

基于梯度一致性约束的多光谱/全色影像最大后验融合方法

孟祥超¹, 沈焕锋^{1*}, 张洪艳², 张良培², 李慧芳¹

1. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079

2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079

摘要 多光谱/全色影像融合可以得到高空间分辨率的多光谱影像, 在影像解译和分类等方面具有十分重要的意义。提出一种基于梯度一致性约束的遥感影像融合方法。该方法在最大后验概率框架下, 通过梯度一致性约束建立理想高空间分辨率多光谱影像和全色影像之间的关系, 并结合多光谱影像观测模型和 Huber-Markov 影像先验, 构建融合目标函数, 最后采用梯度下降法求解得到融合影像。本文方法在目标函数中引入了梯度一致性约束, 克服了现有的同类方法受限于波段数量的缺陷, 同时在求解中自适应确定每个波段的迭代步长, 充分顾及了各波段的光谱特性, 从而既确保了融合影像的光谱信息保真度, 也提高了融合影像的空间信息融入度。通过 IKONOS 和 WorldView-2 影像对该方法进行了验证, 并与 GS, AIHS 和 AMBF 等融合方法从定性和定量两方面进行了比较分析。实验结果表明, 相比于其他方法, 该方法可以在更好保持光谱信息的同时增强影像的空间分辨率, 具有更广泛的适用范围和更佳的融合效果。

关键词 影像融合; 多光谱; 全色; 最大后验概率; 梯度一致性

中图分类号: TP752 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)05-1332-06

引言

随着遥感技术的迅速发展, 人们可以获取具有不同光谱维度的遥感影像数据, 这些影像数据所包含的信息往往具有互补性与冗余性。例如 QuickBird, IKONOS 和 GeoEye 等卫星的多光谱影像具有较高的光谱分辨率, 但是空间分辨率往往不足; 而对应的全色影像则具有高空间分辨率, 光谱分辨率却比较低。在实际应用中, 往往需要同时具有高空间分辨率与高光谱分辨率的影像。因此影像融合已成为遥感影像处理领域的研究热点之一。

迄今为止, 研究者已对多光谱/全色影像的融合进行了广泛研究。目前常见的融合框架包括算术运算法、成分替换法以及高频信息注入法等。其中算术运算法是最早、最简单的融合方法, 代表性的有加权融合、相乘融合和 Brovey 融合等。典型的成分替换法有 intensity-hue-saturation (IHS) 方法、principal component analysis (PCA) 方法^[1]、Gram-Schmidt(GS)方法等。高频信息注入法最早由 Schowengerdt 提出, Ranchin 等把这类方法称为“ARSIS”^[2], 除高通滤波

方法外, 常用的还有多分辨率分析方法, 如拉普拉斯金字塔方法^[3]、additive wavelet luminance proportional(AWLP)方法^[4]、Contourlet 变换方法^[5]等。另外稀疏融合方法是目前研究的热点之一^[6, 7]。

以上常见方法都是根据某种假设正向求解得到融合影像, 缺乏坚实的数学理论基础和严密的逻辑体系。最近, 受影像复原和超分辨率重建技术的启发, 研究者提出了基于模型的影像融合方法^[8-12]。该类方法基于影像观测模型建立目标函数, 通过逆向求解得到融合影像, 具有较好的鲁棒性。一些文献仅考虑了多光谱影像的观测模型, 而未对全色影像的观测模型予以考虑^[8, 9], 因此融合精度受到限制; 在文献^[10-12]中, 研究者利用光谱响应函数构建了全色影像的观测模型, 改进了基于模型的融合理论, 但是该方法只能对与全色波段光谱范围相交的多光谱波段进行融合, 如对于 WorldView-2 和 ETM+ 等影像不能融合所有波段, 因此限制了其适用范围。

本文在最大后验概率框架下, 提出一种基于梯度一致性约束的遥感影像融合方法。该方法结合多光谱影像观测模型、全色影像和理想高分辨率多光谱影像的梯度一致性约

收稿日期: 2013-07-22, 修订日期: 2013-10-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA12A301), 国家自然科学基金项目(41271376), 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT1278), 湖北省自然科学基金项目(2011CDA096)资助

