

# 基于小波分析的遥感图像去云方法的研究

江兴方<sup>1,2</sup> 戴丽丽<sup>1</sup> 沈为民<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 江苏工业学院数理学院, 江苏 常州 213164; <sup>2</sup> 苏州大学现代光学研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 针对遥感图像由于云的覆盖无法判读地物的信息,从云占据图像中的低频成分这一特征出发,用小波分析方法研究小波变换后在近似系数、小波系数的各个层次中云分布的特点,运用权重法,减少云噪声突出景物信息,从而实现去云。采用图像信息熵和保真度来评价去云后的图像,结果表明,通过小波变换后增大细节系数权重,实现去云,发现分解级数在 6 以上,增大细节系数的权重后,重构得到的图像其信息熵随权重变化较小,去云效果更好;对于有厚云覆盖的遥感图像去云效果好的图像其保真度位于  $0.87 \pm 0.03$  区间内,对于有薄云覆盖的遥感图像去云效果好的图像,则保真度位于  $0.95 \pm 0.03$  区中;采用 Brovery 变换后,减少了彩色失真,特别对于去除薄云的遥感图像彩色恢复得很好。

**关键词** 信息光学; 小波分析; 近似系数; 细节系数; 去云

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200929s1.0115

## Study of Removing Cloud in Remote Sensing Images Based on Wavelet Analysis

Jiang Xingfang<sup>1,2</sup> Dai Lili<sup>1</sup> Shen Weiming<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Mathematics and Physics, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou, Jiangsu 213164, China)  
(<sup>2</sup> Modern Optics Institute, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract** Because of cloud in remote sensing images, the information of earth objects could not be read. A new method for removing cloud had been projected based on wavelet analysis. Because of the cloud in remote sensing images was in the part of low frequency, the new method enhanced the sence information by various approximation coefficients and detail coefficients with various weight after wavelet transform. The criterions of entropy and fidelity had been applied to evaluate the quality of removed cloud images. The result shown the cloud in remote sensing images was removed by wavelet transform. First, the effect of removal cloud was good when the detail coefficients were multiplied weight and the information of sence was enhanced for decomposition order over 6. Second, the fidelity of the good enhanced images was  $0.87 \pm 0.03$  and  $0.89 \pm 0.04$  for thick cloud and for thin cloud, respectively. Finally, the color could be restored for removal cloud images by Brovery transform. In particular, Brovery transform was suit for removal thin cloud in remote sensing images.

**Key words** information optics; wavelet analysis; approximation coefficient; detail coefficient; removing cloud

## 1 引 言

遥感数据已经广泛地应用于农业、林业、气象、地质、测绘、电力、国土资源调查、灾害监测、环境监测等领域,但是在遥感图像中由于云的覆盖,无法判读地物的信息,大大降低遥感数据的利用率。在遥感图像中常用的去云方法包括:多光谱图像法<sup>[1]</sup>、多幅图像插入法、多源数据融合法<sup>[2]</sup>、同态滤波法<sup>[3,4]</sup>、单幅图像去云法<sup>[5,6]</sup>等。上述方法取得了较好的去云效果,

但没有从云的频率特征入手来实现去云。从傅里叶变换角度来看,图像可区分为高频成分和低频成分,边缘处于高频成分,而遥感图像中覆盖的云具有弥散性、局域性、成团性,并且中间相对厚些,边缘相对薄些,因此遥感图像中云噪声占据的是低频成分。

从傅里叶变换后的结果中不能得知各个频率分量在时间上或者空间上的位置,也就是说,时频窗口的大小不随时间而变化。采用多分辨率分析的小波

**基金项目:** 江苏省现代光学技术重点实验室开放课题(KJS0730)和江苏工业学院科技基金(ZMF08020003)资助课题。

**作者简介:** 江兴方(1963—),男,博士,副教授,主要从事彩色图像增强、实时图像增强方面的研究及多媒体教学软件的开发。E-mail: xfjiang@jpu.edu.cn

分析法克服了傅里叶分析的缺点,在低频段采用了高的频率分辨率和低的时间分辨率,而在高频段,则采用了低的频率分辨率和高的时间分辨率。

从云的频率特征角度来看,遥感图像中覆盖的云位于低频成分中,采用小波分析法可以对低频成分进行一定程度上的分离,通过增强景物信息、抑制低频的云噪声的手段,实现去云是可行的。

