

# 基于不同小波变换与同态滤波结合的 CBERS-02B 卫星 CCD 图像的薄云去除

韩念龙<sup>1,2</sup>, 刘 闯<sup>1</sup>, 庄 立<sup>3</sup>, 张 巍<sup>4</sup>

1. 北京师范大学资源学院, 北京 100875
2. 深圳市房地产评估发展中心, 广东 深圳 518034
3. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875
4. 中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055

**摘要:**卫星 CCD 图像的去云处理对遥感信息的增强与提取有重要的意义,尤其是在云覆盖严重的低纬度地区。为去除 CBERS-02B 卫星 CCD 图像中薄云的影响,分别使用 Mallat 和 à trous 2 种小波变换对图像进行分解;利用同态滤波对 2 种小波分解图像的低频系数进行处理,衰减其低频信息;将处理后的小波低频系数与分解的高频系数进行小波重构,从而达到去云的目的。定量分析基于 Mallat 和 à trous 小波变换结合同态滤波法的去云结果表明,经 à trous 小波变换结合同态滤波法的去云影像所包含信息量大,细节信息丰富,去云效果较好。

**关键词:**CBERS-02B;薄云去除;小波变换;同态滤波

**中图分类号:**TP75 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5888(2012)01-0275-05

## Removing Thin Cloud by Combining Wavelet Transforms and Homomorphic Filter in the CBERS-02B Image

HAN Nian-long<sup>1,2</sup>, LIU Chuang<sup>1</sup>, ZHUANG Li<sup>3</sup>, ZHANG Wei<sup>4</sup>

1. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
2. Center for Assessment and Development of Real Estate, Shenzhen 518034, Guangdong, China
3. Department of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China
4. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, Guangdong, China

**Abstract:** It is important to remove cloud in the CCD images of satellite for enhancing and extracting remote sensing information, especially in low latitude areas. In order to remove thin cloud in the CBERS-02B CCD images, two different forms of wavelet transforms were used. Low-frequency coefficients that are decomposed by two wavelet transforms are processed by homomorphic filter separately for lowering its low-frequency information. Results is reconstructed with low-frequency coefficients and high-frequency coefficients which decomposed from Mallat and à trous wavelet transform. According to quantitative evaluation, à trous wavelet transform combining with homomorphic filter algorithm can produce good results in thin cloud removal with higher entropy and standard deviation. It also can retain a large

收稿日期:2010-04-20

基金项目:国家自然科学基金项目(70873117)

作者简介:韩念龙(1983—),男,博士研究生,主要从事基于遥感与 GIS 的自然资源研究, E-mail:nl.han@siat.ac.cn

通信作者:刘闯(1948—),女,教授,博士生导师,主要从事全球变化数据、信息及其在综合自然地理学中的应用研究, E-mail:lchuang@igsnr.ac.cn.

amount of information and rich detail information.

**Key words:** CBERS-02B; cloud removal; wavelet transforms; homomorphic filter

## 0 引言

中巴地球资源系列卫星(China-Brazil earth resources satellite, CBERS)的发射为资源调查、土地监测、农林业等领域提供了自主的数据源,在国民经济建设中发挥了重大作用<sup>[1]</sup>。但与此同时,卫星在接收地面数据的过程中,云、雾等天气因素的影响使得 CCD 影像中的目标信息被削弱,对数据使用带来极大的不便,在热带地区尤为明显。因此,研究如何有效去除云雾的影响,不仅是 CBERS 影像处理的重要环节,同时对提高遥感数据利用率具有重要意义。

前人在遥感图像的去云处理方面做了大量的研究。常用的替换法,如王惠等<sup>[2]</sup>的多项式法以及基于小波分解的融合法<sup>[3]</sup>,这类方法的局限性在于原始影像与替换影像需要具有相同的成像季节和相似的地物特征,在实际中同一地区的多幅影像数据不易获取;纓帽变换法<sup>[4]</sup>以及基于平均反射率匹配的薄云去除算法<sup>[5]</sup>,这类方法主要是针对 TM、ETM+数据特征进行处理的,在一定程度上并不适用于国产卫星数据;同态滤波法<sup>[6]</sup>在针对无参考的单幅图像去云方面效果较好,受主观干预影响较小,且适用于图像的频域处理;而小波的多分辨率特征能够很好地将图像的空域与频域转换,因此,利用小波变换结合同态滤波进行遥感图像的去云处理具备一定的优势。本文基于 2 种不同形式的小波变换 Mallat 和 à trous,结合同态滤波,进行 CBERS-02B 卫星的 CCD 影像去云处理研究。

