

# 基于小波阈值理论的光学图像去云处理新算法\*

朱锡芳<sup>1,2</sup>, 吴峰<sup>1,3</sup>, 陶纯堪<sup>2</sup>

(1 常州工学院 电子信息与电气工程学院, 常州 213002)

(2 南京理工大学 电光学院, 南京 210094)

(3 苏州大学 现代光学技术重点实验室, 苏州 215006)

**摘要:**分析了部分云覆盖的单幅光学遥感图像经过多层小波变换后,景物信息和云噪声在小波分解系数中的分布关系,并提出了云区阈值法来有效去除云噪声.通过选择适当的分界层数,将景物信息、云噪声尽可能分别分配到低层和高层细节系数中.高层细节系数中除主要包含云噪声外,也有部分有用景物信息.由于云噪声亮度大于景物,根据亮度特征合理选择高层细节系数的亮度阈值,去除云噪声,而保留其中的景物信息.通过对低层、高层细节系数和近似系数分别设置权重,增加景物对比度,减小残留云影响,从而重构得到恢复图像.提出了以信息熵作为分界层数、权重、阈值等参量选择的定量标准.实验证明,按信息熵标准能正确地选择参量,依据本文算法得到的去云效果远优越于同态滤波和 Retinex 算法,且能充分保留云区以外景物信息.

**关键词:**图像处理;阈值;权重因子;小波分解;熵

**中图分类号:** TN911.73

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)12-3312-6

## 0 引言

对地遥感光学成像受到越来越多的关注和重视,此类光学图像数据在地形制图、农业评价、森林管理、水资源调查以及灾害监测等实际领域之中发挥着日益重要的作用.但是,成像过程经常受到云的干扰,获得的光学图像对比度下降,清晰度和分辨率无法达到使用要求,图像数据可利用率大大降低.因此,遥感光学图像去云处理对于提高数据的有效利用率具有重要意义.

去云处理,一般是通过对同一地区不同时间的多幅光学图像进行融合<sup>[1-2]</sup>,消除云覆盖,而多幅图像的取得并不容易.单幅图像去云则能节约数据采集成本,但由于原始数据有限,难度最大,通常采用同态滤波算法作处理<sup>[3-4]</sup>.该算法滤除云噪声的同时,损失了低频的图像背景成分,并且丢失了部分有用的高频信息.目前也有 Retinex 算法去云处理的尝试<sup>[5]</sup>.

从遥感物理的角度,云属于大气气溶胶的范畴,在空间域中,含云区域具有局部能量大,灰度平均值高、方差小的特点;而在频率域中,该区域主要集中在影像的低频部分,其他地物影像信息在相对较高的频带范围内.依据遥感光学图像中云和景物成分的这种频率分布特征,本文针对云覆盖的单幅光学图像,系统提出基于小波理论的去云算法.光学图像

经多层小波变换后,得到每层的细节系数和最高层近似系数.通过分析各层细节系数的频率关系,得出高层细节系数频率大于低层细节系数,因此通过选择合理的分界层数,分别将景物信息、云噪声尽量分配到低层细节系数、高层细节系数中.高层细节系数中主要包含云噪声,也含有部分景物信息,根据它们的亮度特征,选择亮度阈值,去除高层细节系数中云噪声,而保留有用景物信息.将低层细节系数、高层细节系数设置权重,提高景物信息的对比度.近似系数主要包含图像背景信息,不作处理.重构以上系数,获得处理结果.

详细分析了本文算法中分界层数、阈值和权重等参量的变化对处理结果的影响,提出以熵为判据,逐步选择最佳参量的方案.图像处理实验证明,熵判据与视觉评价一致,选择最优参量的处理结果能获得最佳处理效果.以平均亮度、对比度、熵和平均梯度为客观评价指标综合评价最终处理结果,比较本文算法和同态滤波、Retinex 算法的处理结果,表明本文算法能有效去除云覆盖,恢复遮蔽景物信息,且充分保留并突出云区以外的有用信息,效果优于同态滤波、Retinex 算法.

