

引用格式: Huang Wei, Zhang Tingting, Nie Longbao. A Weighted Gradient-based Fusion Method for Thin Cloud Removal of Landsat Images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(3): 511-517. [黄微, 张婷婷, 聂龙保. 基于加权梯度融合的 Landsat 影像薄云去除[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(3): 511-517.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.3.0511

基于加权梯度融合的 Landsat 影像薄云去除

黄 微, 张婷婷, 聂龙保

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200444)

摘要: 遥感影像中薄云的存在为影像的判读带来了极大的影响, 通过研究薄云对 Landsat 影像造成的影响, 提出一种加权梯度融合变分模型。通过在无云区域采用较小权重以保持影像自身信息, 薄云区域则采用较大权重将参考影像的梯度信息融入待修复影像, 改进了梯度模型在无云区域过度增强细节而造成的失真。采用暗通道法和梯度融合法与该方法进行比较, 实验结果表明: 该方法在有效去除薄云的同时对无云区域有较好的保真效果。

关 键 词: 薄云去除; 梯度融合; 变分模型; 加权

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2016)03-0511-07

1 引 言

遥感影像在成像过程中极易受到大气因素的影响, 不均匀大气如薄云等改变了能量的空间分布, 削弱了地物的部分反射特性, 造成影像清晰度的下降。因此, 寻找一种有效的方法消除或减少薄云遮挡, 有利于提高遥感数据应用的有效性。

遥感影像薄云去除方法主要分为空域去云和频域去云两类。频域去云的方法, 主要由于薄云信息处于影像低频的成像原理, 因此可通过分离高低频方法去除在低频中占主要信息的薄云信息, 如小波变换^[2]、同态滤波^[3-4, 6]等。然而滤波方法会将同属于低频的部分信息滤除, 造成该部分地物信息的损失^[7-9]。

空域去云算法种类较多, 经典的校正方法有暗目标减法(DOS, Dark Object Subtraction)^[10-11]和薄云最优化变换法(HOT, Haze-Optimized Transformation)^[12-13]。DOS法假设理想条件下, 大气散射使暗目标的辐射亮度值增大, 因此消除该值即可去除薄云。HOT法根据晴空条件下 Landsat 影像红光、蓝光波段的高度相关性, 寻找一个投影方向

(即晴空线), 通过计算各像元到晴空线间的距离表征该点云雾量。许多学者根据 HOT 方法划分薄云级别, 对同一级薄云采用 DOS 法去除, 避免了整体 DOS 法对某些像素的过度校正^[14-15]。以上两类方法均是逐波段处理, 而多光谱影像有丰富的光谱信息, 且各波段受薄云干扰程度不同, 因此利用光谱间相关性可实现信息互补^[16-17]。Li 等^[18]提出了一种基于多波段梯度融合的变分模型, 利用红外波段的梯度信息实现可见光波段的薄云去除。然而该方法对于整幅图像采用相同的梯度约束, 导致无云区域过度增强了边缘和纹理细节, 造成影像失真。

因此本文提出加权梯度融合变分模型。在无云区域采用较小权重以保持影像自身信息, 薄云区域则采用较大权重将参考影像的梯度信息融入待修复影像, 达到去除薄云的同时也保真的重建效果。

2 梯度融合变分模型

2.1 模型原理

薄云的主要成分为气溶胶, 当光波波长明显大于气溶胶粒子时, 光波可穿透大气, 因此薄云对可见光波段影响较大, 且这些降质在蓝绿红波段逐次降

低,而近红外三波段几乎不受薄云干扰^[19]。

同时研究表明地物的反射率在短波中红外波段与可见光波段间具有线性相关性和互补性^[20],因此可以利用无云的短波近红外波段作为参考波段建立信息融合模型可去除薄云干扰。

2.2 梯度融合变分模型

基于梯度的影像融合变分模型通过最小化能量泛函,去除薄云的同时保持影像边缘。模型可以表示为:

$$\min F(u) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \lambda |u - u_0|^2 + |\nabla u - \nabla f|^2 dx dy \quad (1)$$

