

联合云检测与高通滤波的含云影像融合方法

余磊¹ 张永军¹ 孙明伟¹ 朱昕宇¹

¹ 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

摘要:云噪声是光学卫星影像的常见问题,为了衡量云噪声对影像融合带来的影响,本文以高通滤波融合算法为例进行分析,指出云与地物的均值相差越大,云对影像融合的影响越大,并提出了一种针对含云影像的融合方法,即联合云检测与高通滤波的含云影像融合方法。该方法首先利用 NIR/R-OTSU 云检测算法实时进行云检测,判别出影像中的云覆盖区域;其次采用局部优化策略利用高通滤波融合方法分块对非云区域进行处理,得到融合影像。利用资源三号多光谱和正视全色影像进行融合实验,结果表明,本文算法比高通滤波融合方法、亮度色度饱和度(intensity hue saturation, IHS)变换融合方法、Pansharp 融合方法更适用于含云影像的融合处理。

关键词:资源三号卫星;卫星影像;云检测;高通滤波;融合

中图法分类号:P237.3; TP751 **文献标志码:**A

地球表面 1/3 到 1/2 覆盖有云层,使得光学遥感相机拍摄到大量被云覆盖的影像^[1]。目前常见的影像去云方法大多基于同一地区时相相近的两幅影像替换得到^[2-3],但满足条件的影像较难获取,因此在实际应用过程中,大部分卫星影像上仍存在云区域。影像中云具有较高灰度值且较贫乏的纹理,它的存在不仅不利于影像的判读与解译,并且会影响影像的处理。

作为遥感影像处理的一个重要步骤——影像融合,在多源数据的信息整合方面发挥着重要作用。现有的遥感影像融合方法大体分为投影-替换法、相对光谱贡献法、结构注入空间分辨率增强方法(Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures, ARSIS)及混合模型法 4 类^[4-6]。投影-替换法的代表方法有亮度色度饱和度(intensity hue saturation, IHS)方法、主成分分析(principal component analysis, PCA)方法等。相对光谱贡献法的代表方法有 Brovey、合成变量比和 P+XS 等。ARSIS 方法的代表方法有高通滤波(high pass filter, HPF)、小波和马尔科夫随机场(Markov random field, MRF)等。混合模型算法则试图吸收前三类算法的优势,算法较为复杂,离实用化还有距离。总的来说,现有方法大多

是根据不同的问题,在这 4 类算法基础上进行的改进。虽然每种方法的原理和实现过程各有不同,但是在融合层次上,它们都属于像素级融合。文献[7]针对像素级融合构建了一种遥感数据像素级融合的统一数学模型,将融合方法以相同的数学形式进行表达,从而将融合问题分解为空间细节调制参数的构建与空间细节信息提取方式的研究。该统一模型的提出为融合方法的等价性研究提供了理论基础。

为了研究云对影像融合带来的影响,本文以 HPF 融合算法为例进行分析。HPF 算法具有良好的光谱保持能力,它的出现被认为是图像融合领域发展的一个重要转变^[8-9]。本文从 HPF 融合的原理出发,分析云对影像融合的影响,并提出了联合云检测和高通滤波的含云影像融合方法。该方法首先利用 NIR/R-OTSU 的云检测算法实时进行云检测,判别出影像中的云覆盖区域,然后基于局部优化策略,利用高通滤波融合方法分块对非云区域进行处理,得到融合影像。

1 融合算法原理与分析

1.1 HPF 融合方法原理

HPF 融合算法的基本思想为:利用高通滤波

算子通过卷积方法提取高分辨率全色影像的高频空间细节信息,并将其按照一定的比例关系融入到较低分辨率的多光谱影像中,从而得到一幅高空间分辨率、高光谱分辨率的融合影像^[10-11]:

$$P_o = P_i + H \times W \quad (1)$$

$$W = (S_M/S_H) \times M \quad (2)$$

式中, P_o 为某波段融合后结果; P_i 为某波段融合前灰度值; H 为高频空间细节信息分量; W 为高频信息在对应多光谱波段的权值; S_M 为多光谱某波段的标准偏差; S_H 为高频空间细节信息分量的标准偏差; M 为经验值,本文中 M 取 0.3。