## 1 小波变换基本原理

数字图像以二维离散数据表示,具有有限的分辨率.根据小波变换多分辨率分析理论,可以假设数字图像处于  $V_{m-1}$  尺度空间,而图像数据则为该尺度空间的近似系数  $C_{m-1}$ .对其作用二维离散小波变换,使用一个高通、一个低通滤波器,在水平和垂直

\* 江苏省现代光学技术重点实验室开放课题(T8108012)资助  
Tel:13616119966 Email:zhuxf@czu.cn  
收稿日期:2009-03-04 修回日期:2009-04-24

两个方向上分别作用两次滤波,图 1 为一层小波变换的过程.第  $m$  层近似系数  $C_m$  是  $C_{m-1}$  分别经过行和列低通滤波的结果, $D_m^H$ 、 $D_m^V$ 、 $D_m^D$  分别称为第  $m$  层水平细节系数、垂直细节系数、对角细节系数.对  $C_m$

作类似分解,依次类推,即是多层小波分解.因此数字图像经过多层小波变换后,得到各层的细节系数和最高层的近似系数<sup>[6-7]</sup>.

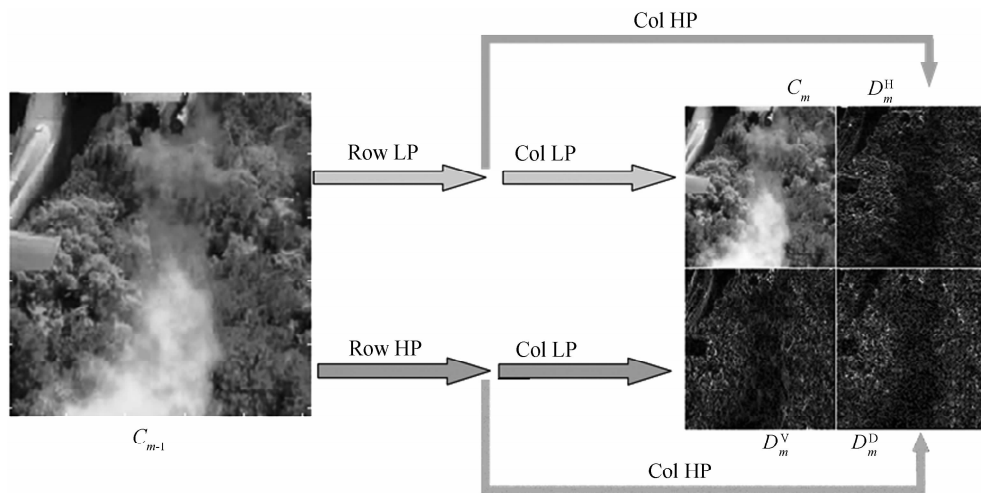


图 1 二维离散小波变换

Fig. 1 2-D discrete wavelet transform

由图可知, $m$  层的近似系数  $C_m$  是  $C_{m-1}$  低通滤波的结果, $D_m^H$ 、 $D_m^V$ 、 $D_m^D$  是  $C_{m-1}$  至少作用一次高通滤波的结果,因此数字图像作多层小波变换后,同一层的细节系数比近似系数频率高.最高层的近似系数是不断低通滤波的结果,频率最低.另外, $D_{m+1}^H$ 、 $D_{m+1}^V$ 、 $D_{m+1}^D$  是由  $C_m$  分解得到,而  $C_m$  比  $C_{m+1}$  频率高,因此  $m$  层的细节系数比  $m+1$  层细节系数频率高.由此可推出,高层的细节系数频率低于低层细节系数<sup>[8]</sup>.

## 2 去云处理方法

受云影响的光学图像,云噪音和景物信息的频率不同,其中云雾占据相对低频部分,景物占据相对高频部分.令  $m=1$ ,对图像作  $n$  层小波分解,根据小波分解系数之间的频率关系,近似系数  $C_n$  部分和较高层的细节系数频率较低,可能包含了图像的云特征.而低层的细节系数频率较高,主要包含图像的景物信息.因此以某一层为分界,令该层为第  $l$  层,恰当地选择  $l$ ,将云雾和景物信息尽量分开,使得  $1 \sim l$  层细节系数包含景物信息, $l+1 \sim n$  层细节系数和近似系数包含云噪音.为使景物和云噪音能尽量分开,总分解层数  $n$  需取得略大,这还能使得近似系数  $C_n$  尽可能只包含背景信息,以减少对它的处理.以下称  $1 \sim l$  层细节系数为低层细节系数, $l+1 \sim n$  层细节系数为高层细节系数.

