

遥感图像薄云的小波自适应阈值去除

王修信¹, 江丽莎¹, 陈云坪², 王锦莉¹

(1. 广西师范大学计算机科学与信息工程学院 广西 桂林 541004; 2. 电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

【摘要】可见光遥感图像最常见的薄云噪声严重地影响其解译的准确性, 因此根据薄云噪声主要影响图像的低频信号, 提出单波段遥感图像小波变换自适应阈值去云, 图像经小波分解后, 薄云噪声与地物信息在低频小波系数的阈值使用遗传算法以广义交叉验证GCV准则作为目标函数自动寻找, 然后对小波系数进行阈值化去云。结果表明, 该方法可有效去除薄云噪声并保留地物信息, 使原来模糊的地物细节信息变清晰, 信息熵最高, 去云效果优于小波同态滤波, 且明显优于同态滤波; 不同尺度低频小波系数中薄云噪声与地物信息间的阈值, 可用遗传算法和GCV准则有效地自动确定。

关键词 自适应阈值去云; 广义交叉验证准则; 遗传算法; 遥感图像; 小波变换

中图分类号 TP75

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.03.014

Thin Cloud Removal from Remote Sensing Images with Adaptive Thresholds of Wavelet Transforms

WANG Xiu-xin¹, JIANG Li-sha¹, CHEN Yun-ping², and WANG Jin-li¹

(1. College of Computer Science and Information Technology, Guangxi Normal University Guilin Guangxi 541004;

2. School of Automation, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

Abstract Thin cloud is one type of the most common noises in optical remote sensing images. It will severely affect the recognition precision of images. As thin cloud mainly exists in low frequency domain, the algorithm with adaptive thresholds of wavelet transform is presented to remove thin cloud in the single band image. The thresholds between thin cloud and land surface objects in the wavelet coefficients can be adaptively searched with general crossing validation (GCV) and genetic algorithm (GA). Then thin cloud is removed by shrinking wavelet coefficients. Results indicate that thin cloud can be effectively removed with the proposed algorithm while land surface objects are maintained, and blurry details of land surface objects become clear. With the highest entropy, the cloud-removed image from the algorithm shows better effect than those from homomorphic wavelet-based filter and homomorphic filter. The different scale thresholds of wavelet coefficients between thin cloud and land surface objects can be picked out with GA and GCV automatically.

Key words cloud removal with adaptive thresholds; general crossing validation; genetic algorithm; remote sensing image; wavelet transform

薄云薄雾是可见光遥感图像最常见的噪声之一, 因此有效地去除薄云对提高遥感图像解译的准确性具有重要意义。遥感图像去云的方法很多, 如多幅图像叠加^[1-2]、基于多光谱信息^[3-4]和多传感器图像融合^[5-6]等。但单波段图像去云由于不需要无云数据, 特别适合处理大面积薄云, 近年来成为研究热点之一, 主要方法有空域多项式法和频域同态滤波, 变换方法如小波变换^[7-8]、bandelet变换^[9]等。但目前小波变换去云时系数萎缩的阈值多依靠主观经验手工选取, 计算工作量较大^[7-8], 而采用小波变换结合同态滤波对低频近似系数进行处理却无法去除散布

在频率较低细节系数中的少量薄云噪声, 导致去云不完全。针对以上问题, 本文提出单波段遥感图像小波自适应阈值去云, 小波系数中薄云噪声与地物信息间的阈值利用遗传算法和广义交叉验证GCV准则自适应地寻找, 然后对小波系数进行阈值化去云。

1 小波变换原理

设 $V_j^2 (j \in \mathbf{Z})$ 是 $L^2(\mathbf{R}^2)$ 可分离多分辨率分析, 尺度函数系 $\{\Phi_{j,m,n} | (m,n) \in \mathbf{Z}^2\}$ 构成 V_j^2 规范正交基, 小波系 $\{\Psi_{j,m,n}^\varepsilon | j,m,n \in \mathbf{Z}, \varepsilon=1,2,3\}$ 构成 $L^2(\mathbf{R}^2)$ 规范