1.2 云对融合的影响分析

根据文献[7]提出的统一数学模型以及 HPF 融合算法原理,下文将从多光谱影像标准差以及高频信息分量标准差的角度出发,分析云对影像

融合的影响。

本文利用不含云的真实卫星影像作为实验数据,通过模拟不同的云覆盖量分析云对融合结果的影响。选取一张 $3\,000 \times 3\,000$ 像素的资源三号多光谱影像作为实验数据,空间分辨率为 6 m,利用红、绿、蓝波段组成真彩色影像,并将原 16 bit 影像转为 8 bit,如图 1(a)所示。为了定量分析云对融合的影响,人工在影像中模拟不同的含云量,共做 5 组实验,含云量分别为 10%、30%、50%、70%、90%,如图 1(b)~1(f)所示,图中灰色部分即为人工加入的云,同时为了分析云的灰度均值变化对融合带来的影响,假设云灰度均值存在三种情况,分别是 200、100、50。对各影像进行均值、标准差统计,并计算相关的融合权值,结果如图 2 所示。

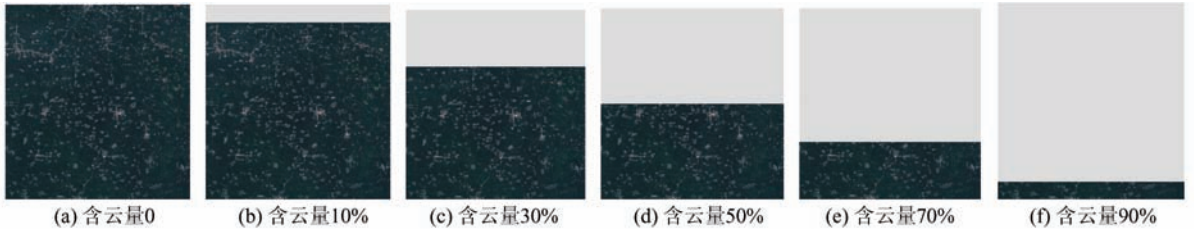


图 1 不同含云量影像示意图

Fig. 1 Images with Different Amount of Cloud

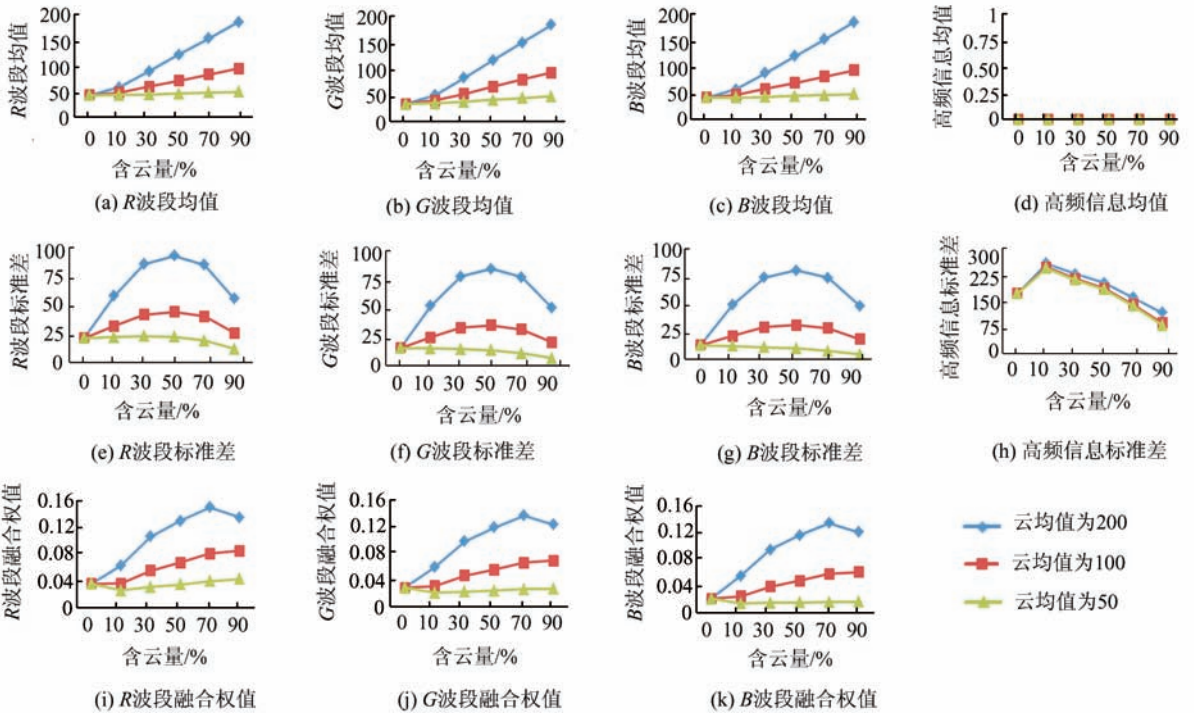


图 2 各影像均值、标准差及融合权值对比

Fig. 2 Comparison of Mean, STDEV and Fusion Weight Between Images

由图 2 可以得出如下结论:

1) 多光谱影像各波段灰度均值,随着含云量

的增加逐渐增大;多光谱影像各波段的标准差,在云灰度均值为 200 和 100 时,随着含云量增加先

变大后变小,在云均值为50时,各波段标准差随着含云量增大逐渐变小。此外,在相同云含量情况下,随着云均值的减小,标准差在逐渐减小。

2) 高频空间细节信息在各情况下均值都为零。高频信息的标准差均表现为先增大后减少的变化,并且随着云均值的增大,标准差逐渐变大。

3) 各波段融合权值,在云灰度均值与地物灰度均值相差较大时,随着含云量的变大,逐渐增大;当云灰度均值与地物灰度均值相差较小时,含云量对融合权值带来的影响较小。此外,云的灰度均值与地物的灰度均值相差越大,对融合权值带来的影响越大。

上述结论是由模拟数据分析得到,下面从理论角度分析产生上述现象原因。

$$S_M^2 \approx \frac{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_m^2) + (a - b)^2 \times (\frac{N \times m - m^2}{N}) - a^2 \times m}{N} \tag{5}$$

由式(5)可以得到:

(1) 在相同 m 情况下, $(a - b)^2$ 的值越小,标准差越小,即在相同含云量情况下,地物均值与云均值的差值越小,标准差越小。此外,在 $(a - b)^2$ 的值较小的情况下,由于 $(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_m^2)$ 随着 m 的减小而减小,因此标准差也随之减小,即在地物均值与云均值差值较小的情况下,含云量越大,标准差越小。

$$\frac{-\frac{(a - b)^2 \times m^2}{N} + (a - b)^2 \times m}{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2) - N \times a^2} \leq S_M^2 \leq \frac{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2) + (a - b)^2 \times (\frac{N \times m - m^2}{N}) - a^2 \times m}{(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2) - N \times a^2} \tag{7}$$

因此多光谱影像标准差分布于两个抛物线之间,当 m 趋近 0 时, S_M^2 趋近于左不等式;当 m 趋近 N 时, S_M^2 趋近于右不等式,标准差函数具有类似抛物线的性质。

2) 高频信息是由高通滤波模板卷积得到,它们的和为零,因此各情况下均值都为零。高频空间细节信息的标准差 S_H 表达式为:

$$S_H = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(z_i - \text{mean}_{\text{hpf}})^2}{N} + \sum_{j=1}^n \frac{(z'_j - \text{mean}_{\text{hpf}})^2}{N}} \tag{8}$$

由于云具有相近的灰度值,它们的高频信息通常表现为零值,但是处于云与地物区域交界处的云像素以及地物像素,其高频信息不为零,它们的大小与滤波器的形状、云与地物区域交界的形状,以及云像素灰度值与地物的灰度值有关。为

1) 在影像整体色调分布较为均匀的情况下,多光谱影像各波段均值 mean 近似满足式(3),标准差 S_M 表达式满足式(4)。

$$\text{mean} = a \times \frac{m}{N} + b \times \frac{n}{N} \tag{3}$$

$$S_M =$$

$$\sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{(x_i - \text{mean})^2}{N} + \sum_{j=1}^n \frac{(y_j - \text{mean})^2}{N}} \tag{4}$$

式中, N 为像素总数; m 为地物像素个数; n 为云像素个数; a 为地物灰度均值; b 为云灰度均值; x_i 为第 i 个地物像素的灰度值; y_j 为第 j 个云像素的灰度值。

整理得:

(2) 在 a 与 b 固定且相差较大的情况下,即地物均值与云均值固定且差值相差较大的情况下,由

$$m \left(\frac{x_1 + x_2 + \dots + x_m}{m} \right)^2 \leq (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_m^2) \leq (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_m^2 + \dots + x_N^2) \tag{6}$$

所以,

了简化问题,假设交界处各像素的高频信息在统计意义上与云均值以及地物均值有关,且均值相差越大,高频信息越大。将交界处各像素点的高频信息对标准差带来的影响设为 D ,则式(8)可以表示为:

$$S_H = \sqrt{\frac{z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_L^2}{N} + D} \tag{9}$$