如图 2,一幅含有云的图像,对它作 10 层小波分解后,分别取  $l=5$ 、6 和 7 时,并重构低层细节系



图 2 实验图 1

Fig. 2 Original image in experiment 1

数、高层细节系数和近似系数得到相应的图像信息,如图 3.当  $l=5$  时,云噪音主要包含在  $6 \sim 10$  层细节系数中,景物信息主要包含在  $1 \sim 5$  层细节系数中,而近似系数,基本不包含云噪音.当  $l=6$  和 7 时,很明显低层细节系数中也包含了云噪音.取分界  $l=5$  较恰当.

由图 3 可见,云噪音主要包含在高层细节系数中,但其中仍有部分有用的景物信息,而云噪音的亮度明显高于景物信息.因此可以通过设定亮度阈值  $\delta$ ,认为高层细节系数重构图中灰度值小于  $\delta$  的图像部是景物区,保持不变,灰度值大于  $\delta$  的图像区域为云区.如果云区灰度取为 0,景物区和云区边界会产生明显的突变,而取为原始图像的平均灰度值则能消除这一影响.这样处理将除去大部分云噪音.

通过对高层细节系数的阈值处理,云覆盖下的景物信息得以恢复.为提高景物对比度,再对低层、高层细节系数设定大于 1 的权重.本文算法的过程如流程图 4.

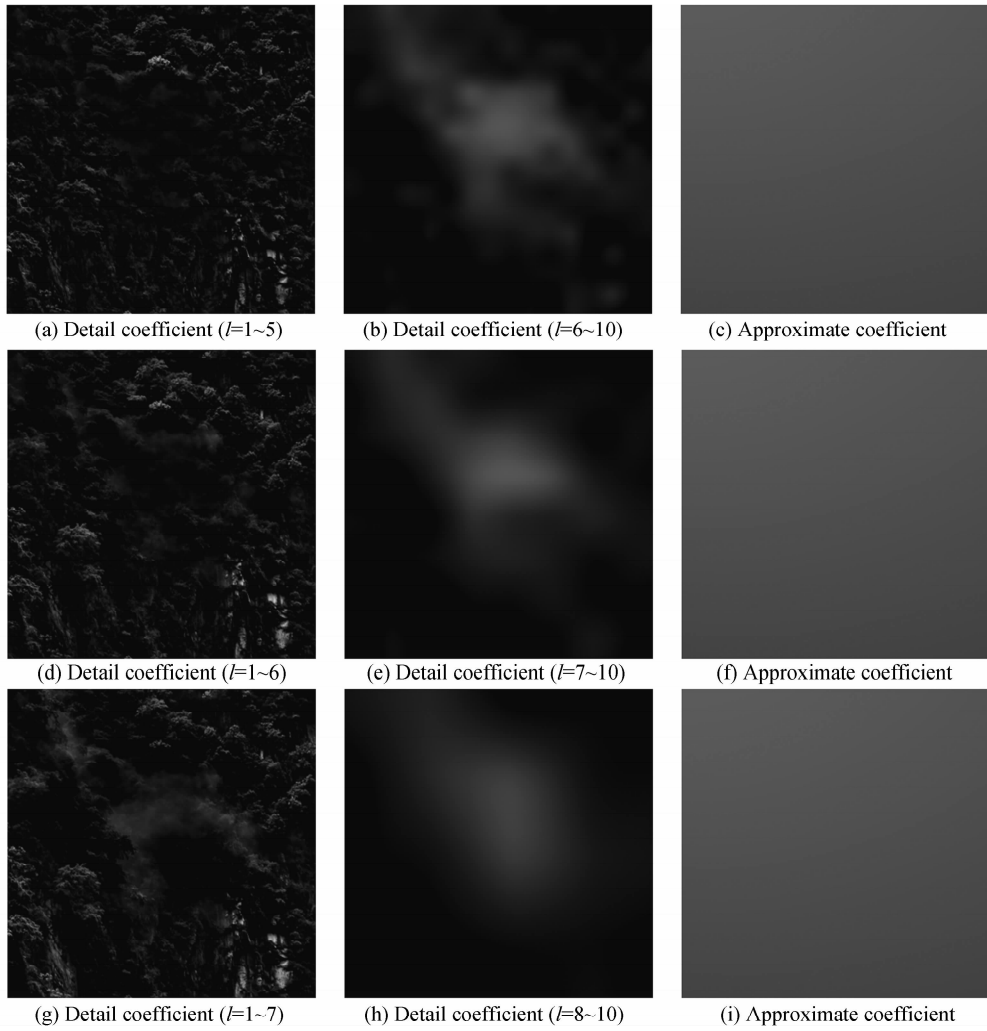


图3 图像中云和景物信息与小波分解各层系数的关系分析  
Fig. 3 Coefficient distribution of cloud and scenery in wavelet levels