其中: u_0 表示原始多波段影像, u 表示融合后的结果影像, f 表示参考影像, ∇ 为梯度运算, λ 为非负参数,用于权衡两个约束项的贡献度,由于正则项的约束性大于 λ ,因此对所有试验影像本文均取 0.01。该模型包含两项,第一项为保真项,保证恢复的影像保留原始影像的光谱特征;第二项为正则项,通过在薄云区域和无云区域采用不同的系数加权梯度融合准则来构建目标梯度,用以去除薄云。

3 加权梯度融合变分模型

3.1 加权梯度变分模型原理

考虑到薄云区域背景信息比较丰富,且分布不均匀,上述梯度融合变分模型在无云区域和薄云区域引入了相同权重的梯度,这种做法无疑对无云区域加入了不必要的细节,造成影像失真。因此,加权梯度融合变分模型在考虑了薄云去除以及无云区域保真的基础上,采用不同的权重来约束正则项:

$$\iint_{\Omega} |\nabla u - (1 - \alpha) \nabla f - \alpha \nabla u_0|^2 dx dy \quad (2)$$

其中: α 为权重,值的范围是 $[0, 1]$ 。 $\alpha = 1$ 表明在无云区忽略参考影像梯度的影响,仅采用原始影像梯度信息来约束目标梯度,防止光谱畸变。 $\alpha = 0$ 表明在云全覆盖区域,原始影像的背景无法获取,因此利用参考影像的梯度信息来约束目标梯度,进行信息恢复。在整幅影像中, α 的值分布在 $0 \sim 1$ 之间,则既可以去除薄云,又可以保持影像自身信息。

3.2 权重参数的确定

权重参数 α 是通过薄云软估计来实现的,现有的薄云检测方法大多为硬检测。然而由于薄云分布的不均匀性,硬检测无法将不同厚度的云区分开来,因此许多学者提出薄云的软检测方法,如 BSHTI (Background Suppressed Haze Thickness In-

dex)^[11], RHOT (Reliable Haze-Optimized Transformation)^[5]等。这些方法实现薄云检测时算法复杂度较大,因此本文采用一种简单方法进行薄云软估计。

同态滤波法^[3]应用照射分量与反射分量模型对遥感图像进行滤波处理,滤除反射分量中占据低频成分的薄云,使得被薄云覆盖区域细节增强。因此通过比较滤波前后影像的方差,方差变大的区域即可判定为薄云覆盖区域。

方差比较结果如图 1 所示,其中图 1(a)为原始影像,图 1(b)为同态滤波前后方差变化图。可以看到检测结果较为粗糙,出现块效应。由于薄云是连续非均匀变化的,因此本文利用导向滤波器对结果进行平滑。导向滤波器假设导向影像与滤波输出之间是一个局部线性模型^[21],使得输出影像保留导向影像的梯度信息,因此可使影像平滑的同时更好地保持边缘。导向滤波器通过最小化代价函数获得参数 a, b :

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in w_k} ((a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a_k^2) \quad (3)$$

其中: I_i 为参考影像, p 为滤波输入影像, $a I_i + b$ 为结果影像, ϵ 为正则化参数,权衡前后两项贡献度。为了更好地保持结果影像的细节信息,本文选取原始影像做参考影像。

对于已取得方差比较结果图,采用 2% 线性拉伸的方法将其归一化到 $[0, 1]$,用以作为权重参数 α ,结果见图 1(c)所示。相比于图 1(b),图 1(c)结果较为平滑,且对照原始影像来看,图 1(c)较为准确地将无云区和薄云覆盖区以不同权重区分开来。

4 实验结果及评价

本文采用 3 幅 Landsat 数据为实验对象。图 2 影像获取时间为 2000 年 7 月 27 日,图 3 影像获取时间为 2001 年 7 月 30 日,图 4 影像获取时间为 2002 年 10 月 13 日。数据覆盖了森林、水体、城市和土壤等多种地物类型。本文采用暗通道法和梯度融合法与本文算法进行比较。

实验结果如图 2~4 所示,其中图 2(a)~(d)分别表示原始影像(由波段 3、2、1 对应于红、绿、蓝波段进行彩色合成)、暗通道法、梯度融合法和本文方法处理结果。从整体效果来看,梯度融合法和本文方法处理结果达到较好的薄云去除效果,暗通道法去云效果次之。同时本文方法在无云区域保真效果优于梯度融合方法,达到较理想的去云保真效果。