式中, z_i 为非交界处的地物高频信息; L 为非交界处的地物像素个数。

当 m 趋近于 N ,即含云量较小时, $(z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_L^2)$ 与 $(z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_N^2)$ 相差不大,但因 D 的存在导致 S_H 增大。而后随着 m 减小, $(z_1^2 + z_2^2 + \dots + z_L^2)$ 变小,而 D 的变化不大,因此 S_H 减小,并且 D 随着云均值与地物均值差值的增大而增大,使得 S_H 随之增大(如图 2(h))。

3) 虽然云覆盖量及云灰度均值的变化对于

多光谱影像标准差以及高频信息标准差的影响不尽相同,但是在整体趋势上,随着影像含云量增大,高频信息的标准差递减,多光谱影像标准差先递增后递减,因此融合权值也呈现出先递增后递减的变化规律。

理论分析进一步验证了上述结论的正确性与普适性。此外笔者也对 § 2 节中的实验数据进行了类似分析,也得到了相似的结论,由于篇幅限制,不再赘述。通常来讲,云灰度均值与地物灰度均值存在较大差别,均值差异越大,融合权值越大,在进行融合处理时,融入的高频空间细节信息越多。由于高频分量体现的是全色影像的空间细节信息,它的增多会使得融合结果的空间细节信息进一步增强甚至出现突变,反而会影响到影像整体的协调性,导致影像产生光谱畸变。因此,在对含云影像进行融合处理时,需要消除云对融合的影响。

1.3 NIR/R-OTSU 云检测算法

国内外学者对云检测已进行了大量研究^[12-15],大体分为光谱阈值法、纹理分析法以及将两者结合起来的方法。考虑到融合处理时云检测是辅助性方法,必须简单高效,因此本文选用光谱阈值法。针对本文使用的资源三号多光谱影像,选用文献[15]中适用于资源 02 C 影像的近红外/红光比值云检测方法(NIR/R 方法),因为资源 02C 影像与资源三号影像具有近似相同的光谱成像特性。

根据 NIR/R 方法对资源三号多光谱影像进行云检测实验,结果如图 3(b)所示,可以看出,大部分云区域被判别出来,但亦有地物被误判为云,如图 3(b)中绿色水体和浅红色裸露土地区域。为进一步优化云检测效果,本文在 NIR/R 方法的基础上,加入最大类间方差方法(OTSU)^[16]。OTSU 方法是一种自适应确定阈值的方法,它将影像分为目标与背景两个部分,是图像分割中阈值选取的最佳算法之一。NIR/R-OTSU 云检测方法的流程为:首先通过 NIR/R 方法得出初始云区域,然后利用 OTSU 方法对初始云区域进行再次分割,得到更为精确的云判阈值,从而得到更为精确的云区域(如图 3(c)所示)。

从图 3 中可以看出,NIR/R-OTSU 方法的云检测结果仍存在未被判别出的云,如图 3(a)中右下角的薄云区域,但总体上大团厚云被判别出来,因为薄云的灰度值较低,且数量较少,它的存在对融合的影响较小。更高精度的云检测结果意味着更多的检测策略、更多的时间花费。由于本文是

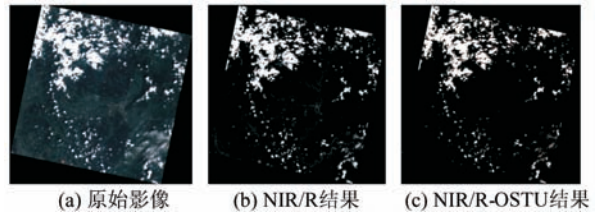


图 3 云判结果图

Fig. 3 Results of Cloud Detection

以降低云对融合的影响为目的,云检测是种辅助性算法,需要兼顾效率与精度,因此使用 NIR/R-OTSU 云检测算法。

1.4 基于分块处理的 HPF 融合算法

传统 HPF 融合算法在计算融合权值时采用的是多光谱影像以及高频信息分量的整体均值和标准差。由于地物分布的不均衡性,全局统计得到的融合权值不一定适合局部影像融合的需求,进而引发偏色等一系列问题。考虑到影像像元的空间差异性,局部处理可能会比全局处理具有更大的优势^[5]。因此,本文将局部分块优化处理策略引入 HPF 融合算法,将影像分为若干 $w \times w$ 大小的正方形块,逐块计算融合权值。影像的分块大小与多光谱影像和全色影像的空间分辨率比值有关。设空间分辨率比值为 r ,综合考虑融合处理效果与效率,本文实验中取 $w=2r+1$ 。为了避免分块优化处理带来的分块效应,各分块之间存在 20% 的重叠,并采用双线性内插方法来获得每个像素的融合权值。

