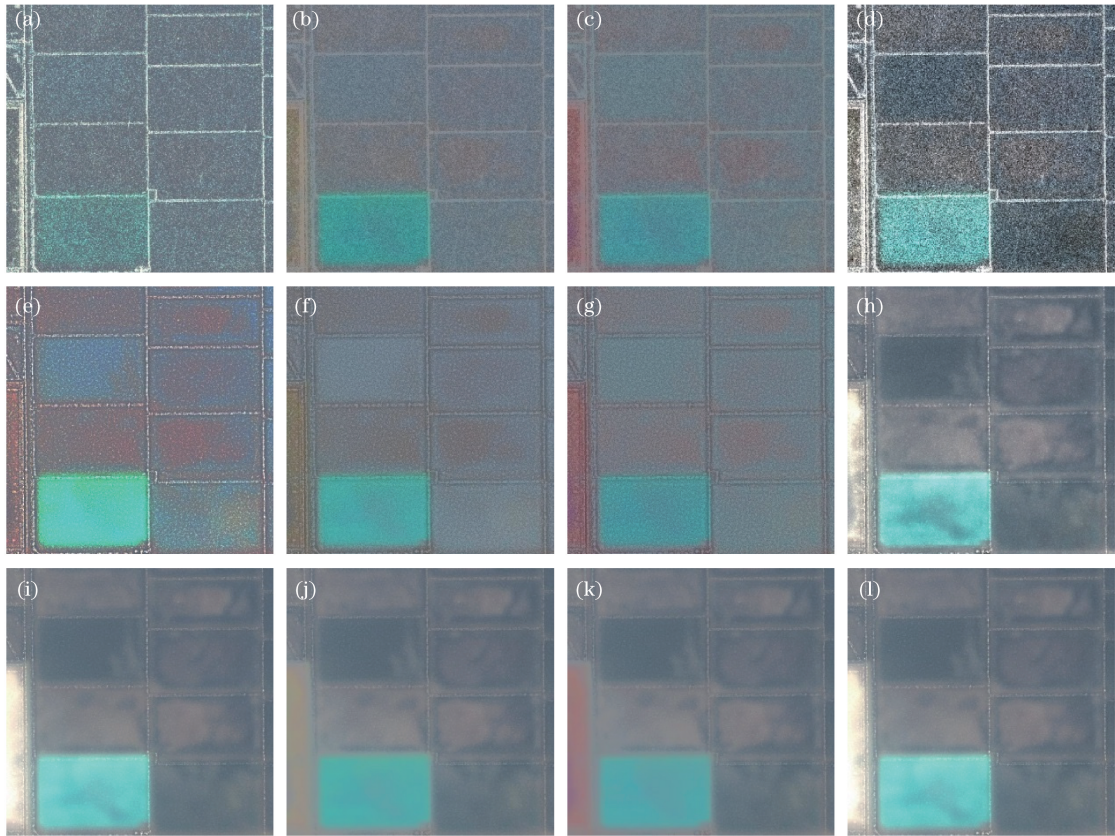


图 6 3 m SAR 与 16 m 多光谱图像融合结果。(a) Brovey-SAR; (b) IHS-SAR; (c) PCA-SAR; (d) SVR-SAR; (e) Brovey-平均 NSCT; (f) IHS-平均 NSCT; (g) PCA-平均 NSCT; (h) SVR-平均 NSCT; (i) Brovey-NSCT 平均; (j) IHS-NSCT 平均; (k) PCA-NSCT 平均; (l) SVR-NSCT 平均

Fig. 6 Fusion results of 3 m SAR and 16 m multi-spectral images. (a) Brovey-SAR; (b) IHS-SAR; (c) PCA-SAR; (d) SVR-SAR; (e) Brovey-average NSCT; (f) IHS-average NSCT; (g) PCA-average NSCT; (h) SVR-average NSCT; (i) Brovey-NSCT average; (j) IHS-NSCT average; (k) PCA-NSCT average; (l) SVR-NSCT average