对各种方法的结果图进行细节对比观察,如图 5 所示,其中图 5(a)~(d)分别对应图 2(a)~(d)的(a)红色方框位置的云区细节图,图 5(e)~(h)分别对应图 2(a)~(d)的(a)黑色方框位置的保真细节图。

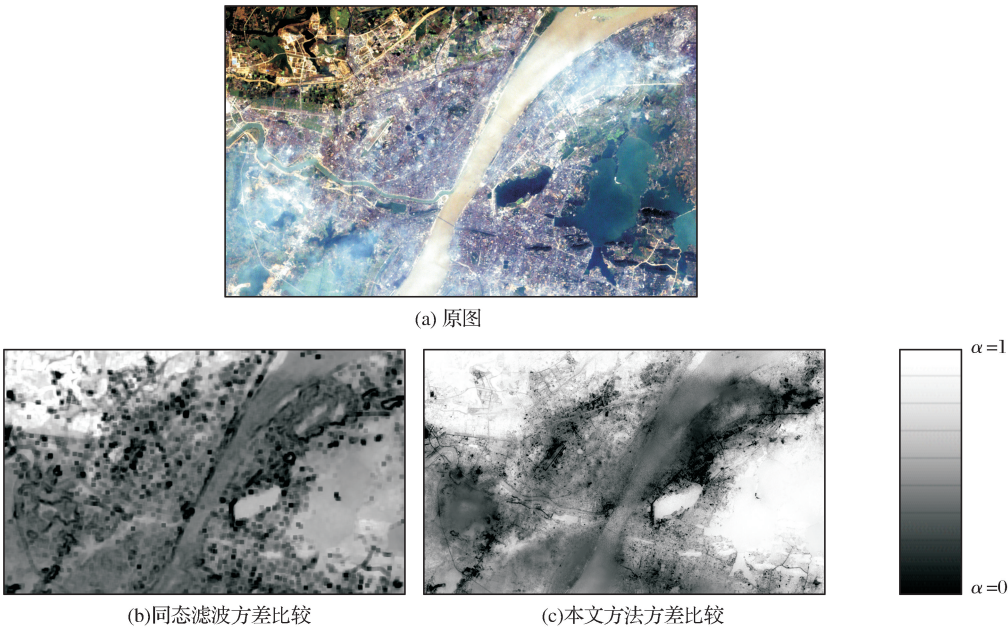


图 1 方差比较结果图