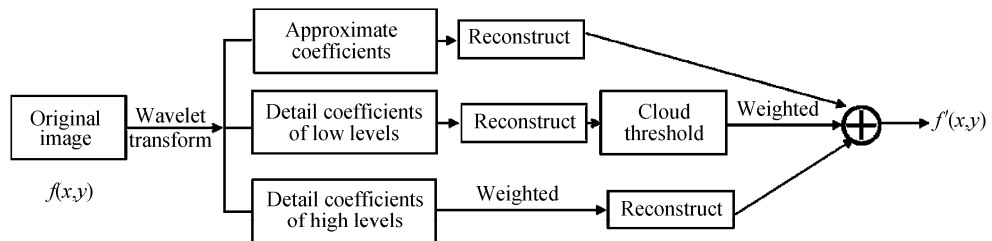


图4 去云处理流程  
Fig. 4 Flow chart of removing cloud from remote sensing images

### 3 图像处理参量的选择

本文算法处理光学图像的过程中,要选择的参量有分界层数  $l$ 、阈值  $\delta$ 、权重  $w$ ,以及小波函数. 本文采用均值、标准差、熵、平均梯度等客观评价方法,定量考察这些参量对处理效果的影响,它们的具体定义参看文献[9-14]. 均值表示图像中所有像素的平均灰度,图像去除云雾之后,灰度将下降. 标准差反映了图像的细节信息,其值越大,细节越突出. 熵的值反映了图像的信息含量,其值越大,信息越丰富. 平均梯度是指能够反映出图像细微反差的程度,

值越大表明图像越清晰.

实验表明,使用不同小波函数处理时, $l$ 、 $\delta$ 、 $w$  的选择以及处理结果差异不明显. 以下只讨论  $l$ 、 $\delta$ 、 $w$  这三个参量的选择依据.

首先确定  $l$ ,令小波分解层数为  $n$ ,为合理将景物、云雾和背景信息尽量区分到低层、高层和近似系数中,从小到大改变  $l$  的值,对于每个  $l$ ,去掉高层细节系数,保留低层和近似系数,然后重构,考察去云雾效果. 当  $l$  较小时, $l+1 \sim n$  层细节系数包含过多的景物信息,处理后信息丢失严重. 随着  $l$  增大,景物信息逐渐转移到低层细节系数中,而云噪音仍保

留在高层细节系数中,因此处理后去云效果改善,信息量增多.当  $l$  很大时,部分云噪声将保留在低层细节系数中,去云不完全,从而信息恢复不足.因此以信息熵为标准,值最大时的  $l$  最佳.

第二步确定阈值.先将亮度归一化为  $0 \sim 1$ , 阈值以  $0.1$  为步长,选择从  $0$  到  $1$ . 依据最佳  $l$  值,低层细节系数、近似系数保持不变,高层细节系数重构后,作阈值处理,三部分重构,考察处理质量.阈值很小时,高层细节系数中云全部去除,同时景物信息也有所减少,因此总体信息量较少,随阈值增大,云区外景物信息逐渐保留,因此信息熵不断增加.但当阈值增大到一定程度,云区外景物信息不再增多,而云噪声开始增大,此时信息量又将减少.因此最大信息熵对应的阈值为最佳参量.

第三步确定细节系数权重.高层细节系数处理后的恢复图像,除少量残留云外,主要包含景物信息,设置权重有利于增加景物对比度和清晰度.细节系数频率较高,因此权重越大,细节越突出,清晰度提高,标准差和平均梯度必然越大.但权重很大,景物与原始信息不符,造成失真,信息丢失.以熵来决定细节系数权重的最佳选择.