## 2 小波分析

1974年法国石油信号处理工程师 J. Morlet 提出了小波变换的概念并建立了反演公式;1986年法国科学家 Y. Meyer 构造出了具有一定衰减性的光滑函数。他用缩放与平移均为  $2^j$  的倍数,构造了  $L^2(R)$  空间的规范正交基;1988年 S. Mallat 提出了小波变换的多分辨率分析, I. Daubechies 发现滤波器组与小波基函数有密切关系,实现了信号的快速分解与重构,自此以后小波分析真正地踏上了工程应用的道路。

连续小波变换的小波函数是由母函数通过尺度和位移的变化来获得的,其数学形式为

$$\Psi_{\tau,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right), \quad (1)$$

式中  $s$  是尺度参数,  $\tau$  为位移参数,因子  $1/\sqrt{s}$  使不同尺度的小波均具有相同的归一化能量。

1992年, Daubechies 提出的离散小波变换,其数学表示式

$$\Psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0^j}} \Psi\left(\frac{t-k\tau_0 s_0^j}{s_0^j}\right), \quad (2)$$

式中  $j$  和  $k$  是整数,  $s_0 > 1$  是一个扩展步长,如果  $s_0 = 2$  且  $\tau_0 = 1$ ,那么这时所采用的采样点所形成的图形就称为二进制网格。在这种图形中,当尺度增大 1 倍时,根据尼奎斯特(Nyquist)采样定律所需要的采样点就可以减少一半,而在尺度缩小的时候,则所用的采样点数就需要增加,在位移和尺度所形成的平面上,大尺度的采样点比较稀疏;而当尺度越来越小时,采样点就越来越密,由于大尺度采样所对应的是很慢的变化成分,少量的采样点就足以表示函数在这种尺度上的特点,而在小尺度采样中,所要分析的是很快的变化,因此需要较多的采样点才能反映这种快速的变化。

在每一级小波变换中,所有的频谱都可以利用小波函数的频谱和尺度函数的频谱来实现。如果在一个尺度函数频谱上再加上一个同一级的小波函数的频谱,就得到了一个频谱宽度为原来 2 倍的新的

尺度函数,也就是说,某一个尺度函数可以用下一级的小尺度的尺度函数经过一定的变换来表示

$$\varphi(2^j t) = \sum_k h_{j+1}(k) \varphi(2^{j+1} t - k), \quad (3)$$

(3)式称为双尺度关系。如果一个尺度函数可以用很多组小波函数来替代,那么下一级小波函数也可以用经过变换的尺度函数来表示,这就建立了尺度函数和小波函数之间的关系

$$\Psi(2^j t) = \sum_k g_{j+1}(k) \varphi(2^{j+1} t - k), \quad (4)$$

因为原函数可以表示成小波之和的形式,所以,它也可以表示为比例尺函数之和的形式

$$f(t) = \sum_k \lambda_j(k) \varphi(2^j t - k). \quad (5)$$

如果将公式推导到  $j-1$  阶的尺度,那么原函数就可以表示成  $j-1$  阶的小波函数和比例尺函数之和的形式。

$$f(t) = \sum_k \lambda_{j-1}(k) \varphi(2^{j-1} t - k) + \sum_k \gamma_{j-1}(k) \varphi(2^{j-1} t - k), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{式中} \quad \lambda_{j-1} &= \sum_m h(m-2k) \lambda_j(m), \\ \gamma_{j-1} &= \sum_m g(m-2k) \gamma_j(m), \end{aligned}$$