## 1 去云原理

受云雾影响的遥感影像,因云雾和景物的频率不同,云雾主要存在于影像中的低频部分,景物信息占据相对高频<sup>[7]</sup>。由于云雾等噪声突出了图像的低频信息,削弱了图像的高频信息,因此需要通过构建适当的滤波器来将图像中的云雾滤除。小波变换的多分辨率特征能对图像进行不同分辨率下的小波分解:遥感图像经小波分解后,分解图像的高频系数包含了景物细节信息,而云、雾等信息主要集中在分解图像的低频系数中。对图像小波分解的低频系数进行同态滤波处理,衰减其低频分量,从而达到去除薄

云、薄雾的目的。经小波分解的图像高频系数与同态滤波处理后的小波低频系数进行重构,在一定程度上保证了图像的细节面貌。

### 1.1 同态滤波

薄云成像属于照射-反射模型。若  $f(x, y)$  为传感器接收到的图像信号,  $f_i(x, y)$  为云层反射率,  $f_r(x, y)$  为地物反射率,则薄云成像模型简化为

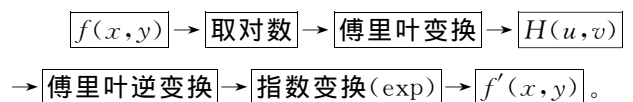
$$f(x, y) = f_i(x, y)f_r(x, y) \quad (1)$$

在空域中,薄云一般表现为范围大、缓慢变化的趋势,而在频率域上则具有低频的特征。可以视为  $f_i(x, y)$  在空间上变化缓慢,其频谱特性集中在低频段;而  $f_r(x, y)$  描述的景物(景物本身具有较多的细节和边缘)反映图像的细节内容,其频率处于高频区域。通过傅里叶变换进行空-频转换,在频率域上削弱云层反射率函数  $f_i(x, y)$  成分,同时增强地面反射率函数  $f_r(x, y)$  的频谱成分以削弱薄云的影响;这是同态滤波去云的原理<sup>[7]</sup>。通过对图像  $f(x, y)$  取对数,使  $f_i(x, y)$  和  $f_r(x, y)$  在空间域变成相加关系,利用傅里叶变换进行空域到频域的转换,在频率域中利用高通滤波器  $H(u, v)$  压缩低频段,最后转回空间域图像  $f'(x, y)$ 。

本研究的高通滤波器选择巴特沃思(Butterworth)滤波器;这是因为它无振铃效应,且使图像边缘的模糊比其他滤波器都小。滤波器具体形式为

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + [f_0/f(u, v)]^{2n}} \quad (2)$$

式中:  $f_0$  为截止频率;  $f(u, v)$  是点  $(u, v)$  到频率域原点的距离;  $n$  是滤波器阶数,一般取 2。同态滤波的处理流程为



### 1.2 不同小波变换

本文主要采用 2 种小波变换形式<sup>[8]</sup>:一种是经典的二维离散小波变换 Mallat 算法;另一种是冗余的二维离散小波变换 à trous 算法。

#### 1.2.1 Mallat 小波变换

Mallat 算法对原始图像的行列分别采用低通滤波器  $l$  和高通滤波  $h$  进行分解,滤波器的构建与小

波的尺度函数和小波函数有关。如图 1 所示,原始图像经 Mallat 小波一层分解之后,分别得到  $f_{LL}^{-1}$ 、 $f_{LH}^{-1}$ 、 $f_{HL}^{-1}$  和  $f_{HH}^{-1}$  4 部分,其中  $f_{LL}^{-1}$  是逼近图像,后三者分别是垂直方向、水平方向和斜 45° 角方向的小波面。逼近图像  $f_{LL}^{-1}$  是小波分解的低频系数,主要集中了原始影像的低频分量,而 3 个小波面对应的是原始图像的高频系数。 $\bar{l}$  和  $\bar{h}$  分别是  $l$  和  $h$  的共轭滤波器,  $\uparrow 2$  和  $\downarrow 2$  分别代表抽取和插值。