## 4 实验结果

如图 2 中的实验图一,选择 'sym6' 小波函数,作 10 层分解.按第 3 节方法确定合理参量,表 1 给出了选择不同分界层数  $l$  处理后评价参量的数据,可见当  $l=5$  熵最大,与图 3 视觉分析一致.以  $l=5$ ,对高层细节系数重构图作用阈值,如表 2 给出的数据结果,显然数据值与分析一致,随阈值增加,熵先增加后减小.  $\delta=0.4$  为最佳,此时熵最大.表 2 中亮度值变化不是单调的,且  $\delta=0$  时的处理结果与表 1 中  $l=5$  的结果不一致,主要是因为云区亮度值以原始图像的平均亮度值替代了.然后确定细节系数权重,当权重为  $1.5$  时,熵最大,因此最佳权重取为  $1.5$ .对比表 1、2 和 3,可以发现,各个最佳参量处理结果的信息熵也逐渐增加,阈值处理将保留高层细节系数中云区外的景物信息,而合理的细节系数加权则增加图像的对比度和清晰度,同时突出景物信息,同样增加信息量.各个参量处理结果的图像,与表中参量反映的情况是一致的,限于篇幅,本文未给出.按照  $l=5$ 、 $\delta=0.4$  和  $w=1.5$ ,图 5 给出了本文算法的处理结果,与同态滤波和 Retinex 算法处理结果比较,可见本文处理效果最佳,云区明显削弱,能看到原来云覆盖下的景物,云区外景物突出合理.

数据结果如表 4 给出,可见本文算法亮度最低,熵值远大于其余两种算法,表明去云效果最好,有用信息恢复最佳.

表 1 实验图一不同分界层数处理结果参量比较

$l$	亮度 $b$	对比度 $c$	熵 $h$	梯度 $g$
原图	117.68	36.26	6.44	14.82
2	99.77	8.45	5.91	12.57
3	99.77	10.04	6.15	14.01
4	99.77	11.89	6.38	14.51
5	99.76	14.03	6.81	14.67
6	99.81	15.82	6.76	14.73
7	99.70	19.58	6.71	14.78
8	98.59	26.71	6.65	14.81
9	113.07	32.14	6.62	14.82

表 2 实验图一高层细节系数不同阈值处理结果参量比较

阈值 $\delta$	亮度 $b$	对比度 $c$	熵 $h$	梯度 $g$
0.0	117.68	14.04	6.47	14.67
0.1	117.23	15.41	6.52	14.74
0.2	115.89	17.80	6.67	14.92
0.3	111.51	21.36	6.97	15.12
0.4	106.13	21.75	7.12	14.80
0.5	105.98	21.75	7.11	14.81
0.6	107.73	23.45	7.02	15.04
0.7	110.59	26.98	6.93	15.18
0.8	112.97	29.99	6.74	15.12
0.9	115.25	32.98	6.59	15.11
1.0	117.68	36.26	6.44	14.82

表 3 细节系数设置不同权重处理结果参量

$w$	亮度 $b$	对比度 $c$	熵 $h$	梯度 $g$
1.0	106.13	21.75	7.12	14.80
1.5	109.31	30.78	7.25	22.19
2.0	112.58	39.53	6.95	29.40
2.5	115.97	47.74	6.44	36.28
3.0	119.42	55.28	5.96	42.47
3.5	122.91	62.07	5.58	47.81
4.0	126.39	68.12	5.27	52.30
4.5	129.80	73.48	5.02	55.97

表 4 实验图一各种算法处理数据结果比较

算法	亮度 $b$	对比度 $c$	熵 $h$	梯度 $g$
原图	117.69	36.31	6.44	16.35
本文算法	109.31	30.78	7.25	22.19
同态滤波	121.54	45.05	6.33	18.44
Retinex	122.07	49.54	6.25	52.51

本文给出了另一幅图的处理结果,经过分析,  $l=5$ 、 $\delta=0.5$ 、 $w=1.2$ ,参量选择时的最佳数据结果表 5,处理结果以及与同态滤波、Retinex 处理结果的比较如图 6,数据结果如表 5.可见本文算法具有明显优越性.