5 m SAR 图像中建筑物信息明显,16 m 多光谱图像以撂荒地和绿色农田为主,色彩反差较上述研究区域更小。SAR 与多光谱图像融合结果如图 7 所示,图 7(a)~(d)为以 SAR 图像为高分辨率图像的融合结果,图 7(e)~(h)为以平均 NSCT 图像为高分辨率图像的融合结果,图 7(i)~(l)为以 NSCT 平均图像为高分辨率图像的融合结果。

由图 7 可以看出,SAR 图像直接融合的 4 种算法中,保留了部分光谱信息,SVR 算法色彩保持略强,但同时噪声也更强;平均 NSCT 图像的融合结果中,IHS 和 PCA 算法效果与上述研究区域效果类

似,而 Brovey 融合结果光谱信息有较大改善;NSCT 平均图像的融合结果中,4 种融合算法都较好的保持了光谱信息,SVR 算法细节保持能力更强。与 3 m SAR 与 16 m 多光谱图像融合效果对比,目视效果结论基本类似,而平均 NSCT 图像融合效果优于 SAR 图像直接融合结果,NSCT 平均图像融合效果最优。

通过上述分析,主观评价可以发现 SAR 图像直接融合的细节保持较好,但噪声严重,光谱信息体现的很少。这主要因为 SAR 图像与光学图像成像机理不一致,图像灰度值体现的不是地物反射特性,完