作者简介: 孟祥超, 1989 年生, 武汉大学资源与环境科学学院硕士研究生 e-mail: mengxiangchaoabc@163.com

* 通讯联系人 e-mail: shenhf@whu.edu.cn

束, 建立融合目标函数, 最后通过梯度下降法求解得到融合影像。因此该方法具有严密的数学理论逻辑, 适用范围广, 可以减小融合影像的光谱信息失真度, 同时提高其空间信息融入度。

1 理论与方法

1.1 最大后验概率框架

在本文方法中, 我们将融合影像看作未知量, 表示为 $x = [x_1, x_2, \dots, x_B]$, B 为波段数, $y = [y_1, y_2, \dots, y_B]$ 表示多光谱影像, z 表示全色影像, 因此融合影像的最大后验概率估计式为

$$\hat{x} = \arg \max_x p(x | y, z) \quad (1)$$

经过贝叶斯变换, 式(1)变换为

$$\hat{x} = \arg \max_x \frac{p(y, z | x)p(x)}{p(y, z)} \quad (2)$$

因为 y, z 为已知量, 所以 $p(y, z)$ 可以从式(2)中去除, 变换后式(2)改写为

$$\hat{x} = \arg \max_x p(y | x)p(z | x)p(x) \quad (3)$$

1.2 概率密度函数的选取

式(3)中有三个概率密度函数, 其中 $p(y|x)$ 为原始多光谱影像对融合影像的一致性约束, 用噪声的概率密度函数表示。假设各波段噪声为随机分布的高斯噪声, $p(y_b|x_b)$ 表示为

$$p(y_b | x_b) = \frac{1}{(2\pi\alpha)^{N_1 N_2 / 2}} \exp\{-\|y_b - A_b x_b\|^2 / 2\alpha\} \quad (4)$$

式(4)中 y 为原始多光谱影像, x 为理想高分辨率多光谱影像, A 表示模糊降采样过程, a 为噪声方差, b 为波段号, N_1 和 N_2 为原始多光谱影像的宽度和高度。

式(3)中 $p(x)$ 表示影像先验, 本文采用 Huber-Markov 先验模型^[12]。该模型可以在融合过程中保持影像边缘, 并消除噪声带来的不稳定现象, 公式为

$$p(x_b) = \frac{1}{(2\pi\gamma)^{M_1 M_2 / 2}} \exp\left\{-\sum_{i,j} \sum_{\xi \in \Psi} \rho(d_\xi(x_b(i, j))) / 2\gamma\right\} \quad (5)$$

式(5)中 M_1 和 M_2 为融合影像的宽度和高度, (i, j) 为像素位置, γ 为先验模型参数, ξ 为局部像素的集合, Ψ 为所有像素的集合, $d_\xi(\cdot)$ 表示对局部像素的算子运算, $\rho(\cdot)$ 为 Huber 函数。

式(3)中 $p(z|x)$ 表示全色影像对融合影像的一致性约束, 该项建立了融合影像各波段与全色影像之间的关系。研究者普遍认为, 全色影像可以由相同空间分辨率的多光谱影像各波段线性组合表示^[12-14], 而组合系数却没有一个权威的确定方法。目前主要通过光谱响应函数得到, 但只能对多光谱影像部分波段融合。Wald 等认为多光谱影像各波段和全色影像之间的关系很复杂且非线性, 如果将全色影像表示为多光谱影像各波段的线性组合, 将会影响融合质量^[15]。

实际上, 理想高空间分辨率多光谱影像各波段往往具有与全色影像相似的结构信息。因此, 鉴于上述组合系数确定方式的缺陷, 本文采用梯度一致性约束建立全色影像和多光谱影像各波段之间的关系模型, 即假设理想影像各波段与全色影像具有近似的梯度信息, 因此 $p(z|x_b)$ 表示为

$$p(z | x_b) = \frac{1}{(2\pi\beta)^{M_1 M_2 / 2}} \exp\{-\|\nabla x_b - \nabla z\|^2 / 2\beta\} \quad (6)$$