1.2.2  $\hat{a}$  trous 小波变换

由于影像分解和重建过程中分别采取抽取和插值,增大了 Mallat 算法的运算负荷,同时重构的图像出现相位失真。与 Mallat 算法不同,  $\hat{a}$  trous 算法是通过有限滤波器的内插近似,不需抽样和插值,有利于获取影像的细节特征<sup>[9]</sup>。

$\hat{a}$  trous 小波算法原理的基本思想是把原始图像分解为不同频率通道上的近似图像和每一尺度下的细节图像,细节图像称为小波面,其图像大小与原始图像尺寸相同,近似图像和小波面分别对应原始影像的低频和高频系数。

假设  $C_0(x, y)$  是原始图像,  $C_j(x, y)$  是在  $j$  尺度分解的近似图像。对原始图像  $C_0(x, y)$  连续卷积,获得一系列连续的分解图像  $C_{j+1}(x, y)$ , 小波面  $w_{j+1}(x, y)$  是图像连续近似值  $C_j(x, y)$  与  $C_{j+1}(x, y)$  的差值:

$$C_{j+1}(x, y) = C_j(x, y) * h_0, (j = 0, 1, \dots, n); \tag{3}$$

$$w_{j+1} = C_j(x, y) - C_{j+1}(x, y)。 \tag{4}$$

B3 样条函数对不规则样本数据具有很好的插值性,通常被选择作为尺度函数。B3 样条函数的二维卷积核  $h_0$  为

$$h_0 = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

则  $\hat{a}$  trous 小波重构式为

$$C_0(x, y) = C_p(x, y) + \sum_{j=1}^p w_j(x, y)。 \tag{6}$$

式中,  $C_p(x, y)$  是最后分解的图像。

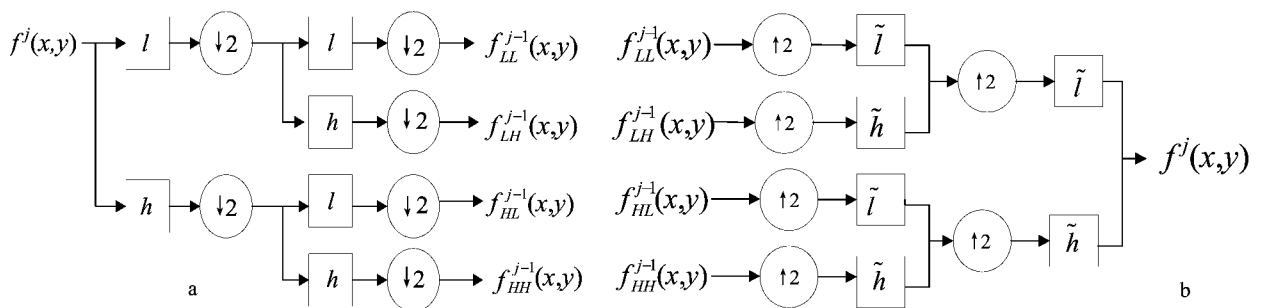
由 2 种小波的特点可看出,  $\hat{a}$  trous 算法与 Mallat 小波正交分解不同,在分解重构中没有抽取和插值的过程,具有位移不变性,减少或避免引入虚假信息。研究<sup>[10]</sup>表明,小波分解的层数越多,信息冗余度越大,导致重构的图像质量降低;因此本文对图像均采用一次小波分解。

2 去云试验及评价

用于去云实验(图 2)的 CBERS-02B 星 CCD 原始影像,大小为 400 \* 400 像元,采集时间为 2009 年 2 月。如图 2a 所示,原始影像的左上部分受薄云、雾覆盖明显。由于云在遥感影像的各波段内的分量并不是完全相同的<sup>[7,11]</sup>,而对应的 CBERS-02B 卫星 CCD 影像受云影响较为严重的是第二及第三波段,其对应的波长分别是 0.52~0.59  $\mu\text{m}$  及 0.63~0.69  $\mu\text{m}$ ;因此在去云处理的时候需要区别对待。所以试验的图像采用 432 波段合成,并只针对其中的二、三波段进行去云处理。