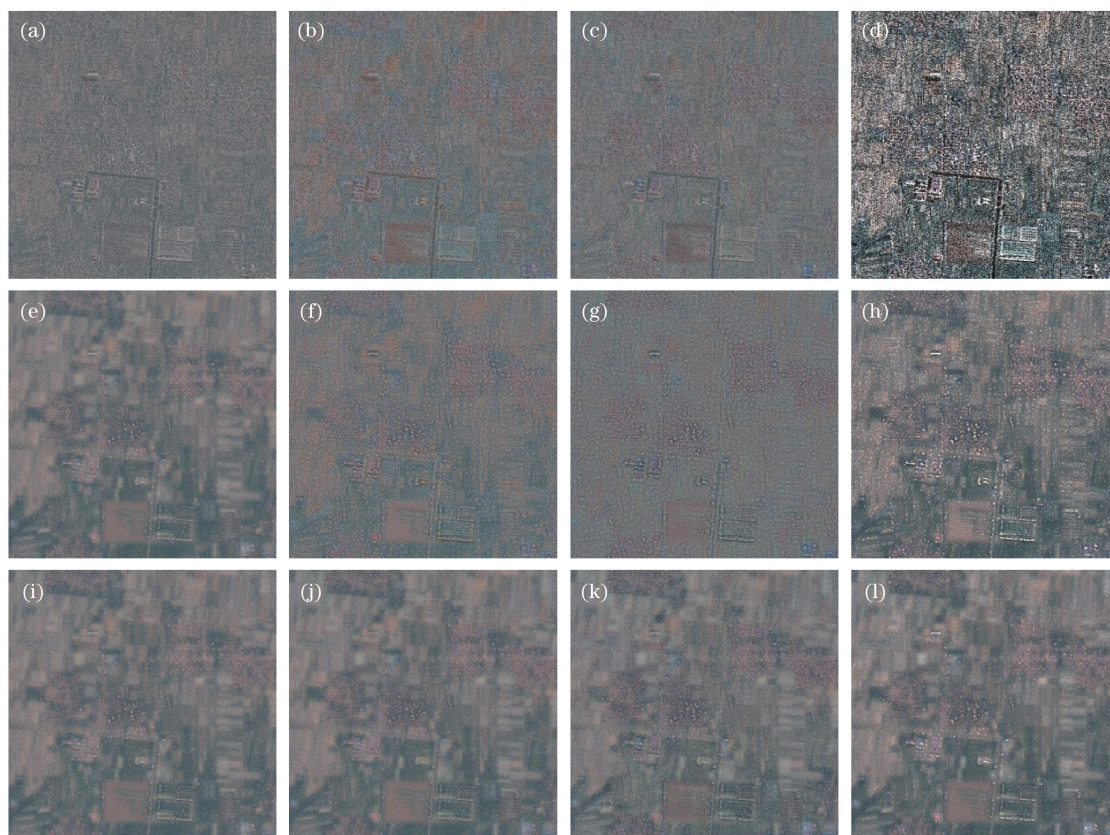


图 7 5 m SAR 与 16 m 多光谱图像融合结果。(a) Brovey-SAR; (b) IHS-SAR; (c) PCA-SAR; (d) SVR-SAR; (e) Brovey-平均 NSCT; (f) IHS-平均 NSCT; (g) PCA-平均 NSCT; (h) SVR-平均 NSCT; (i) Brovey-NSCT 平均; (j) IHS-NSCT 平均; (k) PCA-NSCT 平均; (l) SVR-NSCT 平均

Fig. 7 Fusion results of 5 m SAR and 16 m multi-spectral images. (a) Brovey-SAR; (b) IHS-SAR; (c) PCA-SAR; (d) SVR-SAR; (e) Brovey-average NSCT; (f) IHS-average NSCT; (g) PCA-average NSCT; (h) SVR-average NSCT; (i) Brovey-NSCT average; (j) IHS-NSCT average; (k) PCA-NSCT average; (l) SVR-NSCT average

全不能体现可见光的光谱信息。同时,由于 SAR 图像固有斑点噪声,融合算法又具有锐化效果,因此两种分辨率 SAR 直接融合图像都可见且噪声明显。在光谱信息保持程度上,NSCT 平均图像 IHS 和 PCA 算法融合效果不如 Brovey 和 SVR 算法,而平均 NSCT 图像 4 种融合算法效果都不错,这与模拟高分辨图像的光谱信息与多光谱的偏离程度有关,说明模拟的平均 NSCT 图像的光谱信息比 NSCT 平均图像更贴近多光谱。

#### 4.2 客观评价

3 m SAR 和 5 m SAR 图像与 16 m 多光谱图像采用 4 种算法融合结果的客观评价指标分别见表 2 和 3。Brovey、PCA 和 SVR 算法可以 4 个谱段同时参与融合,IHS 融合算法只能以红、绿、蓝 3 个谱段参与融合。由于统计数据较多,表中 4 个指标除 IHS 算法以融合结果的 3 个谱段平均值表示,其他 3 种算法都以融合结果的 4 个谱段的平均值表示。

从单个客观指标来看, $A_G$  和  $E$  指标主要反映融合结果的细节信息, $C_C$  和  $S_D$  指标主要反映融合结果的颜色保真度。细节度和保真度同时达到最优目前很难实现,所提出的研究思路可以使两个方面在一定程度上进行某种折中。综合两种分辨率 SAR 图像融合客观评价指标可以看出,SAR 图像直接融合的  $A_G$  和  $E$  总体优于模拟高分辨率图像融合,而  $C_C$  和  $S_D$  指标模拟高分辨率图像融合结果总体更优。这反映出 NSCT 的引入降低了 SAR 图像的细节信息,但光谱信息的保真度提高显著。

从综合指标上体现出,4 种融合算法中平均 NSCT 和 NSCT 平均生成高分辨率图像的方法在光谱信息保持程度的提高都超过细节信息的损失。这是因为细节信息主要在 SAR 图像上,而 SAR 图像的波谱范围与多光谱的波谱范围并不重叠,利用 NSCT 变换分离图像细节和光谱信息的优势,将 SAR 图像的细节信息(主要体现是孤立地物和线性边缘)尽可能保留。融合结果保真度取决于高分辨