收稿日期: 2010-11-08; 修回日期: 2013-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(41061040); 广西省“八桂学者”工程专项经费

作者简介: 王修信(1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事遥感与地理信息系统方面的研究。

正交基。

图像 $f(x,y) \in V_j^2$ 可用其在 V_j^2 空间投影表示为:

$$A_j f(x,y) = A_{j+1} f + D_{j+1}^1 f + D_{j+1}^2 f + D_{j+1}^3 f$$

其中,

$$A_{j+1} f = \sum_{m,n \in Z} C_{j+1,m,n} \Phi_{j+1,m,n}$$

$$D_{j+1}^\varepsilon f = \sum_{m,n \in Z} C_{j+1,m,n}^\varepsilon \Psi_{j+1,m,n}$$

$$\varepsilon=1,2,3$$

用 H_r 、 G_r 和 H_c 、 G_c 分别表示一维镜像共轭滤波器低通 H 和高通 G 分别作用在尺度函数行和列, 则在尺度 $j+1$ 二维 Mallat 快速分解算法为:

$$C_{j+1} = H_r H_c C_j, \quad D_{j+1}^1 = H_r G_c C_j, \quad D_{j+1}^2 = G_r H_c C_j,$$

$$D_{j+1}^3 = G_r G_c C_j.$$

2 小波自适应阈值去云

薄云噪声在空域对遥感图像的影响是清晰度降低、灰度均值变大, 而在频域主要影响图像低频信号。图像经 n 层小波分解为近似系数 C_j 和细节系数 D_j^ε ($\varepsilon=1,2,3$), 选择合理分界层数 m , 使得薄云噪声主要包含在频率较低的 C_j 和 $m+1 \sim n$ 层 D_j^ε 中, 也有部分地物信息, 而频率较高的 $1 \sim m$ 层 D_j^ε 中主要包含地物信息。

对 C_j 和 $m+1 \sim n$ 层 D_j^ε , 遗传算法以 GCV 准则为目标函数, 自适应寻找薄云噪声与地物信息间的最优阈值^[10]。GCV 将某点值用邻域线性组合近似表示为:

$$\text{GCV}(\delta_j^\varepsilon) = \frac{\frac{1}{N_j^\varepsilon} \sum_{n=1}^{N_j^\varepsilon} (D_j^\varepsilon - D_{j,\delta}^\varepsilon)^2}{(N_{j,0}^\varepsilon / N_j^\varepsilon)^2}$$

$$\text{GCV}(\delta_j^c) = \frac{\frac{1}{N_j^c} \sum_{n=1}^{N_j^c} (C_j - C_{j,\delta}^c)^2}{(N_{j,0}^c / N_j^c)^2}$$

式中, δ_j^ε 、 N_j^ε 分别为 D_j^ε 的阈值、个数; δ_j^c 、 N_j^c 分别为 C_j 的阈值、个数; $D_{j,\delta}^\varepsilon$ 、 $C_{j,\delta}^c$ 分别为阈值化后细节系数和近似系数; $N_{j,0}^\varepsilon$ 、 $N_{j,0}^c$ 分别为 $D_{j,\delta}^\varepsilon$ 、 $C_{j,\delta}^c$ 中被置零个数。利用遗传算法取适应度函数 $F = -1/(1 + \text{GCV}(\delta_j^\varepsilon))$, 自适应寻找最优阈值。当 F 最大值时, $\text{GCV}(\delta_j^\varepsilon)$ 、 $\text{GCV}(\delta_j^c)$ 取最小值, 对应阈值为最优阈值。