Fig.1 Results of variation comparison

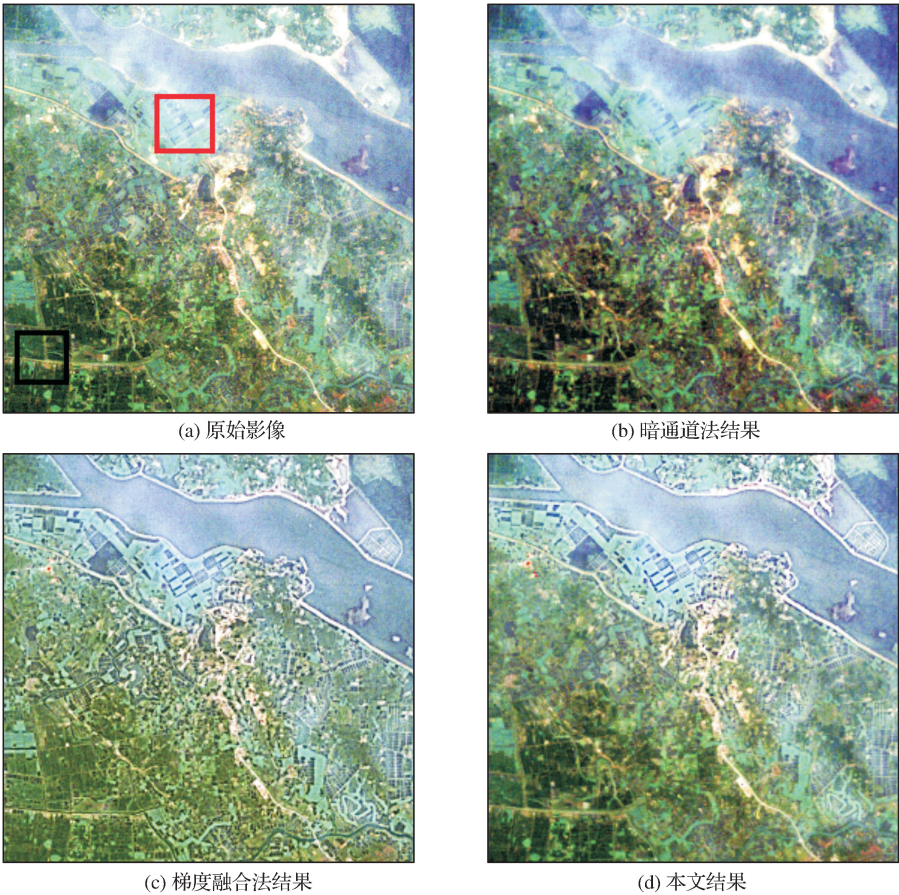


图 2 去云结果比较(实验一)

Fig.2 Comparison of cloud removal results

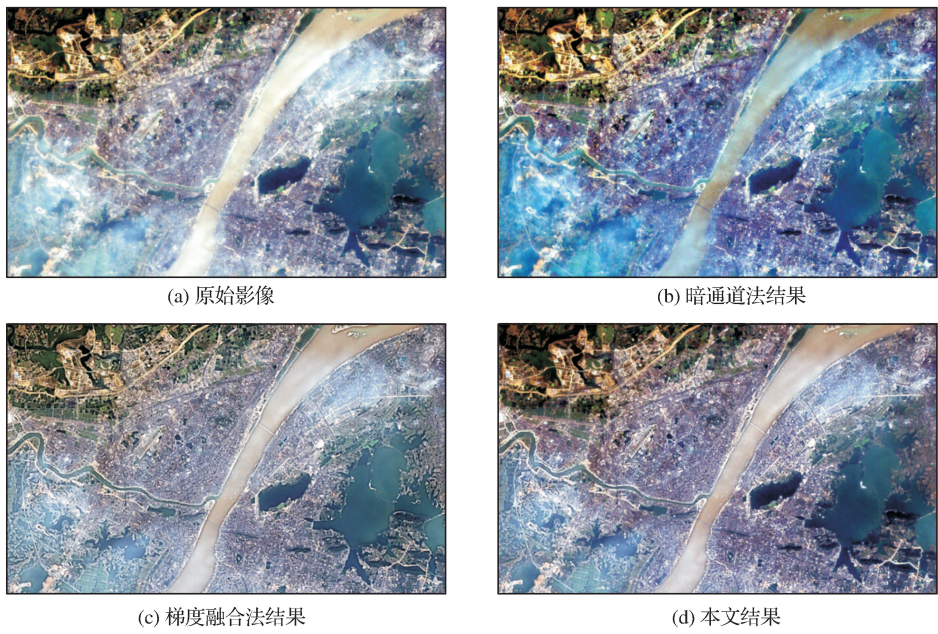


图 3 去云结果比较(实验二)