表 2 3 m SAR 与 16 m 多光谱图像融合客观评价指标

Table 2 Objective evaluation of 3 m SAR and 16 m multi-spectral image fusion

Index	$A_G$	$E$	$C_C$	$S_D$	$S_I$	
Brovey	SAR	20.34	3.09	0.22	26.57	0.52
	Average NSCT	14.58	2.98	0.41	21.97	0.80
	NSCT average	3.90	4.29	0.98	3.69	4.45
IHS	SAR	12.92	6.09	0.30	24.86	0.94
	Average NSCT	11.52	6.04	0.24	25.42	0.65
	NSCT average	3.17	5.88	0.84	11.14	1.41
PCA	SAR	10.46	6.15	0.39	21.78	1.14
	Average NSCT	10.58	6.13	0.31	22.81	0.88
	NSCT average	2.62	5.88	0.82	10.67	1.18
SVR	SAR	48.25	7.31	0.34	48.84	2.46
	Average NSCT	8.17	6.51	0.88	9.33	5.01
	NSCT average	4.22	6.27	0.98	3.83	6.76

表 3 5 m SAR 与 16 m 多光谱图像融合客观评价指标

Table 3 Objective evaluation of 5 m SAR and 16 m multi-spectral image fusion

Index	$A_G$	$E$	$C_C$	$S_D$	$S_I$	
Brovey	SAR	13.34	4.30	0.15	15.26	0.57
	Average NSCT	11.42	3.58	0.32	12.83	1.00
	NSCT average	7.65	4.23	0.76	7.03	3.51
IHS	SAR	13.29	5.96	0.16	15.35	0.80
	Average NSCT	12.54	5.95	0.28	13.86	1.53
	NSCT average	7.48	5.88	0.79	6.79	5.14
PCA	SAR	13.53	5.90	0.05	16.78	0.23
	Average NSCT	11.23	5.85	0.25	13.95	1.19
	NSCT average	7.96	5.84	0.73	8.17	4.16
SVR	SAR	34.13	7.23	0.29	29.65	2.45
	Average NSCT	19.29	6.60	0.43	17.33	3.12
	NSCT average	10.35	6.23	0.74	8.84	5.39

率图像的谱段范围是否与多光谱完全一致,偏离越小保真度越高。基于此原理,利用 NSCT 变换将多光谱的光谱信息分离出来,再进行数学计算模拟出近似包含多光谱全部谱段的图像,融合后则可以减少光谱畸变。结果证明:所提出的思路尽可能保留了细节而明显减少了光谱畸变,模拟高分辨率图像的融合效果优于 SAR 图像直接融合效果。

采用两种分辨率对 SAR 图像融合结果分析,5 m SAR 与 16 m 多光谱图像融合采用两种模拟高分辨率图像综合效果都优于 SAR 图像直接融合,而 3 m SAR 与 16 m 多光谱图像融合采用两种模拟高分辨率图像效果在 IHS 和 PCA 算法上表现出了不同的结果。从  $C_C$  和  $S_D$  指标来看,3 m SAR 与 16 m

多光谱图像融合后相关系数比 SAR 直接融合低,光谱扭曲度更大。造成这种现象的原因体现在两方面:数据层面和方法层面。从数据层面来说,3 m SAR 图像引入的细节信息比 5 m SAR 图像更多,虽然 NSCT 变换分离了图像的细节和光谱,但最终需要进行 NSCT 逆变换将 SAR 细节与多光谱的光谱信息结合,因此 3 m SAR 细节信息对模拟高分辨率图像的灰度值改变更大。从方法层面来说,PCA 和 IHS 融合算法进行空间变换是提取主分量或亮度信息,本质上也是细节信息,因此模拟高分辨率图像细节信息与 PCA 的主分量或 IHS 的亮度信息的吻合程度决定融合效果的好坏,尤其是颜色保真程度,3 m SAR 包含更多的细节信息降低了吻合程度。