2.1 基于 Mallat 小波变换与同态滤波的去云处理

基于 Mallat 小波变换和同态滤波去云的过程如图 3 所示。将原始图像进行 Mallat 小波一层分



a. Mallat 小波分解; b. Mallat 小波图像重构。

图 1 Mallat 小波分解与重构过程

Fig. 1 Process of decomposition and reconstruction of Mallat wavelet

解,经分解出来的低频系数  $f_{LL}$  进行同态滤波后得到新的低频系数  $f'_{LL}$ ,将其与经 Mallat 小波分解的 3 个小波面进行重构得到去云后的影像,去云结果如图 2b 所示。

## 2.2 基于 à trous 小波变换与同态滤波的去云处理

à trous 小波分解是利用 B3 样条函数卷积所得到的近似图像  $C_j$  以及一系列小波面  $w$ 。近似图像集中了原始图像的低频成分,对近似图像同态滤波处理得到新的近似图像  $C'_j$ ,利用式(6),将新图像与分解的一系列小波面相加,实现 à trous 小波重构,从而得到去云后的影像如图 2c,去云过程如图 4 所示。

## 2.3 去云结果评价

去云实验结果如图 2 所示。从结果来看,经过 2 种方法所处理的图像达到去除薄云目的,薄云所覆盖的地物基本能够识别。

同时,利用图像的信息熵、标准差定量评价这 2

种去云方法效果(表 1)。图像的信息熵是衡量图像信息丰富程度的重要指标,图像的熵值越高则表明其所包含的信息越丰富;标准差反映了图像的细节信息,其值越大,细节越突出<sup>[12]</sup>。从表 1 得知,经 2 种方法去云后的图像其信息熵均比原始图像减少,其原因是在去云过程中,利用同态滤波对小波分解低频分量的处理导致了部分图像的信息损失;而标准差比其原始图像都有所增大,说明经 2 种小波变换的去云图像细节信息都有所增强。虽然 2 种方法都达到了一定的去云效果,但基于 à trous 小波比 Mallat 小波结合同态滤波所获取的去云图像信息熵与标准差值都略高;证明了 à trous 小波的同态滤波去云方法保留了更多的图像信息,效果更好。这是由 2 种小波变换的特性所决定的:à trous 小波在变换过程中没有抽取与插值的过程,所以比 Mallat 变换所获取的去云图像信息损失小。

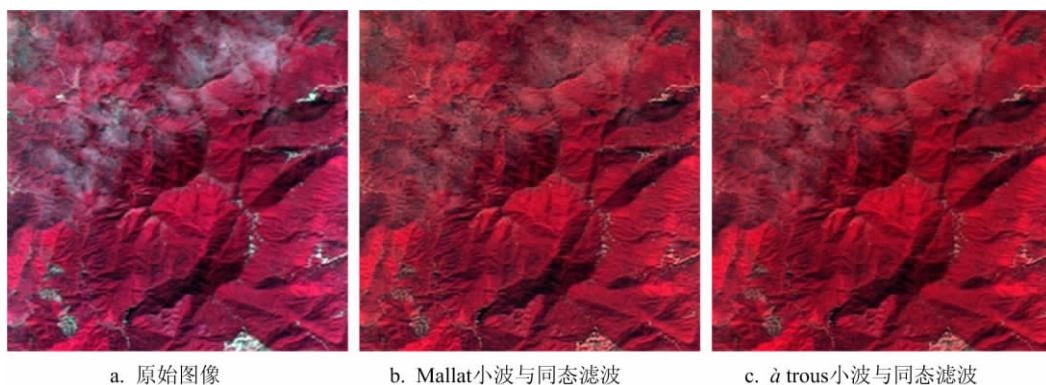


图 2 基于 2 种形式小波变换和同态滤波的 CBERS-02B 星 CCD 影像去云结果

Fig. 2 Results of cloud remove in CBERS-02 by using two forms wavelet transform and homomorphic filter