说明函数的任何一阶小波系数与尺度系数都由它们上一级系数加权而得。

## 3 小波分析在遥感图像去云中的应用

任意一幅可压缩的图像经小波变换分解后,可以划分成  $2 \times 2$  的子块,经过 3 次分解后得到的近似部分  $LL_3$  为低频分量,大小只占据原图像的  $1/64$ ,但能量集中了 90% 以上。小波变换在数字图像压缩、图像的边缘检测、信号分析、医学影像以及计算机视觉等领域有着广阔的应用前景,能有效地从图像信号中提取所需要的信息<sup>[7~9]</sup>。如图 1 所示,一幅图像经历一级小波变换后得到了  $HH_1$ ,  $HL_1$ ,

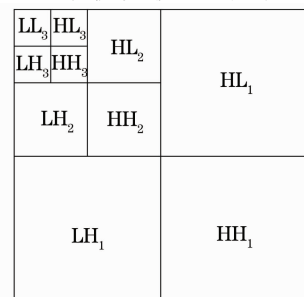


图 1 二维图像小波变换  
Fig. 1 2D wavelet transform

LH<sub>1</sub>, LL<sub>1</sub> 共 4 个部分,其物理意义分别是垂直方向和水平方向高通分量、垂直方向高通分量和水平方向低通分量、垂直方向低通分量和水平方向高通分量、垂直方向低通分量和水平方向低通分量,其中 HH<sub>1</sub>, HL<sub>1</sub>, LH<sub>1</sub> 相应于用小波系数进行描述,而 LL<sub>1</sub> 则用近似系数进行描述,在第二级小波变换中,LL<sub>1</sub> 又得到了 HH<sub>2</sub>, HL<sub>2</sub>, LH<sub>2</sub>, LL<sub>2</sub> 共 4 个部分,以次类推,每一级小波变换后得到 3 组小波系数。根据云噪声的特点运用权重法,增大细节系数的权重后,重构图像来削弱云噪声,突出景物信息,从而实现去云。

实验采用 2 幅 256 × 256 有代表性的带有厚云、薄云的图像,如图 2(a)和图 2(c)所示,分解级数 1~8, 细节系数的权重 1~10, 选用的小波是常用的 Daubechies 4 号小波,得到了一系列增强后的图像,其中图 2(b)和图 2(d)分别是分解级数为 6 和 7 权重为

10 的增强图像,可以看出,厚云、薄云得到了去除,但是彩色偏暗,有所失真。采用 Brovery 变换<sup>[10]</sup>,即以原始图像各像素 R,G,B 三原色亮度的比例,来调整增强后的图像,力求恢复原始图像的色彩。假设原图像各像素三原色亮度值分别为 I<sub>1</sub>(i,j,1), I<sub>1</sub>(i,j,2), I<sub>1</sub>(i,j,3), 增强后得到图像为 I<sub>2</sub>(i,j,1), I<sub>2</sub>(i,j,2), I<sub>2</sub>(i,j,3), 则 Brovery 变换后得到的新图像为

$$I_3(i,j,k) = I_1(i,j,k) \times \frac{I_2(i,j,1) + I_2(i,j,2) + I_2(i,j,3)}{I_1(i,j,1) + I_1(i,j,2) + I_1(i,j,3)}, \quad (7)$$

式中 k=1, 2, 3 分别表示 R, G, B 分量。图 2(b)和图 2(d)分别经 Brovery 变换后得到的新图像如图 2(e)和图 2(f)所示,可以看出,对于去除厚云的图像,在 Brovery 变换后亮度明显增加了,对于去除薄云的图像, Brovery 变换后色彩恢复得很好。