所提出的两种模拟高分辨率图像方法分析, NSCT 平均图像的融合效果最优, 平均 NSCT 图像虽然对不同分辨率 SAR 图像的融合效果在 IHS 和 PCA 算法上不一致, 但总体也优于 SAR 图像直接融合效果。因此, 从融合效果优劣进行排序: NSCT 平均图像融合、平均 NSCT 图像融合、SAR 图像直接融合。究其原因, 平均 NSCT 的方法先对多光谱图像求平均值, 单一谱段的细节信息经过平均后更加弱化, 未与细节信息分离的光谱信息平均后效果不佳。而 NSCT 平均的方法先分别对 SAR 和多光谱图像进行了细节信息和光谱信息分解, 对光谱信息平均后再叠加细节信息, 这种方式对细节和光谱的影响最小, 所以 NSCT 平均的方法在两种分辨率 SAR 图像的融合效果均最佳。

## 5 结 论

针对 SAR 图像与多光谱图像融合光谱畸变的问题提出了一种改善思路, 以高分三号 SAR 图像和高分一号多光谱图像为例, 基于 NSCT 变换模拟出包含多光谱信息和 SAR 细节信息的高分辨率图像, 利用 Brovey、IHS、PCA 和 SVR 4 种融合算法实验得到验证: 先模拟高分辨率图像后进行融合的思路是可行的。

1) 所提出的两种方法模拟高分辨率图像。第一种方法先对 4 个多光谱图像加权平均再进行 NSCT 变换分离细节信息和谱段信息, 以分离后的谱段信息叠加上 SAR 图像的细节信息进行 NSCT 逆变换生成平均 NSCT 图像; 第二种方法先分别对 4 个多光谱图像和 SAR 图像分别进行 NSCT 变换, 取多光谱图像低通子带系数的平均值后再叠加 SAR 图像细节信息进行 NSCT 逆变换生成 NSCT 平均图像。

2) 通过主观评价发现, SAR 和多光谱图像直接融合能够保持 SAR 的细节信息, 但噪声明显, 且光谱畸变较大, 这与 SAR 图像成像机理与光学图像不一致有关; 以平均 NSCT 图像为高分辨率图像进行融合可以增加融合结果的光谱信息, 但 PCA 和 IHS 算法仍然存在光谱畸变, 以 NSCT 平均图像为高分辨率图像的 4 种算法融合结果光谱信息保持均较好, 说明模拟的平均 NSCT 图像的光谱信息比 NSCT 平均图像更贴近多光谱。

3) 通过客观评价发现, 4 种融合算法中平均 NSCT 和 NSCT 平均生成高分辨率图像的方法在光谱信息保持程度的提高方面都超过细节信息的损

失; 5 m SAR 与 16 m 多光谱图像融合采用两种模拟高分辨率图像综合效果均优于 SAR 图像直接融合, 而 3 m SAR 与 16 m 多光谱图像融合采用两种模拟高分辨率图像效果在 IHS 和 PCA 算法上表现出了不同的结果; 对比两种高分辨率图像模拟方法, NSCT 平均图像的融合效果最优, 平均 NSCT 图像虽然对不同分辨率 SAR 图像的融合效果在 IHS 和 PCA 算法上不一致, 但总体也优于 SAR 图像直接融合效果。