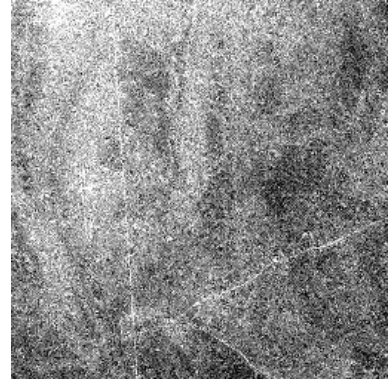
对主要包含地物信息的 $1 \sim m$ 层 D_j^ε 不作处理, 而阈值化 $m+1 \sim n$ 层 D_j^ε 和 C_j , 大于阈值的系数为薄云噪声, 置 0, 而小于阈值的系数为地物信息, 保留。

$$D_j^\varepsilon = \begin{cases} 0 & |D_j^\varepsilon| \geq \delta_j^\varepsilon \\ D_j^\varepsilon & |D_j^\varepsilon| < \delta_j^\varepsilon \end{cases}, C_j = \begin{cases} 0 & |C_j| \geq \delta_j^c \\ C_j & |C_j| < \delta_j^c \end{cases}$$

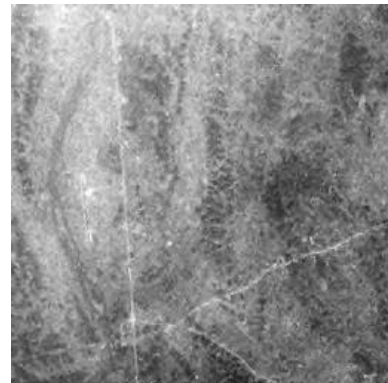
小波反变换 $D_{j,\delta}^\varepsilon$ 、 $C_{j,\delta}^c$ 重构图像, 灰度均值、标准差、信息熵客观评价去云效果。

3 实验结果

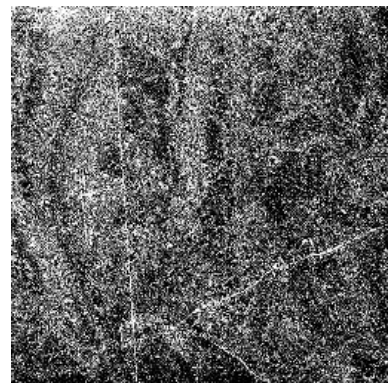
图像一去云结果如图1所示, 根据实验经验, 对包含薄云噪声的 Landsat TM 遥感图像(图1a所示)小波变换分解10层, 依次取 $m=2 \sim 9$ 进行自适应阈值去云, 计算去云评价数据, 如表1所示。可以看出, 图像在去云后灰度均值下降, 整体灰度更为接近, 导致标准差下降, 而信息熵大幅度增加。信息熵最大时分界层 $m=4$, 且当 $m>4$ 后, 均值、标准差下降幅度变缓。因此, 去云分界层数取4较佳。



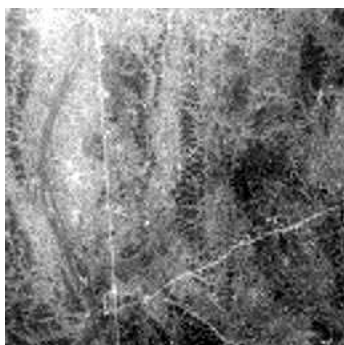
a. 薄云覆盖图像一



b. 小波自适应阈值



c. 同态滤波



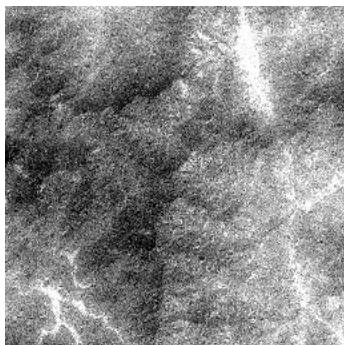
d. 小波同态滤波

图1 图像一去云结果

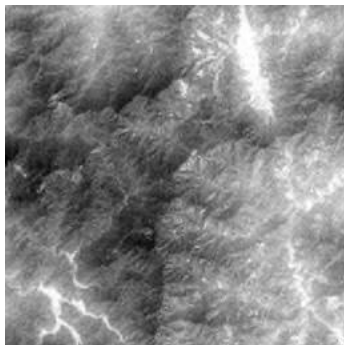
表1 不同分界层小波变换去云

m	灰度均值	标准差	信息熵
原图	140.0	55.4	3.2
2	138.1	48.6	7.0
3	136.8	42.3	7.1
4	135.4	37.6	7.2
5	134.2	36.3	7.1
6	133.6	35.9	7.1
7	132.9	35.1	7.0
8	132.1	34.6	7.0
9	131.5	34.0	7.0