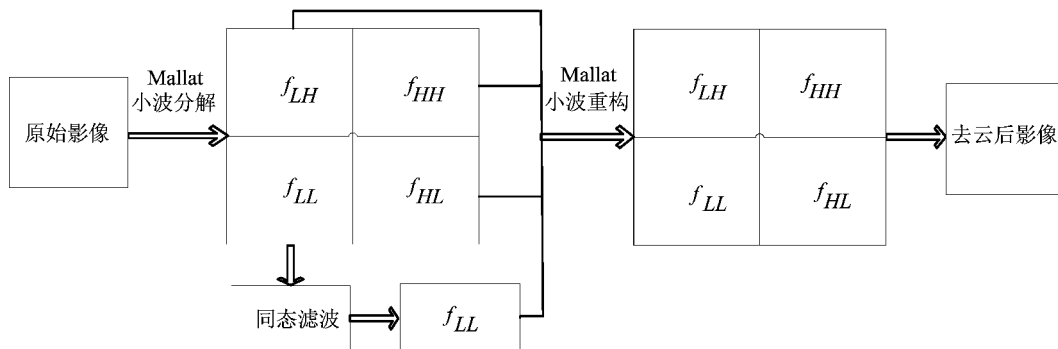


图 3 基于 Mallat 小波变换与同态滤波的去云处理流程

Fig. 3 Procedure of cloud removal using Mallat wavelet and homomorphic filter

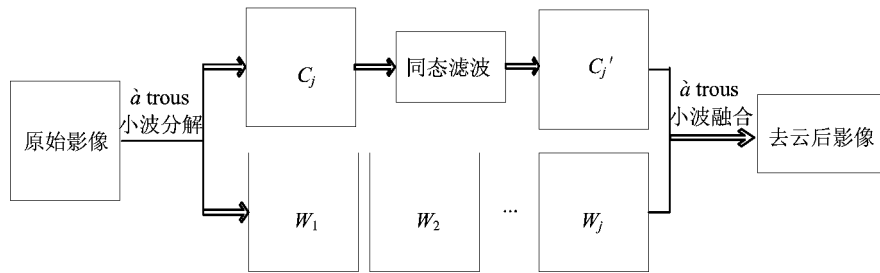


图 4 基于 à trous 小波变换与同态滤波的去云处理流程

Fig. 4 The procedure of cloud removal using à trous wavelet and homomorphic filter

表 1 去云结果评价

Table 1 Evaluation of cloud removal results

图像	熵	标准差
原始影像	7.539 7	49.292
基于 Mallat 小波与同态滤波去云影像	7.257 7	50.233
基于 à trous 小波与同态滤波去云影像	7.325 4	52.727

### 3 结论

基于小波变换的特点,利用 2 种不同变换形式的小波进行图像的分解,并与同态滤波相结合进行 CBERS-02B 星的 CCD 去云处理研究。研究表明,à trous 和 Mallat 小波变换与同态滤波结合的方法都能有效去除薄云,并能突出图像细节信息。基于 à trous 小波变换与 Mallat 小波和同态滤波结合的去云影像相比,前者包含的信息更丰富;因为 Mallat 小波在变换与分解过程中采取的抽取与插值造成了图像的信息损失。

在小波变换和同态滤波进行遥感图像薄云去除的过程中,对遥感图像中的其他地物信息会有一定程度的损失,体现在图像信息熵减少,因而进一步研究需要考虑对这些图像的损失信息进行补偿。另外,可根据云在影像中具有局部能量大、灰度均值高和方差小的特点,针对小波分解的低频图像中的云、雾等噪声单独处理,以获取更好的去云效果和减少影像中非云区域的信息损失。

#### 参考文献 (References):

[1] Ma J W, Gu X F, Feng C, et al. Study of Thin Cloud Removal Method for CBERS-02 Image[J]. Science in China: Series E, 2005, 48(Sup. 1): 91-99.

[2] 王惠,谭兵,沈志云. 多源遥感影像的去云层处理[J]. 测绘学院学报, 2001, 18(3): 195-198.  
Wang Hui, Tan Bing, Shen Zhi-yun. The Processing Technology of Removing Clouds Image Based on the Multi-Resource RS Image[J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2001, 18(3): 195-198.