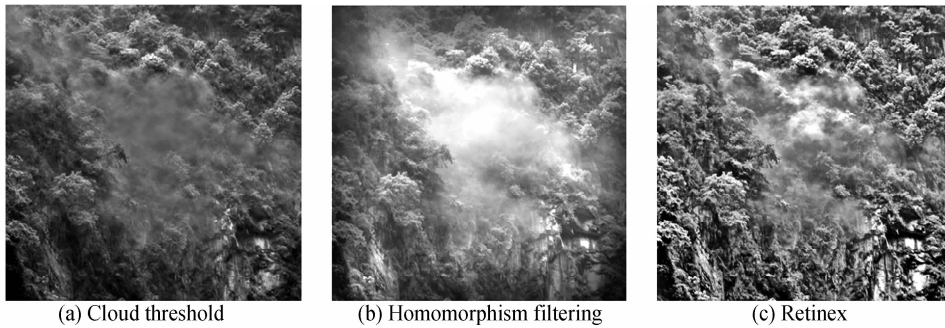


图5 实验图一云区阈值法和其他算法去云效果的比较

Fig. 5 Comparison between the algorithm of cloud threshold and other algorithms in experiment 1

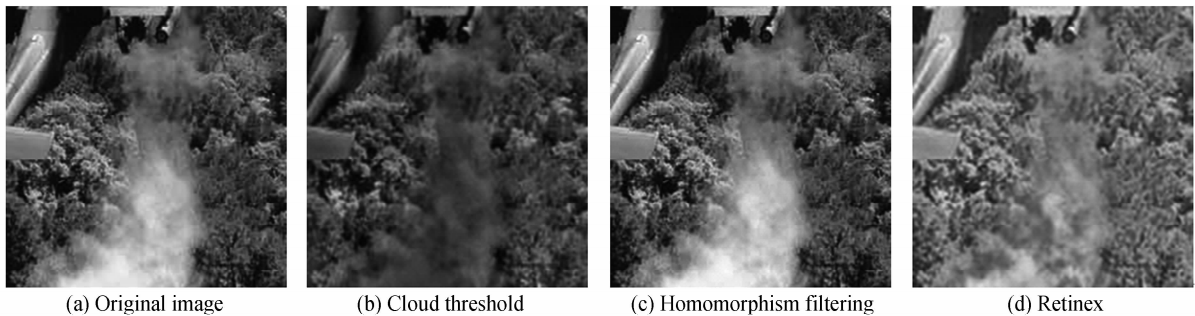


图6 实验图二各种算法处理结果比较

Fig. 6 Comparison between the algorithm of cloud threshold and other algorithms in experiment 2

表5 各种算法处理实验图二结果比较

算法	亮度 $b$	对比度 $c$	熵 $h$	梯度 $g$
原图	100.74	56.84	6.91	34.87
$l=5$	71.26	30.04	7.66	34.63
$\delta=0.5$	82.04	36.26	7.75	34.52
$w=1.2$	84.57	42.90	7.75	40.32
本文算法	84.57	42.90	7.75	40.32
同态滤波	100.74	56.77	6.94	34.90
Retinex	128.05	60.12	5.48	69.51

## 5 结论

小波变换具有多分辨率分析特点,受云覆盖影响的光学图像中景物信息频率高于云噪声。图像经过多层小波变换,选择合理的分界层数,能实现将景物信息和云噪声尽量分配到低层和高层细节系数中。以亮度阈值分割高层细节系数中的云噪声和景物信息具有可行性,大于阈值部分为云区的思想为有效去云提供了依据。高层细节系数做阈值处理后,通过对低层、高层细节系数加权,较好地突出了景物信息,提高了处理图像的清晰度。本文提出了以熵值为合理选择分界层数、阈值、权重的依据,随参量变化,图像中有效信息变化的趋势与熵值变化一致,实验数据也证明熵判据是合理。图像处理实验验证,本文算法能显著削弱遥感光学图像中云覆盖,突出景物信息,效果明显优于同态滤波和 Retinex 算法。

### 参考文献

[1] SONG M, CIVCO D L. A knowledge-based approach for reducing cloud and shadow[J/OL]. [2007-9-12]. [http://clear.](http://clear.uconn.edu/publications/research/tech_papers/Song_Civco_ASPRS2002.pdf)

uconn.edu/publications/research/tech\_papers/Song\_Civco\_ASPRS2002.pdf.