其中 β 为噪声方差, ∇z 为全色影像的梯度, ∇x_b 为理想高分率多光谱影像第 b 波段的梯度, 定义为 $\nabla z = [\nabla z_H, \nabla z_V]^T$, $\nabla x_b = [\nabla x_{b,H}, \nabla x_{b,V}]^T$, 其中 H 表示水平方向, V 表示垂直方向, 定义为 $\nabla z_H = z_{i,j+1} - z_{i,j}$, $\nabla z_V = z_{i+1,j} - z_{i,j}$ 。

考虑到多光谱影像各波段和全色影像灰度范围不一致, 此处需要对理想高空间分辨率多光谱影像各波段和全色影像的梯度进行矩匹配, 表示为

$$(\nabla x_b)' = \frac{(\nabla z)_{std}}{(\nabla x_b)_{std}} (\nabla x_b - (\nabla x_b)_{mean}) + (\nabla z)_{mean} \quad (7)$$

其中 $(\nabla x_b)'$ 为矩匹配之后的梯度, std 表示标准差, $mean$ 表示均值, 代入式(6), 得到

$$p(z | x_b) = \frac{1}{(2\pi\beta)^{M_1 M_2 / 2}} \exp\left\{-\left\|\frac{(\nabla z)_{std}}{(\nabla x_b)_{std}} (\nabla x_b - (\nabla x_b)_{mean}) + (\nabla z)_{mean} - \nabla z\right\|^2 / 2\beta\right\} \quad (8)$$

该模型不仅可以解决确定组合系数的难题, 还能调节融合模型的正则化参数, 使各个波段在空间信息的增强和光谱信息的保持上达到一种平衡, 得到较好的融合效果。

1.3 梯度一致性融合模型及其最优化方法

将上节中求得的概率密度函数式(4)、式(5)和式(8)代入式(3)中, 经过对数变换和其他化简操作, 概率密度函数中一些参数如 M_1, M_2, N_1, N_2 等被消除, 最终得到融合目标函数, 表示如下

$$E(x_b) = \lambda_1 \|y_b - A_b x_b\|^2 + \left\|\frac{(\nabla z)_{std}}{(\nabla x_b)_{std}} (\nabla x_b - (\nabla x_b)_{mean}) + (\nabla z)_{mean} - \nabla z\right\|^2 + \lambda_2 \sum_{i,j} \sum_{\xi \in \Psi} \rho(d_\xi(x_b(i, j))) \quad (9)$$

式(9)中的第一、二项分别为原始多光谱影像和全色影像的一致性约束, 第三项为影像先验, λ_1 和 λ_2 是正则化参数, 其中 $\lambda_1 = \beta/\alpha$, $\lambda_2 = \beta/\gamma$, 在本文中, 最优正则化参数通过手动调节得到。

对于式(9), 本文通过梯度下降法进行求解, 通过连续的迭代逼近运算可得到融合影像, 迭代公式为

$$x_{b,n+1} = x_{b,n} - t_{b,n} \nabla E(x_{b,n}) \quad (10)$$

其中 $\nabla E(x_{b,n})$ 为式(9)求导得到, n 迭代次数, $t_{b,n}$ 为第 b 波段的迭代步长, 对目标函数进行二阶泰勒级数展开可得到步长 $t_{b,n}$ 。

$$t_{b,n} = \frac{[\nabla E(x_{b,n})]^T \nabla E(x_{b,n})}{[\nabla E(x_{b,n})]^T \left[\lambda_1 A_b^T A_b - \left[\frac{(\nabla z_H)_{std}^2}{(\nabla x_{b,H})_{std}^2} \Delta_H + \frac{(\nabla z_V)_{std}^2}{(\nabla x_{b,V})_{std}^2} \Delta_V \right] + \lambda_2 H_b \right] \nabla E(x_{b,n})} \quad (11)$$