Fig.3 Comparison of cloud removal results

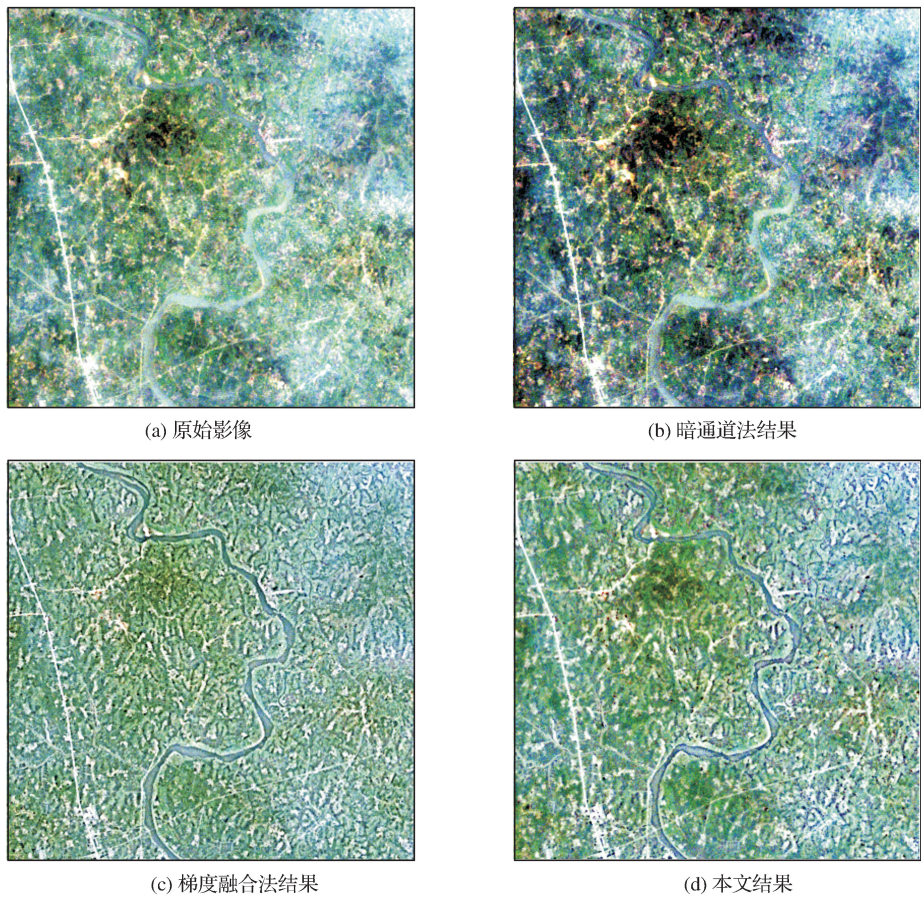


图 4 去云结果比较(实验三)

Fig.4 Comparison of cloud removal results

由上述可知,梯度融合的方法有效增强了云区边缘和纹理特征,如图 5(c)所示。然而在无云区

域,如图 5(g)显示的道路,由于过度增强该区域原本微弱的对比度,导致道路的光谱畸变。暗通道

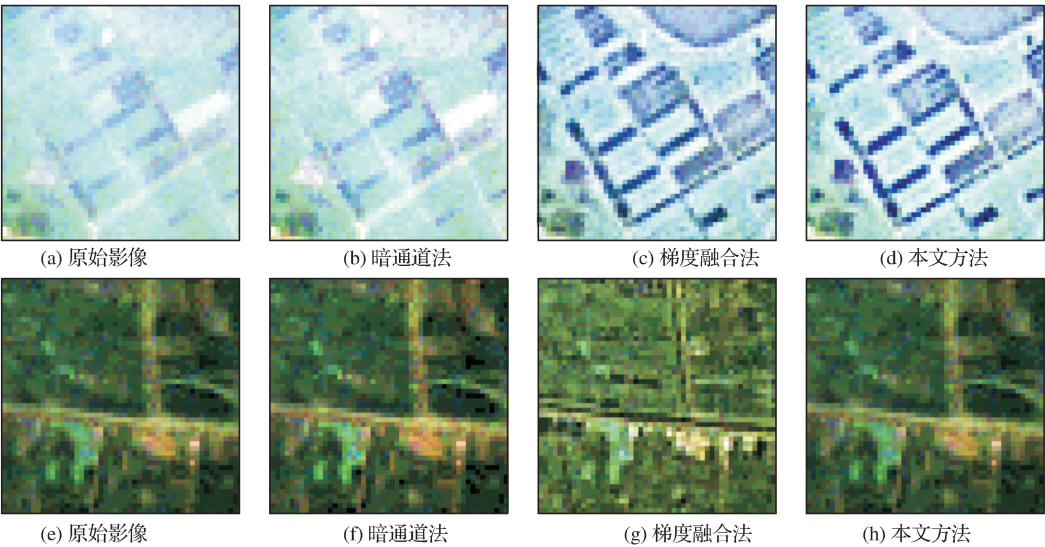


图 5 细节比较图

Fig.5 Detail comparison

法虽然取得了一定去云效果,但是同时放大了影像中的噪声。综合对比,本文方法在去除薄云的同时取得较好的保真效果。

为了定量评价加权梯度融合方法对影像梯度的提升程度,采用 MetricQ^[22] 作为评价因子。MetricQ 是一个无参考评价指标,它与影像的噪声水平、锐利程度及对比度相关。MetricQ 的定义式为:

$$Q = s_1 \frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2} \tag{4}$$

其中: s_1 、 s_2 为影像中 $N \times N$ 窗口的梯度矩阵的特征值,本文窗口取 N 为 3。主导方向能量 s_1 与区域的清晰度正相关,与模糊度负相关。比值 $\frac{s_1 - s_2}{s_1 + s_2}$ 又称区域连贯性,是与影像噪声负相关的变量。因此当区域的清晰度高而且信噪比高时, Q 最大,反之 Q 最小。

本文用 MetricQ 对影像有云区域的加权梯度融合结果进行评价,如表 1 所示。由表可以看出,在可见光 3 个波段上梯度融合法和本文方法的 Q 值均有明显提升,暗通道法提升效果次之,与上述暗通道法的噪声放大有关。

为了定量评价非云区的保真度,本文采用如下评判因子 R ^[7]:

$$R = \frac{\sum |f(i,j) - g(i,j)|}{n} \quad (i,j) \in D_{\text{非云区}} \tag{5}$$

其中: $f(i,j)$ 、 $g(i,j)$ 分别代表原始影像和去云影像的非云区域像素,即计算两者像素之差的均值, R 的值越小保真效果越好,该评价指标的统计值如

表 2 所示。

表 1 MetricQ 统计值

Table 1 Stastical value of MetricQ

		原始影像	暗通道方法	梯度融合法	本文方法
图 2	蓝波段	0.53	0.52	0.50	0.74
	绿波段	0.52	0.52	0.46	0.62
	红波段	0.57	0.58	0.67	0.83
图 3	蓝波段	0.63	0.71	0.94	1.16
	绿波段	0.74	0.86	1.11	1.39
	红波段	0.91	0.91	1.73	2.01
图 4	蓝波段	0.65	0.64	0.51	0.67
	绿波段	0.62	.61	0.57	0.75
	红波段	0.78	0.77	0.67	0.96

表 2 保真度(R)定量评价

Table 2 Quantitative evaluation of fidelity

		暗通道方法	梯度融合法	本文方法
图 2	蓝波段	20.05	4.93	0.80
	绿波段	24.27	5.77	0.94
	红波段	39.13	6.81	1.11
图 3	蓝波段	6.71	1.44	0.06
	绿波段	5.31	1.67	0.07
	红波段	8.82	1.97	0.09
图 4	蓝波段	4.66	2.40	0.05
	绿波段	3.25	2.81	0.06
	红波段	6.27	3.31	0.08

5 结 语

本文提出一种保真的薄云去除方法,针对传统

梯度融合模型在非云区引起的过校正问题,将方差对比结果用做加权梯度,能够在去除薄云的同时保持非云区的辐射特性。然而本文的加权梯度融合算法,在平滑区域覆盖的薄云去除并不理想,有待后续改进。

参考文献(References):