- [2] LI M, LIEW S C, KWONG L K. Automated production of cloud-free and cloud shadow-free image mosaics from cloudy satellite imagery[C]. In *Proc of Geo-Imagery Bridging Continents*, XXth ISPRS Congress, 2004, XXXV, part B3: 754-758.
- [3] LI Gang, YANG Wu-nian, WENG Tao. A method of removing thin cloud in remote sensing image based on the homomorphic filter algorithm[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(3): 47-48.
- 李刚, 杨武年, 翁韬. 一种基于同态滤波的遥感图像薄云去除算法[J]. *测绘科学*, 2007, 32(3): 47-48.
- [4] FENG Chun, MA Jian-wen, 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方法[J]. *国土资源遥感*, 2004, 62(4): 1-5.
- [5] ZHU Xi-fang, JIANG Xing-fang, LI Feng, et al. Removing thin cloud in color remote sensing images[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(6): 698-701.
- 朱锡芳, 江兴方, 李峰, 等. 彩色遥感图像去薄云新方法[J]. *应用光学*, 2007, 28(6): 698-701.
- [6] OLEKSIY P, JUAN H S A. Fast algorithm of byte-to-byte wavelet transform for image compression application [C]. *SPIE*, 2002, 4789: 291-301.
- [7] STEVE SUH C, ANDREW K C. Wavelet-based technique for detection of mechanical chaos[C]. *SPIE*, 2000, 4056: 267-274.
- [8] 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]. *Journal of Remote*

- Sensing*, 2007, **11**(2):241-246.
- 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.
- [9] WANG Hong-nan, ZHONG Wen, WANG Jing, *et al.* Research of Measurement for Digital Image Definition[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, **9**(7):828-831.
- 王鸿南, 钟文, 汪静, 等. 图像清晰度评价方法研究[J]. 中国图象图形学报, 2004, **9**(7):828-831.
- [10] XIONG Xing-hua. Digital image quality assessment [J]. *Science of Surveying and Mapping*. 2004, **29**(1):68-71.
- 熊兴华. 数字影像质量评价方法评述[J]. 测绘科学, 2004, **29**(1):68-71.
- [11] JING Juan-juan, LÜ Qun-bo, ZHOU Jin-song, *et al.* Research on the assessment of fusion image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **31**(B06):313-317.
- 景娟娟, 吕群波, 周锦松, 等. 图像融合效果评价方法研究[J]. 光子学报, 2007, **31**(B06):313-317.
- [12] LI Qi, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai, *et al.* Digital image sharpness evaluation function [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(6):736-738.
- 李奇, 冯华君, 徐之海, 等. 数字图象清晰度评价函数研究[J]. 光子学报, 2002, **31**(6):736-738.
- [13] LIU Jia-hang, YANG Jian-feng, FANG Tao. Color property analysis of remote sensing imagery [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2):441-447.
- 柳稼航, 杨建峰, 方涛. 彩色遥感影像阴影颜色特性分析[J]. 光子学报, 2009, **38**(2):441-447.
- [14] XIANG Jing-bo, SU Xiu-qin. A pyramid transform of image denoising algorithm based on morphology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2):457-460.
- 向静波, 苏秀琴. 基于数学形态学的金字塔图像去噪[J]. 光子学报, 2009, **38**(2):457-460.

## A New Algorithm of Cloud Removing for Optical Images Based on Wavelet Threshold Theory

ZHU Xi-fang<sup>1,2</sup>, WU Feng<sup>1,3</sup>, TAO Chun-kan<sup>2</sup>

(1 School of Electronic Information & Electronic Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, Jiangsu 213002, China)

(2 School of Electronic Engineering & Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(3 Jiangsu' Key Lab of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China)

**Abstract:** Frequency relationships of wavelet coefficients describing sceneries and cloud in a single optical remote sensing image are analyzed after it is decomposed by wavelet transform. An algorithm of cloud threshold is proposed for removing cloud. Scenery information and cloud noises are distributed to coefficients of low levels and high levels respectively by choosing appropriate numbers of demarcation levels. Most of cloud noises and some scenery information are included in high level coefficients where cloud is brighter than scenery. Cloud can be removed from these coefficients and scenery information can be kept by setting a threshold with brightness. Weight factors are assigned to detail coefficients of low level, high level, and approximation coefficients respectively for enhancing the contrast of sceneries and decrease remaining cloud. The three parts of coefficients are reconstructed and fused to get processed result. Entropy is proposed to be a criterion to choose best demarcation level, weighted factor and threshold. It is proved that according to the entropy as a criterion these parameters can be chosen correctly by experiments. And the proposed algorithm is better than homomorphism filtering and Retinex algorithm.

**Key words:** Image procession; Threshold; Weighted factor; Wavelet decomposition; Entropy



**ZHU Xi-fang** was born in 1965. He received his Ph. D. degree from Nanjing University of Science & Technology. Now he is a professor at Changzhou Institute of Technology, and his research interests focus on optic electronics, applied electronics and image procession.