在每一步迭代中对融合影像进行迭代更新, 迭代终止条件为

$$\|x_{n+1} - x_n\|^2 / \|x_n\|^2 \leq d \quad (12)$$

其中 d 为预设的迭代终止阈值。

2 实验与讨论

选用 IKONOS 和 WorldView-2 影像进行融合实验。根据 Wald 等提出的获取参考影像的方法, 按全色/多光谱影像空间分辨率的比值做降采样操作, 将融合结果与原始多光谱影像从定性和定量两方面进行对比分析, 并分别和 AIHS 方法^[13]、Gram-Schmidt(GS)方法以及文献[12]提出的 AMBF 方法做比较。本文选用五个评价指标对融合影像定量评价^[12], 分别为 correlation coefficient (CC), root mean square error (RMSE), universal image quality index (UIQI), relative dimensionless global error in synthesis (ERGAS), spectral angle (SA)。

2.1 IKONOS 影像实验

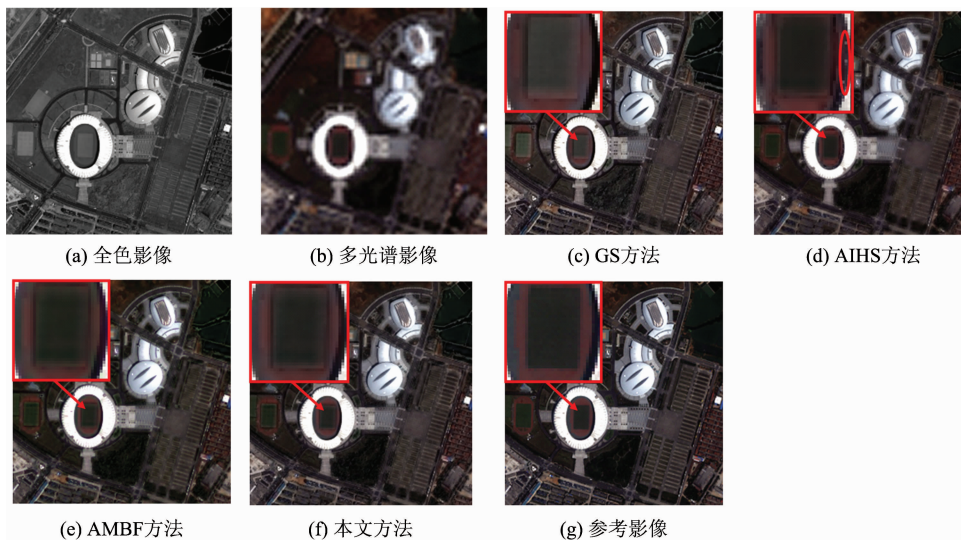


Fig. 1 Fusion results of the IKONOS experiment

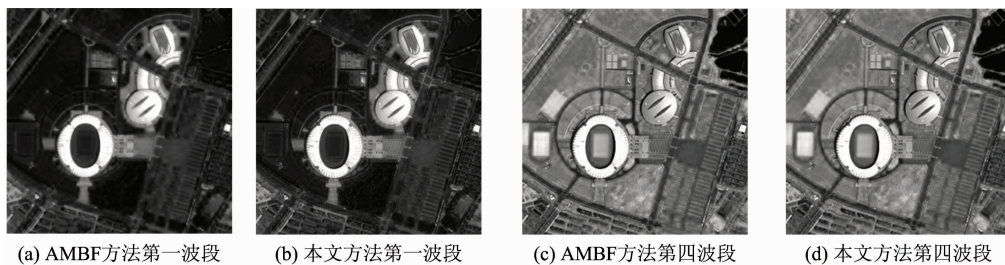


Fig. 2 Comparison of band 1 and band 4 in IKONOS experiment

Table 1 Evaluation results of the IKONOS experiment

评价指标	融合方法			
	GS	AIHS	AMBF	本文方法
CC	0.951	0.971	0.977	0.978
RMSE	52.465	41.975	35.564	34.984
UIQI	0.946	0.966	0.977	0.978
ERGAS	2.304	1.861	1.580	1.543
SA	3.510	2.602	2.518	2.460