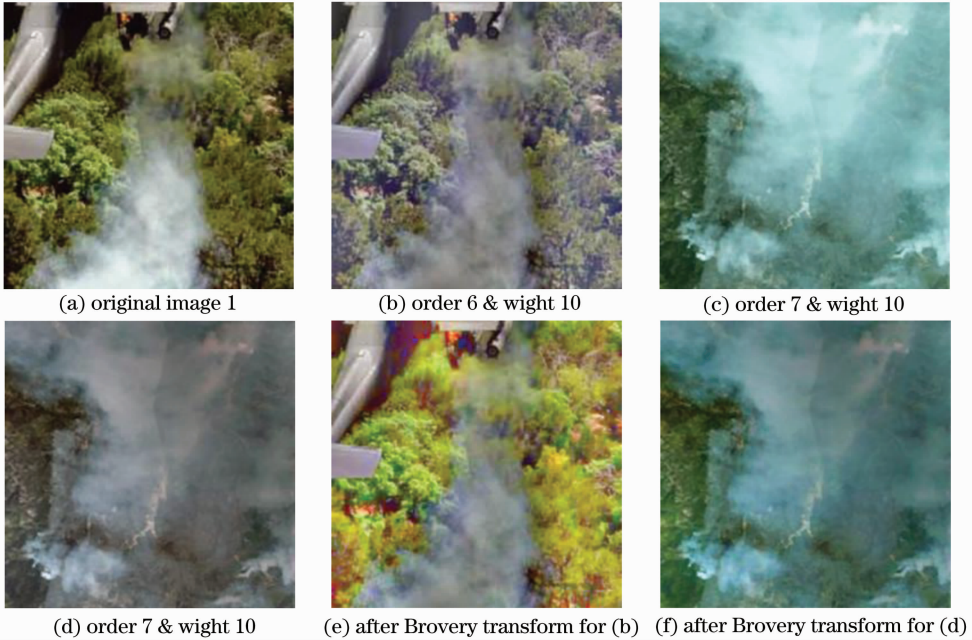


图 2 小波变换及其 Brovery 变换后增强的图像

Fig. 2 Enhanced images by wavelet and Brovery transform

对于小波变换得到的一系列图像,采用图像信息熵<sup>[4]</sup>和保真度进行评价,其中信息熵表示为

$$\text{Entropy} = - \sum_{i=0}^{255} P_i \log_2 P_i, \quad (8)$$

式中 P<sub>i</sub> 表示像素灰度值为 i 的像素个数占总像素的百分比。设原始图像为 g(i,j), 增强后的图像为 ĝ(i,j), 则保真度定义为

$$\text{Fidelity} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g(i,j) - \hat{g}(i,j)]^2}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N g(i,j)^2}. \quad (9)$$

## 4 结 论

从计算的结果来看,图像信息熵随着小波变换分解的级数增大总体上增大,如图 3(a)所示,对于细节系数权重为 10 信息熵由大到小的顺序相应分解级数为 8, 7, 6, 1, 5, 4, 3, 2; 如图 3(b)所示,对于细节系数权重为 10 信息熵由大到小的顺序相应分解级数为 8, 7, 1, 6, 5, 4, 2, 3。随着细节系数权重增大图像信息熵呈单调减小的趋势。说明小波变换后图像的信息量有所下降,从主观判断增强后的图像中去云效果质量好的是图 2(b)和图 2(d), 其中图 2(b)是对图 2(a) 经 6 级分解后对细节系数权

重取 10 时所得到的图像,该图像信息熵为 7.0639;其中图 2(d)是对图 2(c)经 7 级分解后对细节系数权重取 10 所得到的图像,其信息熵为 6.8701,可见