[3] 张明源,王宏力,陈国栋. 基于小波分析的多源图像融合去云技术研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(11): 19-21.  
Zhang Ming-yuan, Wang Hong-li, Chen Guo-dong. Research on Cloud Removing of Multi-Source Image Fusion Based on Wavelet Analysis[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(11): 19-21.

[4] Richter R. A Spatially Adaptive Fast Atmospheric Correction Algorithm [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(6): 1201-1214.

[5] Liang S L, Fang H L, Chen M Z. Atmospheric Correction of Landsat ETM+ Land Surface Imagery: Part I: Methods [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(11): 2490-2498.

[6] 沈文水,周新志. 基于同态滤波的遥感薄云去除算法[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(1): 45-49.  
Shen Wen-shui, Zhou Xin-zhi. Algorithm for Removing Thin Cloud from Remote Sensing Digital Images Based on Homomorphic Filtering [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(1): 45-49.

[7] 赵忠明,朱重光. 遥感图像中薄云的去除方法[J]. 环境遥感, 1996, 11(2): 195-199.  
Zhao Zhong-ming, Zhu Chong-guang. Approach to Removing Cloud Cover from Satellite Imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 11(2): 195-199.

(下转 288 页)

and Prospecting, 2002, 38(3):49-51.

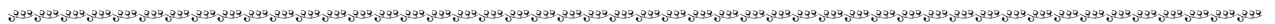
[19] 陈文成. 基于因子分析的区域经济不平衡发展研究[J]. 数理统计与管理, 2010, 29(3):490-501.  
Chen Wen-cheng. Region Economy Unbalanced Development Research Based on Factor Analysis[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2010, 29(3):490-501.

[20] 叶水盛, 袁鑫. 地学综合信息图库管理系统的进一步开发应用[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2010, 40(3): 726-732.  
Ye Shui-sheng, Yuan Xin. Further Development and Application of Geosciences Synthetic Information Maps Database Management System[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(3): 726-732.

[21] 李颖, 杨永强, 范云芳. 阿尔泰成矿区金矿预测图形库及属性库的建立方法[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(3):293-295.  
Li Ying, Yang Yong-qiang, Fan Yun-fang. Establishment Method of Database of Diagram and Attribute of Gold Ore Predictive for Metallogenic Region of Aertai, Xinjiang, China[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2000, 30(3): 293-295.

[22] 迟宝明, 李治军, 叶勇, 等. 基于 GIS 的地下水水位等值线图自动生成算法研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37(2):261-265.  
Chi Bao-ming, Li Zhi-jun, Ye Yong, et al. Study on the Arithmetic of Automatically Drawing Isoline of Groundwater Level Based on GIS[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(2): 261-265.

[23] 吴信才. 数据中心集成开发技术:新一代 GIS 架构技术与开发模式[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2009, 34(3):540-546.  
Wu Xin-cai. Datacenter Integration Development Technology: the Next Generation GIS Architecture and Development Model[J]. Earth Science:Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(3): 540-546.



(上接 279 页)

[8] Shensa M J. The Discrete Wavelet Transform: Weaving the À Trouis and Mallat Algorithms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(10): 2464-2482.

[9] 王倩, 刘洋, 贾永红. 一种改进的 Àtrous 小波融合方法[J]. 测绘通报, 2009(8):10-12.  
Wang Qian, Liu Yang, Jia Yong-hong. An Improved Method of ÀTrous Wavelet Fusion[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2009(8):10-12.

[10] 王恒进. 基于小波的遥感图像薄云去除的研究与实现[D]. 西安:西北工业大学, 2002.  
Wang Heng-jin. The Research and Implementation on Thin Cloud Removal of Remote Sensing Image Based on Wavelet[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.

[11] 李月臣, 陈晋, 刘春霞, 等. 一种除去遥感影像薄云雾的方法[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2006, 33(1):58-63.  
Li Yue-chen, Chen Jin, Liu Chun-xia, et al. An Effective Approach to Remove Cloud-Fog Cover and Enhance Remote Sensing Imagery[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2006, 33(1):58-63.

[12] 杨长保, 丁继红. 面向对象的遥感图像分类方法研究[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2006, 36(4):642-646.  
Yang Chang-bao, Ding Ji-hong. Study of Object-Oriented Based Remote Sensing Image Classification[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(4):642-646.