图 1 为 IKONOS 融合实验结果, 从目视效果上看, GS 方法得到的融合影像较清晰, 但在红色框内类似运动场的绿色草坪区域, 色彩较浅, 存在部分光谱损失。AIHS 方法光谱保持较好, 尤其对于绿色植被区域, 色彩更加接近参考影像, 但是视觉效果模糊, 运动场边缘出现白色异常点。AMBF 方法和本文方法色彩上基本和参考影像一致。图 2 为本文方法和 AMBF 方法得到的融合影像在第一、四波段的对比。在纹理方面, AMBF 方法第一波段较模糊, 第四波段稍清晰, 而本文方法第一波段较清晰, 第四波段有些模糊。原因是 AMBF 方法采用光谱响应函数作为全色影像一致性约束模型的系数, 第一波段系数较小, 融入的空间信息少, 第四波段系数较大, 融入的空间信息较多; 而本文方法采用梯度一致性约束建立全色影像和融合影像的关系, 第一波段和全色影像的相关性较大, 可以保持光谱信息的同时有效增强其空间信息, 而第四波段和全色影像相关性较小, 光谱差别较大, 有效的平衡了光谱信息的保持和空间信息的增强。表 1 显示, 本文方法总体定量评价结果最好。

2.2 WorldView-2 影像实验

图 3 为 WorldView-2 影像实验结果, 从中可以看出, GS 方法得到与 IKONOS 类似的融合结果。AIHS 方法得到的融合影像整体偏绿, 尤其在建筑物边缘存在较大的光谱畸变。AMBF 方法的融合结果偏蓝绿色, 光谱扭曲较大, 原因是第五波段一致性约束模型中的系数偏大, 融入的空间信息较多, 融合影像过于锐化。图 4 为不同方法的融合结果第 40 行