- [1] Richter R, Wang X, Bachmann M. Correction of Cirrus Effects in Sentinel-2 Type of Imagery[J]. Remote Sensing, 2011, 32(10): 2931-2941.
- [2] Du Y, Guindona B, Cihlara J. Haze Detection and Removal in High Resolution Satellite Image with Wavelet Analysis[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 40(1): 210-217.
- [3] Stockham T G. Image Processing in the Context of a Visual Model[J]. Proceedings of The IEEE, 1972, 60(7): 828-842.
- [4] Feng Chun, Ma Jianwen, Dai Qin, *et al.* An Improved Method for Rapid Removal of Thin Cloud in Remote Sensing Images[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2004, (4): 1-3. [冯春, 马建文, 戴秦, 等. 一种改进的遥感图像薄云快速取出方法[J]. 国土遥感资源, 2004, (4): 1-3.]
- [5] Zhou Xiaojun, Guo Jia, Zhou Chengxian, *et al.* An Algorithm of Cloud Remocal for Remote Sensing Image based on Improved Homomorphic Filtering[J]. Radio Engineering, 2015(3): 14-18 [周小军, 郭佳, 周承仙, 等. 基于改进同态滤波的遥感图像去云算法[J]. 无线电工程, 2015(3): 14-18.]
- [6] Wu X P, Yang W N, Li G M. Thin Cloud Removal of ZY-3 Image based on Improved Homomorphism Filtering Method. International Conference on Geoinformatics[C]//21st International Conference on Geoinformation, 2013: 1-4.
- [7] Shen H, Li H, Qian Y, *et al.* An Effective Thin Cloud Removal Procedure for Visible Remote Sensing Images[J]. SPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 96(11): 224-235.
- [8] Chander G, Helder D L, Bonyk W C. Landsat-4 /5 Band 6 Relative Radiometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(1): 206-210.
- [9] Garcla J C, Moreno J. Removal of Noises in Chris/Proba Images; Application to Space Campaign Data[C]//Proceedings of the 2nd Chris/Proba Workshop, 2004: 28-30.
- [10] Li Hongli, Shen Huanfeng, Du Bo, *et al.* A High-fidelity Method of Removing Thin Cloud from Remote Sensing Digital Images based on Homomorphic Filtering[J]. Remote Sensing Application, 2011, (1): 41-44. [李洪利, 沈焕峰, 杜博, 等. 一种高保真同态滤波遥感影像薄云去除方法[J]. 遥感信息, 2011, (1): 41-44.]
- [11] Chavez J. An Improved Dark-object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 24(3): 459-479.
- [12] Zhang Y, Guindona B, Cihlara J. An Image Transform to Characterize and Compensate for Spatial Variations in Thin Cloud Contamination of Landsat Images[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(2-3): 173-187.
- [13] He X Y, Hu J B, Chen W. Haze Removal based on Advanced Haze-optimized Transformation (AHOT) for Multispectral Imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(20): 5331-5348.
- [14] Lan X, Zhang L, Shen H. Single Image Haze Removal Considering Sensor Blur and Noise[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2013, (1): 1-13.
- [15] Zhang Y, Guindon B. Quantitative Assessment of a Haze Suppression Methodology for Satellite Imagery; Effect on Land Cover Classification Performance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(5): 1082-1089.
- [16] Lü H T. Removal of Thin Clouds in Visible Bands Using Spectrum Characteristics of the Visible Bands[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2015: 929-932.
- [17] Liu C B, Hu J B. Haze Detection, Perfection and Removal for High Spatial Resolution Satellite Imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 32(23): 8685-8697.
- [18] Li H, Zhang L, Shen H, Li P. A Variational Gradient-based Fusion Method for Visible and SWIR Images[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2012, 78(9): 947-958.
- [19] Kaufman Y J, Sendra C. Algorithm for Automatic Atmospheric Corrections to Visible and Near-IR Satellite Imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9(8): 1357-1381.
- [20] Karnieli A, Kaufman Y J, Remer L. AFRI—Aerosol Free Vegetation Index[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 77(1): 10-21.
- [21] He K M, Sun J, Tang X D. Guided Image Filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [22] Zhu X, Milanfar P. Automatic Parameter Selection for Denoising Algorithms Using a No-reference Measure of Image Content[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(12): 3116-3132.

A Weighted Gradient-based Fusion Method for Thin Cloud Removal of Landsat Images

Huang Wei, Zhang Tingting, Nie Longbao

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai 200444, China)

Abstract: The presence of thin cloud in remote sensing images has brought great impact for follow-up image interpretation. To remove thin cloud of Landsat images, a weighted gradient-based total variation fusion method is proposed. Considering the highly correlation and complementarity between the infrared and visible bands, we choose gradient information of infrared bands as reference. In our method, lower weights are used in cloudless areas to integrate the gradient information of reference images into the restored images. By doing so, the spectrum information of cloudless areas is well kept. Oppositely, higher weights in thin cloud areas are used to remove cloud. In contrast with dark channel method and gradient-based method, our method is effective visually to remove thin cloud and modify spectral distortion causing by excessive detail enhancement of gradient-based model. Quantitatively, the difference index R of our method in the cloudless areas is significantly lower than that of other methods.

Key words: Thin cloud removal; Gradient-based fusion; Total variation model; Weighted