## 参 考 文 献

- [1] Zhang Q J. System design and key technologies of the GF-3 satellite [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 269-277.  
张庆君. 高分三号卫星总体设计与关键技术 [J]. *测绘学报*, 2017, 46(3): 269-277.
- [2] Idol T, Haack B, Mahabir R. Comparison and integration of spaceborne optical and radar data for mapping in Sudan [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(6): 1551-1569.
- [3] Ma S, Deng K Z, Zhuang H F, *et al.* Otsu change detection of low and moderate resolution synthetic aperture radar image by using multi-texture features [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(6): 062804.  
马骥, 邓喀中, 庄会富, 等. 中低分辨率合成孔径雷达影像多纹理特征的 Otsu 变化检测 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(6): 062804.
- [4] Zhang L P, Shen H F. Progress and future of remote sensing data fusion [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1050-1061.  
张良培, 沈焕锋. 遥感数据融合的进展与前瞻 [J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1050-1061.
- [5] Bai L Y, Xu C M, Wang C. A review of fusion methods of multi-spectral image [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(24): 4804-4807.
- [6] Jia Y H. Fusion of landsat TM and SAR images based on principal component analysis [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1998, 13(1): 46-49.  
贾永红. TM 和 SAR 影像主分量变换融合法 [J]. *遥感技术与应用*, 1998, 13(1): 46-49.
- [7] Zhang H L, Jiang J J, Wu H A, *et al.* The BP neural network classification based on the fusion of SAR and TM images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2006, 35(8): 229-233.  
张海龙, 蒋建军, 吴宏安, 等. SAR 与 TM 影像融合及在 BP 神经网络分类中的应用 [J]. *测绘学报*,

- 2006, 35(8): 229-233.
- [8] Huan R H, Zhang P, Pan Y. SAR target recognition using PCA, ICA and Gabor wavelet decision fusion[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(2): 262-274.  
宦若虹, 张平, 潘赞. PCA, ICA 和 Gabor 小波决策融合的 SAR 目标识别[J]. 遥感学报, 2012, 16(2): 262-274.
- [9] Alparone L, Baronti S, Garzelli A, *et al.* Landsat ETM+ and SAR image fusion based on generalized intensity Modulation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42 (12): 2832-2839.
- [10] Pal S K, Majumdar T J, Bhattacharya A K. ERS-2 SAR and IRS-1C LISS III data fusion: a PCA approach to improve remote sensing based geological interpretation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 61(5): 281-297.
- [11] Li H H, Guo L, Li G X. Is ridgelet transform better than wavelet transform in SAR and optical image fusion? [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(4): 418-422.  
李晖晖, 郭雷, 李国新. 基于脊波变换的 SAR 与可见光图像融合研究 [J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(4): 418-422.
- [12] Li H H, Guo L, Liu K. SAR and optical image fusion based on Curvelet transform[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2009, 20(8): 1110-1113.  
李晖晖, 郭雷, 刘坤. 基于 Curvelet 变换的 SAR 与可见光图像融合研究 [J]. 光电子 • 激光, 2009, 20(8): 1110-1113.
- [13] Wang Z S, Yang F B, Chen L, *et al.* SAR and visible image enhanced fusion based on texture segmentation and Top-Hat transformation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1010002.  
王志社, 杨风暴, 陈磊, 等. 基于纹理分割和 Top-Hat 变换的合成孔径雷达与可见光图像增强融合 [J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1010002.
- [14] Chibani Y. Integration of panchromatic and SAR features into multispectral SPOT images using the 'à trous' wavelet decomposition[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28 (10): 2295-2307.
- [15] Chen S H, Zhang R H, Su H B, *et al.* SAR and multispectral image fusion using generalized IHS transform based on à trous wavelet and EMD decompositions [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(3): 737-745.
- [16] Wan J H, Zang J X, Liu S W. Fusion and classification of SAR and optical image with consideration of polarization characteristics [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0628001.  
万剑华, 臧金霞, 刘善伟. 顾及极化特征的 SAR 与光学影像融合与分类 [J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0628001.
- [17] Bai Z G. The technical characteristics of GF-1 satellite[J]. Aerospace China, 2013, (8): 5-9.  
白照广. 高分一号卫星的技术特点 [J]. 中国航天, 2013, (8): 5-9.
- [18] da Cunha A L, Zhou J P, Do M N. The nonsubsampling contourlet transform: theory, design, and applications [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.