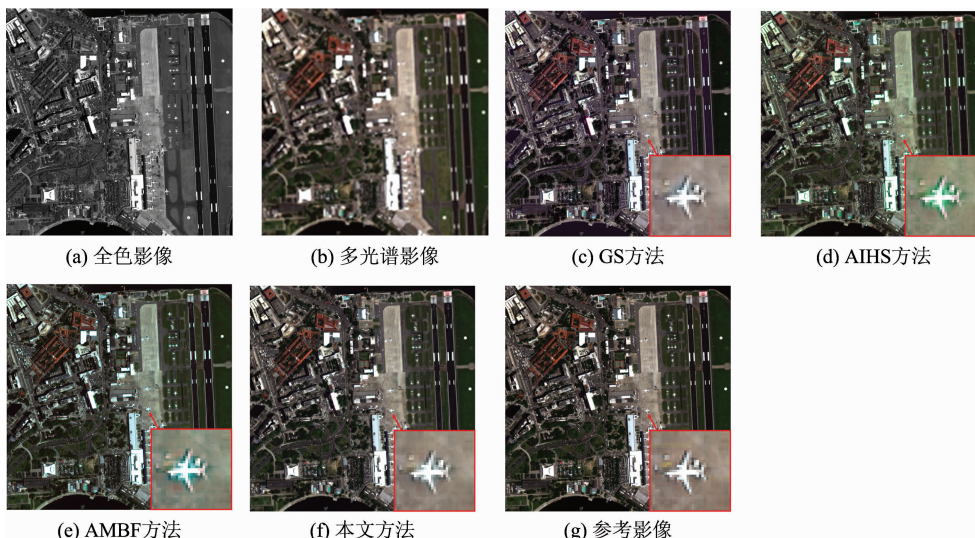


Fig. 3 Fusion results of the WorldView-2 experiment

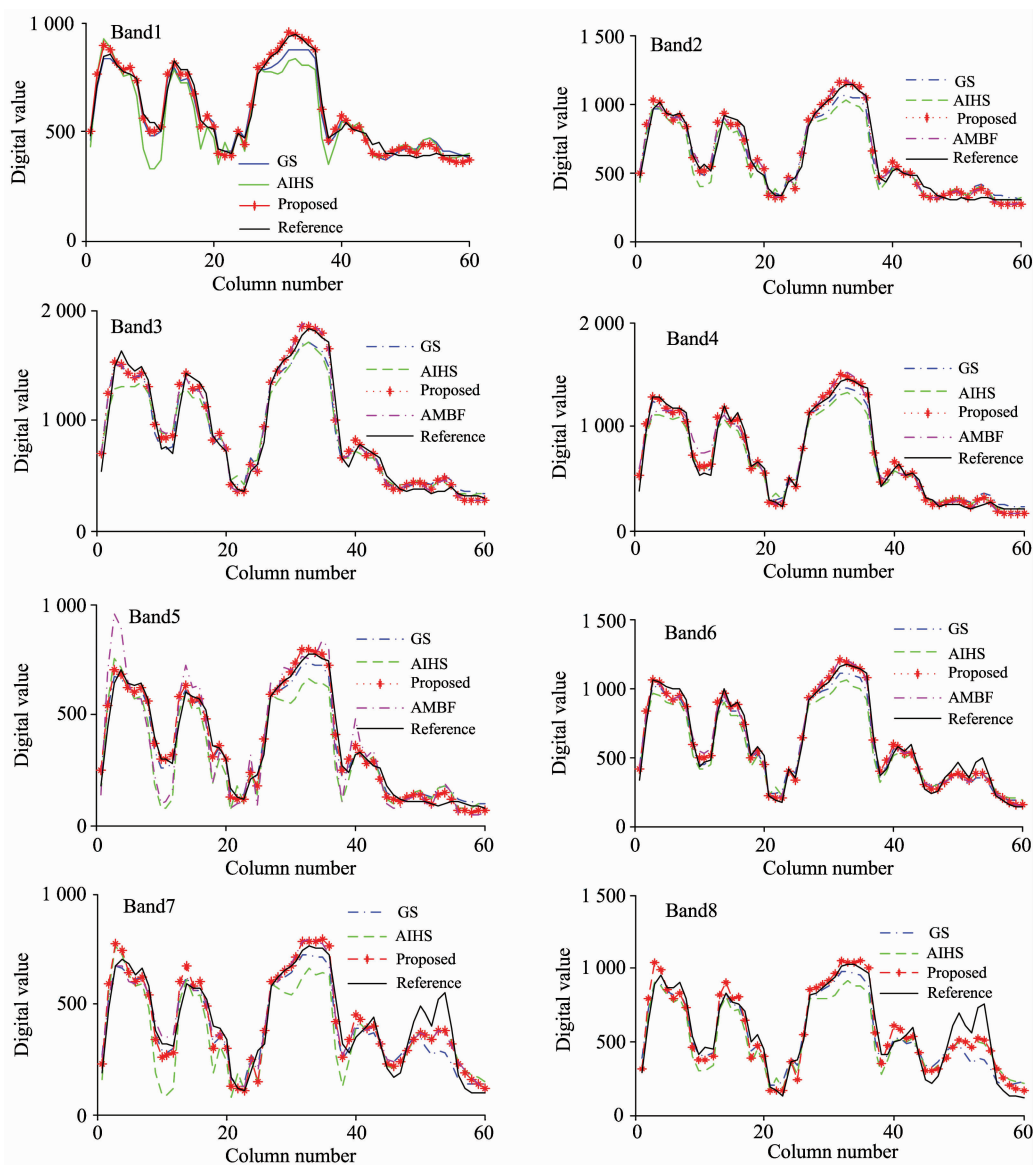


Fig. 4 Horizontal profiles of digital values of the 40th line on the fused images with different methods

Table 2 Evaluation results of the WorldView-2 experiment

评价指标	融合方法			
	GS	AIHS	AMBF	本文方法
CC	0.964	0.969	0.976	0.980
RMSE	54.079	50.166	43.492	39.313
UIQI	0.957	0.965	0.974	0.980
ERGAS	5.046	4.789	4.354	3.656
SA	4.894	4.027	3.741	3.816