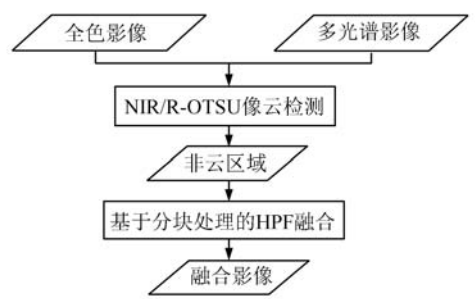


图 4 整体算法流程示意图

Fig. 4 Flowchart of the Entire Process

2 实验与分析

本文选用两景拍摄于广东地区、一景拍摄于山西地区的资源三号正视和多光谱影像作为实验数据。实验影像中覆盖有植被、水体、山地、房屋等地物。将实验数据分为三组,数据 1 影像大小为 $19\ 987 \times 20\ 070$ 像素(见图 3(a)),数据 2 影像大小为 $19\ 997 \times 20\ 088$ 像素(见图 5(a)),数据 3

影像大小为 20 467×20 540 像素(见图 6(a)),三组影像都经过正射纠正且空间分辨率被重采样为 3 m。本文分别对三组实验数据采用 4 种融合方

法进行实验,分别是本文方法、HPF 融合算法、IHS 变换融合算法、Pansharp 融合算法。实验结果如图 5~10 所示。



图 5 不同融合方法结果影像细节对比图(数据 1)

Fig. 5 Detail Comparison of Fusion Results Based on Different Methods (Data 1)

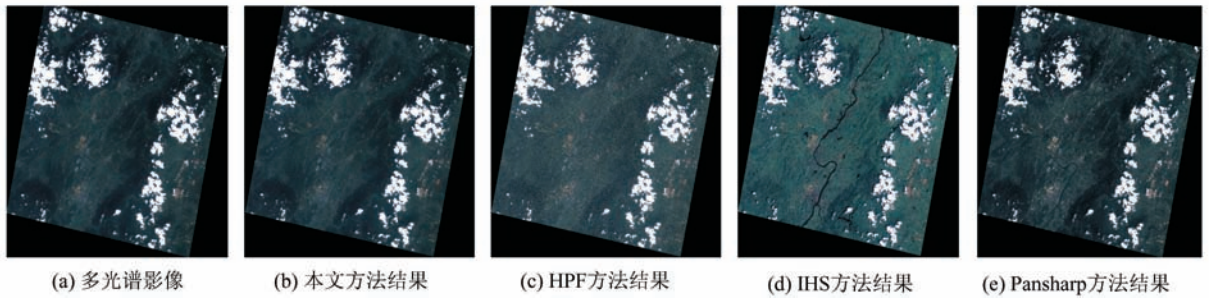


图 6 不同融合方法的处理结果(数据 2)

Fig. 6 Result Images by Different Fusing Methods(Data 2)

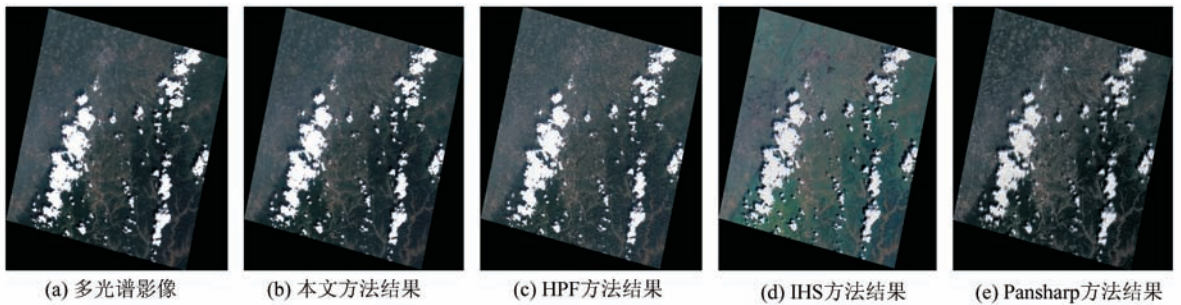


图 7 不同融合方法的处理结果(数据 3)