它们共同之处信息是熵在 7 附近,而且都是位于变化比较缓慢的曲线上。

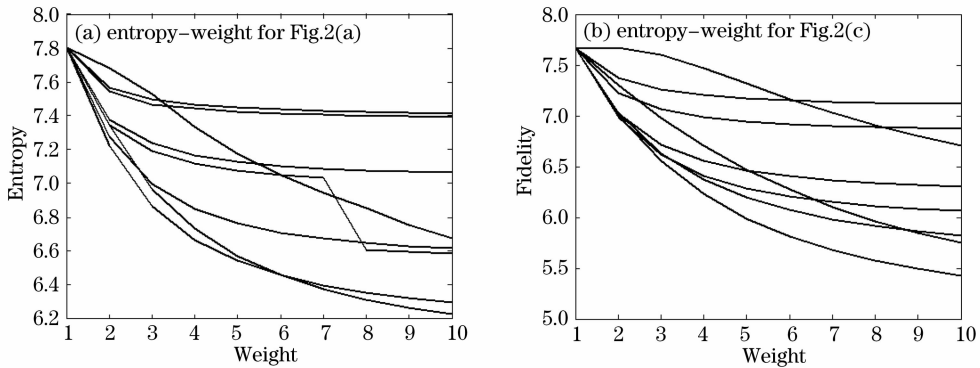


图 3 增强后的图像信息熵与细节系数权重的关系曲线

Fig. 3 Curves of entropy-weight

经过很多幅有厚云和薄云覆盖的遥感图像采用小波变换后对细节系数用权重法进行去云,得出以下结论:1)分解级数在 6 和 6 以上得到的增强图像信息熵较高,信息熵随细节系数权重增加变化也相对平稳,得到的图像去云效果好;2)对于有厚云覆盖的遥感图像,取得较好去云效果的图像其相应的保真度位于  $0.87 \pm 0.03$  区间;对于有薄云覆盖的遥感图像,取得较好去云效果的图像其相应的保真度位于  $0.95 \pm 0.03$  区间;3)经过 Brovery 变换后,彩色得到较大程度上的恢复,特别是对去除薄云彩色恢复效果很好。

### 参 考 文 献

- Li Xiaochun, Wang Yong, Chen Jing. Detection and removal of clouds and their shadows from multi-spectral image [J]. *J. Astronautics*, 2004, **25**(5): 555~559  
李小春,王 勇,陈 鲸. 多光谱图像中云层及阴影的检测与消除[J]. 宇航学报, 2004, **25**(5): 555~559
- Salvador Gabarda, Gabriel Cristobal. Cloud covering denoising through image fusion[J]. *Science Direct*, 2007, **25**: 523~530
- 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 & Resources*, 2004, **62**(4): 1~5  
冯 春,马建文,戴 芹等. 一种改进的遥感图像薄云快速去除的方法[J]. 国土资源遥感, 2004, **62**(4): 1~5
- Xie Huamei, He Qiao, Zheng Ning *et al.*. The improved homomorphic filter algorithm for removing cloud of remote sensing image based on the second exploitation of ERDAS tool[J]. *J. Beijing Normal University*, 2005, **41**(2): 150~153

- 谢华美,何启翔,郑 宁等. 基于 ERDAS 二次开发的遥感图像同态滤波薄云去除算法的改进[J]. 北京师范大学学报, 2005, **41**(2): 150~153
- Jiang Xingfang, Pan Guowei, Tao Chuncan. Application of Huygens secondary-wave method in eliminating cloud and its shadow for remote sensing image[J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(2): 165~168  
江兴方,潘国卫,陶纯堪. 惠更斯次波法在遥感图像去云和云影中的应用[J]. 应用光学, 2007, **28**(2): 165~168
- Jiang Xingfang, Pan Guowei, Tao Chuncan. Cloud elimination method in remote sensing image based on spline curve[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(6): 581~583  
江兴方,潘国卫,陶纯堪. 基于样条曲线的一种遥感图像去云方法[J]. 激光技术, 2007, **31**(6): 581~583
- Zhang Jingjing, Fang Yonghua. Novel image fusion algorithm for multi-band polarimetric image based on visible light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1067~1072  
张晶晶,方勇华. 基于可见光的多波段偏振图像融合新算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1067~1072
- Guo Liang, Xing Mengdao, Liang Yi *et al.*. Algorithm for airborne spotlight synthetic aperture imaging radar data processing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1183~1190  
郭 亮,邢孟道,梁 毅等. 一种机载合成孔径成像激光雷达聚束模式成像算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1183~1190
- Sun Yingzi, Wang Dongguang, Zhang Hongqi *et al.*. Method and precision analysis for measuring retardation of infrared waveplate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 685~688  
孙英姿,王东光,张洪起等. 红外波片相位延迟的测试方法及精度分析[J]. 光学学报, 2006, **26**(5): 685~688
- Zhou Qianxiang, Jing Zhongliang, Jiang Shizhong. Remote sensing images fusion with bilinear resampling wavelet transform [J]. *J. Shanghai Jiaotong University*, 2004, **38**(4): 545~549  
周前祥,敬忠良,姜世忠. 遥感影像双线性插值小波融合方法[J]. 上海交通大学学报, 2004, **38**(4): 545~549