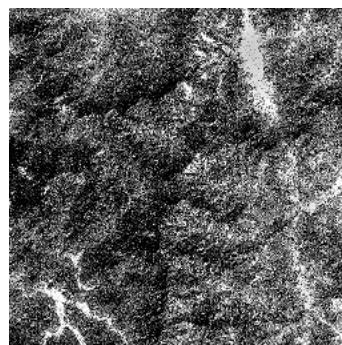
图像二去云结果如图2所示,用相同方法确定图2a的最佳去云分界层数 $m=5$,对两幅不同时间获取的图像分别进行小波自适应阈值。为比较本文方法去除薄云的效果,同时使用较常用的小波同态滤波和同态滤波两种方法去云,其中小波同态滤波法将原始图像小波分解1层,对低频近似系数进行同态滤波处理后重构图像。图像一去云前后统计数据、图像二去云前后统计数据分别如表2和表3所示。



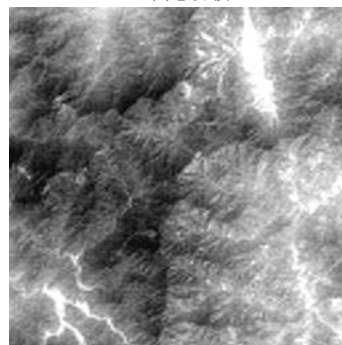
a. 薄云覆盖图像二



b. 小波自适应阈值



c. 同态滤波



d. 小波同态滤波

图2 图像二去云结果

表2 图像一去云前后统计数据

实验方法	灰度均值	标准差	信息熵
原图	140.0	55.4	3.2
小波自适应阈值	135.4	37.6	7.2
同态滤波	94.4	77.6	7.0
小波同态滤波	138.9	38.1	7.1

表3 图像二去云前后统计数据

实验方法	灰度均值	标准差	信息熵
原图	133.7	57.6	3.6
小波自适应阈值	130.1	47.8	7.5
同态滤波	88.5	72.2	7.1
小波同态滤波	132.2	48.4	7.4

从目视效果看,原图受薄云的影响,对比度低,道路、河流、山峰轮廓等地物细节信息较模糊;小波自适应阈值法、小波同态滤波法均能较有效地去除薄云噪声,去云后地物细节信息(如图1中道路与河流、图2中山峰轮廓)变为较清晰,视觉效果明显优于同态滤波;但由于小波同态滤波法仅对小波低频近似系数进行去云处理,频率较低小波细节系数中的薄云噪声没有去除,去云后图像中仍混杂少量无法完全去除的薄云噪声。同态滤波无法去除的薄云噪声比小波同态滤波法更多,灰度与原图像有差异,且部分地物细节信息丢失。

从评价参数看,小波自适应阈值法效果优于小波同态滤波法和同态滤波法。3种方法去云后图像的灰度均值均降低,但小波同态滤波法去云后图像中

仍混杂少量灰度值较大的薄云噪声, 灰度均值比小波自适应阈值法高; 而同态滤波存在去云过度的现象, 导致灰度均值下降明显过度。信息熵均大幅度提高, 但自适应阈值法的信息熵依次高于小波同态滤波法、同态滤波。小波变换方法去云后的标准差因整体灰度更接近而略小于原图, 而同态滤波去云后图像的标准差增大, 原因是薄云噪声占整个图像信息的较小比例, 同态滤波去云的同时也丢失了部分地物细节信息。