Fig. 7 Result Images by Different Fusing Methods(Data 3)

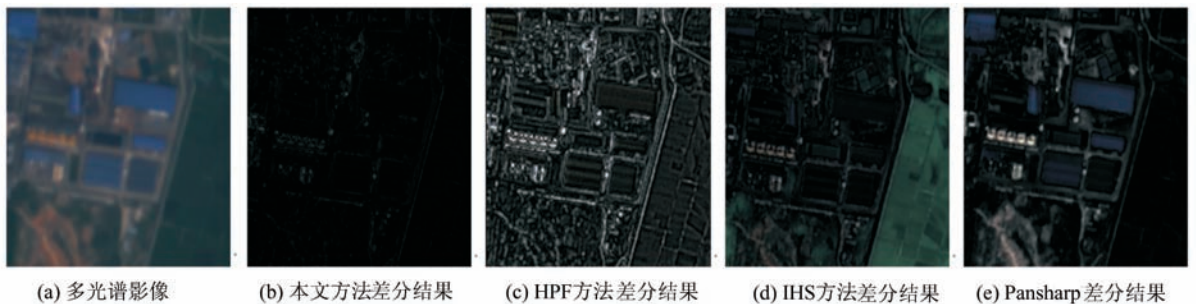


图 8 不同融合方法结果影像细节差分对比图(数据 1)

Fig. 8 Detail of Difference of Fusion Results Based on Different Methods (Data 1)

下文从主观评价和客观评价^[17]两个方面对实验结果进行分析。

2.1 基于目视判读的比较和分析

从图 6、7 可以看出,在总体范围上本文方法



图 9 不同融合方法结果影像细节对比图(数据 2)

Fig. 9 Detail Comparison of Fusion Results Based on Different Methods (Data 2)

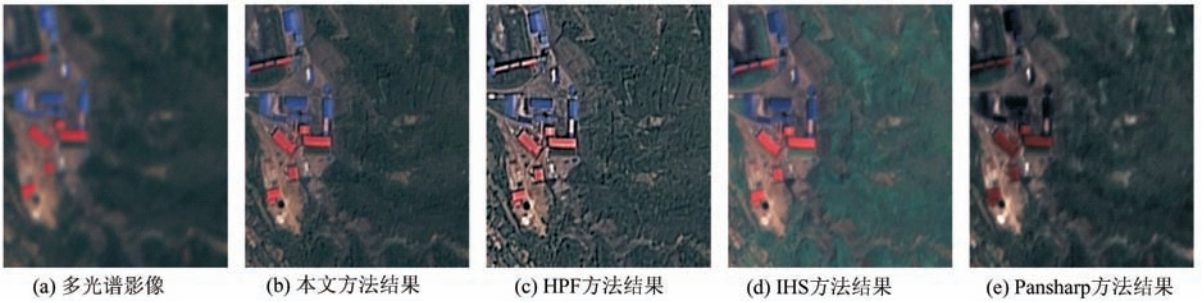


图 10 不同融合方法结果影像细节对比图(数据 3)

Fig. 10 Detail Comparison of Fusion Results Based on Different Methods (Data 3)

融合结果的光谱特征更接近于融合前多光谱影像, IHS 方法结果的偏色最为严重。根据图 8~10, 进一步从细节上对比这 4 种方法的优劣, 可以看到, 本文方法的融合结果影像不仅在光谱特征上与融合前多光谱影像近乎一致, 而且在空间分辨率上有了很大提高。而 HPF 融合结果、IHS 融合结果以及 Pansharp 融合结果虽然在空间分辨率较之前多光谱影像有所提高, 但是其光谱特征在不同程度上出现偏色。图 8 是图 5 中各融合结果与原始多光谱影像的差分, 并按照相同阈值进行相同拉伸得到的结果, 可以更为直观反映各方法融合影像与原始多光谱影像之间的偏色程度。因此, 通过目视判读, 本文方法的融合结果在

空间细节信息的增强与光谱信息的保持两方面效果更优。

2.2 基于数理统计的分析与评价

在进行目视判读与分析后, 再通过统计参数对实验结果进行客观分析。本文采用均值、标准偏差、信息熵、光谱扭曲程度^[17-18]、通用图像质量评价指标 UIQI^[19] 和相关系数^[18] 作为衡量标准。