的水平曲线图, 曲线越接近参考影像, 融合结果越好。可以看出, AMBF 方法第五波段的曲线图变化幅度较大, 影像过于锐化, 融合效果较差。另外 AMBF 方法受限于光谱响应函数, 只能对 WorldView-2 影像第二波段到第七波段进行融合, 是该方法致命的缺陷。图 4 显示, 本文方法的融合影像曲线图较其他方法更接近参考影像。表 2 显示, 相比于其他

方法, 该方法总体融合效果最好。

3 结 论

提出了一种基于模型的多光谱/全色遥感影像融合方法, 该方法基于最大后验概率理论框架, 通过梯度一致性约束建立全色影像和理想高分辨率多光谱影像之间的关系, 并考虑多光谱影像的观测模型和保边缘 Huber-Markov 影像先验, 从而构建理论严密的融合模型。通过 IKONOS 和 WorldView-2 影像对该方法进行验证, 并与 GS, AIHS 和 AMBF 方法做比较分析。实验表明, 本文方法适用范围广, 可以在光谱信息保真度损失不大的情况下, 同时提高空间信息融入度, 得到高质量融合影像。

References

- [1] Shah V P, Younan N H, King R L. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(5): 1323.
- [2] Massip P, Blanc P, Wald L. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(3): 800.
- [3] Wang Wencheng, Chang Faliang. *Journal of Computers*, 2011, 6(12): 2559.
- [4] Otazu X, Gonzalez-Audicana M, Fors O, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(10): 2376.
- [5] Da Cunha A L, Zhou J, Do M N. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089.
- [6] Jiang Cheng, Zhang Hongyan, Shen Huanfeng, et al. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2283236.
- [7] Jiang Cheng, Zhang Hongyan, Shen Huanfeng, et al. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 629.
- [8] Joshi M V, Bruzzone L, Chaudhuri S. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2549.
- [9] Joshi M, Jalobeanu A. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1245.
- [10] Molina R, Vega M, Mateos J, et al. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2008, 24(2): 251.
- [11] Li Z, Leung H. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(5): 1482.
- [12] Zhang Liangpei, Shen Huanfeng, Gong Wei, et al. *IEEE Transactions on Systems Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2012, 42(6): 1693.
- [13] Rahmani S, Strait M, Merkurjev D, et al. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(4): 746.
- [14] Zhang Yun. U. S. Patent, 7340099B2, 2008.
- [15] Thomas C, Ranchin T, Wald L, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(5): 1301.

Maximum a Posteriori Fusion Method Based on Gradient Consistency Constraint for Multispectral/Panchromatic Remote Sensing Images

MENG Xiang-chao¹, SHEN Huan-feng^{1*}, ZHANG Hong-yan², ZHANG Liang-pei², LI Hui-fang¹

1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract Multispectral (MS) images with high spatial resolution (HR) can be obtained by fusing MS images and panchromatic (PAN) image, the HR MS images have an important significance in image interpretation and classification, etc. In the present paper, a new image fusion method based on gradient consistency constraint for MS/PAN images is developed. The method is based on maximum a posteriori (MAP) framework. The relationship of desired HR MS images and PAN image is formulated by gradient consistency constraint. Observation model of MS images and the Huber-Markov priori are combined to solve the fused image by gradient descent algorithm. In the proposed method, gradient consistency constraint is introduced, and defect of band

number restriction is overcome in conventional model-based fusion methods. Iterative step for every band is solved adaptively, and spectral characteristics of each band are fully taken into account, so it not only ensures the spectral information fidelity, but also improves the integration degree of spatial information of fused image. The proposed method has been tested using IKONOS and WorldView-2 images. It is compared with GS, AIHS and AMBF fusion methods from both qualitative and quantitative aspects. Experimental results show that the proposed method can better preserve spectral information while enhance spatial resolution, and it has broader applicability and better fusion result than other methods.

Keywords Image fusion; Multispectral; Panchromatic; Maximum a posteriori (MAP); Gradient consistency

(Received Jul. 22, 2013; accepted Oct. 25, 2013)

* Corresponding author