5 结 论

小波自适应阈值法通过选择合理的去云分界层数将薄云噪声与地物信息较好地分离, 利用自适应阈值去云, 能更有效地去除遥感图像中的薄云噪声, 效果优于小波同态滤波、明显优于同态滤波。小波变换多分辨率分析能用小波系数较精确表达图像边缘, 因此其系数阈值化可较有效地去除薄云信息而保留地物信息, 使得原来模糊的地物细节信息变为较清晰, 且去云后图像的信息熵提高, 视觉效果较好。小波同态滤波法仅对图像小波分解的低频近似系数进行滤波处理, 无法完全去除薄云噪声。

小波自适应阈值法去云的关键是系数中薄云噪声与地物信息间阈值的确定, 遗传算法以GCV准则作为目标函数, 可有效地自动寻找不同尺度和方向下小波系数中两者间的最优阈值, 提高了单波段遥感图像薄云去除的效果。

小波最佳分界层 m 主要受薄云厚度影响, 不同图像薄云厚度不同, m 也不同。当薄云厚度逐渐增加时, 频率较高的地物信息逐渐减弱, 小波分解后薄云噪声逐渐影响愈来愈多分解层的细节系数, 导致 m 逐渐变小。 m 的自动确定有待于深入研究。当薄云逐渐趋向厚云时, 算法无法有效去除云覆盖影响。

参 考 文 献

- [1] BENABDELKADER S, MELGANI F. Contextual spatiotemporal postreconstruction of cloud-contaminated images[J]. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 2008, 5(2): 204-208.
- [2] GAO Yang, XIE Hong-jie, YAO Tan-dong, et al. Integrated assessment on multi-temporal and multi-sensor combinations for reducing cloud obscuration of MODIS snow cover products of the Pacific Northwest USA[J]. Remote Sens Environ, 2010(114): 1662-1675.
- [3] JI C Y. Haze reduction from the visible bands of landsat TM and ETM+ images over a shallow water reef environment[J]. Remote Sens Environ, 2008(112): 1773-1783.
- [4] HE Xing-yuan, HU Jian-bo, CHEN Wei, et al. Haze removal based on advanced haze-optimized transformation (AHOT) for multispectral imagery[J]. Int J Remote Sens, 2010, 31(20): 5331-5348.
- [5] GABARDA S, CRISTOBAL G. Cloud covering denoising through image fusion[J]. Image and Vision Computing, 2007(25): 523-530.
- [6] TSENG D C, TSENG H T, CHIEN C L. Automatic cloud removal from multi-temporal SPOT images[J]. Appl Math Comput, 2008(205): 584-600.
- [7] 朱锡芳, 吴峰, 陶纯堪. 基于小波阈值理论的光学图像去云处理新算法[J]. 光子学报, 2009, 38(12): 3312-3317.
ZHU Xi-fang, WU Feng, TAO Chun-kan. A new algorithm of cloud removing for optical images based on wavelet threshold theory[J]. Chinese Acta Photonica Sinica, 2009, 38(12): 3312-3317.
- [8] 朱锡芳, 吴峰, 庄燕滨. 基于Mallat算法遥感图像去云雾处理的改进方法[J]. 遥感学报, 2007, 11(2): 241-246.
ZHU Xi-fang, WU Feng, ZHUANG Yan-bin. An improved approach to remove cloud and mist from remote sensing digital images based on Mallat algorithm[J]. Chinese Journal of Remote Sensing, 2007, 11(2): 241-246.
- [9] MAALOUF A, CARRE P, AUGEREAU B, et al. A bandelet-based inpainting technique for clouds removal from remotely sensed images[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2009, 47(7): 2363-2371.
- [10] PATEL V M, EASLEY G R, HEALY D M. Shearlet-based deconvolution[J]. IEEE Trans Image Process, 2009, 18(12): 2673-2685.

编 辑 漆 蓉