各融合结果的统计参数如表 1 所示(在计算参数时, 引入本文云检测算法, 将云区域排除在外不进行统计, 限于篇幅, 仅展示数据 1 的统计结果)。数据 1 原始多光谱影像的均值和标准方差分别是 272.950、72.370。

表 1 不同融合方法对数据 1 处理得到的融合结果统计特性

Tab. 1 Statistical Properties of the Fused Images by Different Methods

评价指标	融合方法			
	本文方法	HPF 方法	IHS 方法	Pansharp 方法
均值	273.509	276.341	340.459	277.064
标准方差	71.815	93.436	164.369	111.073
信息熵	7.345	6.587	8.790	8.279
光谱扭曲度	5.074	19.253	46.344	15.210
UIQI	0.988	0.814	0.605	0.677
相关系数	0.988	0.827	0.626	0.753

从表 1 中可以发现:

1) 本文算法融合影像的均值和方差与原始多光谱影像最为接近, 说明本文方法得到的融合结果影像其光谱特征与原始多光谱影像较为接

近, 这也与目视判别效果一致; HPF 融合结果与 Pansharp 融合结果的均值和方差都略大于原始多光谱影像, 说明它们两者结果均存在轻微偏色; IHS 变换融合结果的均值和偏差均远大于原始多

光谱影像,说明其偏色最为严重。

2) 本文算法融合影像的信息熵小于 IHS 变换、Pansharf 算法融合影像,这是由于信息熵反映了空间信息的丰富程度,而不同融合算法的原理不同导致相应融合影像的空间信息提升能力有所不同,而本文算法在空间信息提升方面略逊于这两种算法,但明显优于 HPF 融合结果,说明本文方法相对于 HPF 方法在排除云对融合带来的影响后,可以显著提高融合影像的空间信息。

本文方法融合结果的光谱扭曲度最小,说明本文方法融合影像的光谱特征与原始影像最为接近,远优于其他三种方法。从 UIQI 以及相关系数来看,本文方法融合影像融合质量最好,与原始多光谱影响相关性最高。

综上,本文方法所得融合影像在空间细节信息增强与光谱信息保持方面的综合性能最优。

3 结 语

本文针对含云的光学卫星影像,以 HPF 融合算法为例,分析了云噪声对影像融合的影响,指出对于含云影像,特别是云均值与地物均值相差较大的影像,必须排除云对融合带来的干扰,以便获得良好的融合结果,并提出了一种针对含云光学影像的融合方法,即联合云检测和高通滤波的含云影像融合方法。本文提出的针对含云影像的融合解决方案,适用于但不限于 HPF 方法,可为其他融合算法提供一定参考。

参 考 文 献

- [1] Tao Shuping, Jin Guang, Zhang Guixiang, et al. A Wavelet SCM Algorithm Used to Detect Cloud in Remote Sensing Cameras [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(5): 598-603 (陶淑苹,金光,张贵祥,等. 实现遥感相机自主辨云的小波 SCM 算法[J]. 测绘学报, 2011, 40(5): 598-603)
- [2] Zhou Wei, Guan Jian, Jiang Tao, et al. Automatic Detection and Repairing of Cloud and Shadow Regions in Multi-spectral Remote Sensing Images [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(1): 132-142 (周伟,关键,姜涛,等. 多光谱遥感影像中云影区域的检测与修复[J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 132-142)
- [3] Wu Wei, Luo Jiangcheng, Shen Zhanfeng, et al. Classified Linear Regression Based Landsat Image Cloud Removal Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 983-987 (吴炜,骆剑承,沈占锋,等. 分类线性回归的 Landsat 影像去云方法支[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(8): 983-987)
- [4] Thomas C, Ranchin T, Wald L, et al. Synthesis of Multispectral Images to High Spatial Resolution: A Critical Review of Fusion Methods Based on Remote Sensing Physics [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(5): 1 301-1 312
- [5] Wang Huixian, Jiang Wanshou, Lei Chengqiang, et al. A Robust SVR Image Fusion Method Based on Local Spectral and Spatial Correlation [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(4): 508-515 (王慧贤,江万寿,雷呈强,等. 光谱与空间局部相关的 SVR 影像融合方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(4): 508-515)
- [6] Wang Zhongwu, Liu Shunxi. A Practical Method for Improving Fusion Quality of High-Resolution Optical Image: Taking IKONOS as Examples [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(2): 149-153 (王忠武,刘顺喜. 一种提高高分辨率光学影像融合质量的实用方法:以 IKONOS 影像为例[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(2): 149-153)
- [7] Dou Wen, Chen Yunhao, He Huiming. Theoretical Framework of Optical Remotely Sensed Image Fusion [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(2): 131-137 (窦闻,陈云浩,何辉明. 光学遥感影像像素级融合的理论框架[J]. 测绘学报, 2009, 38(2): 131-137)
- [8] Shettigara V K. A Generalized Component Substitution Technique for Spatial Enhancement of Multispectral Images Using a Higher Resolution Data Set [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1992, 58(5): 561-567
- [9] Chavez P S, Kwarteng A Y. Extracting Spectral Contrast in Landsat Thematic Mapper Image Data Using Selective Principal Component Analysis [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1989, 55(3): 339-348
- [10] Gangkofner U G, Pradhan P S, Holcomb D W. Optimizing the High-Pass Filter Addition Technique for Image Fusion [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2008, 74(9): 1 107-1 118
- [11] Chavez P, Sides S C, Anderson J A. Comparison of Three Different Methods to Merge Multiresolution and Multispectral Data: Landsat TM and SPOT Panchromatic [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991, 57(3): 295-303
- [12] Hagolie O, Huc M, Pascual D V, et al. A Multi-temporal Method for Cloud Detection, Applied to FORMOSAT-2, VEN μ S, LANDSAT and SENTINEL-2 images [J]. *Remote Sensing of Environ-*

ment, 2010, 114(8):1 747-1 755

- [13] Ishida H, Nakajima T Y. Development of an Unbiased Cloud Detection Algorithm for a Spaceborne Multispectral Imager[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D7)
- [14] Jedlovec G J, Haines S L, Lafontaine F J. Spatial and Temporal Varying Thresholds for Cloud Detection in GOES Imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(6):1 705-1 717
- [15] Han Chunfeng. The Research of Cloud Detection and Land Cover Mode and the Temperature of Land Surface Based on HJ-1B[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2010(韩春峰. 基于 HJ-1B 星的云检测及土地覆盖模式与地表温度研究[D]. 福州:福建师范大学, 2010)
- [16] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-level Histograms[J]. *Automatica*, 1975, 11 (285-296): 23-27
- [17] Deng Lei, Chen Yunhao, Li Jing. Control Lable Remote Sensing Image Fusion Method Based on Wavelet Transform[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(1): 34-38(邓磊, 陈云浩, 李京. 一种基于小波变换的可调节遥感影像融合方法[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(1): 34-38)
- [18] Lin Hui, Du Peijun, Zhang Lianpeng. Remote Sensing Image Fusion and Evaluation Based on Wavelet Transform[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(3): 332-336(林卉, 杜培军, 张莲蓬. 基于小波变换的遥感影像融合与评价[J]. 煤炭学报, 2005, 30(3): 332-336)
- [19] Wang Z, Bovik A C. A Universal Image Quality Index[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, 9(3): 81-84
- [20] Amarsaikhan D, Saandar M, Ganzorig M, et al. Comparison of Multisource Image Fusion Methods and Land Cover Classification [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(8): 2 532-2 550

Fusion of Cloudy Optical Satellite Imagery by Cloud Detection and HPF Pass Filtering

YU Lei¹ ZHANG Yongjun¹ SUN Mingwei¹ ZHU Xinyu¹

¹ School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Noise from clouds is a common problem in optical satellite image processing. The high pass filter (HPF) fusion method is analyzed as a way to estimate the influence of cloud noise during image fusion. An approach combining cloud detection with HPF is introduced that refines the results of image fusion containing clouds. A, NIR/R-OTSU cloud detection approach is employed for real-time cloud detection, thus areas covered by clouds can be identified. A local optimization strategy is adopted in image fusion with HPF in cloudless blocks to get the fused image. Merged multispectral and panchromatic iZY-3 satellite image results show that the algorithm discussed in this paper performs better than HPF, IHS transform and Pansharp methods for merging images with clouds.

Key words: ZY-3 Satellite; satellite image; cloud detection; high pass filter; fusion

First author: YU Lei, PhD candidate, specializes in the theories and methods of fusion and radiometric normalization of remote sensing images. E-mail: leiy@whu.edu.cn

Corresponding author: ZHANG Yongjun, PhD, professor. E-mail: zhangyj@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41322010, 41301519; the National 863 Program of China, No. 2013AA12A401.