

# 基于小波变换的高分辨率快鸟遥感图像薄云去除

张波<sup>②</sup>, 季民河<sup>①, ②</sup>, 沈琪<sup>③</sup>

(<sup>①</sup> 广西科学院广西-东盟海洋科学研究中心, 南宁 530007;

<sup>②</sup> 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062;

<sup>③</sup> 华东理工大学商学院, 上海 200237)

**摘要:** 薄云污染会影响遥感图像的正常判读和解译。传统去云方法对图像做傅里叶变换, 对转为频率域后的图像进行同态高通滤波的整体处理, 因而会在去云的同时对无云区域及图像边缘产生较大影响。本文利用小波变换将图像分解为若干频率特征不同的分量, 仅仅针对表示薄云的低频近似分量进行同态滤波, 最后通过小波重构得到去除薄云的图像。试验结果表明, 小波变换使具有高频细节的地物信息免受滤波处理, 但连续变化的低频地物信息仍会受到一定影响。

**关键词:** 遥感图像处理; 去云; 同态滤波; 小波变换; QuickBird

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.03.007

**中图分类号:** TP751    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-3177(2011)115-0038-06

## Wavelet-based Cloud Removal from High-resolution Remote Sensing Data: An Experiment with QuickBird Imagery

ZHANG Bo<sup>②</sup>, JI Min he<sup>①, ②</sup>, SHEN Qi<sup>③</sup>

(<sup>①</sup> Guangxi-ASEAN Marine Science Research Center, Guangxi Academy of Science, Nanning 530007;

<sup>②</sup> Key Lab of GIS Science, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062;

<sup>③</sup> School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

**Abstract:** Thin cloud is considered annoying contamination on remote sensing imagery, as it can seriously affect the image analysis. Cloud removal is commonly performed with a homomorphic filter (e.g. the butter worth or exponential filter) applied to the fourier transformed frequency image. One drawback of the method is that it is unable to separate the low-frequency component from the high frequency in the filtering process, thus leading to information loss in the non-cloud region. This paper presents a homomorphic filtering based on wavelet transformation for cloud removal, which can avoid the above drawback. This procedure decomposes an image into low-frequency and high-frequency components, and then employs a high pass filter to process the low-frequency (cloud) component. The filtered image is finally recovered from all the other components with this processed one through wavelet reconstruction. Test evaluations indicated that the filtered image resulting from the wavelet-based approach performed better than the image from the conventional fourier transformation in terms of changes in the mean, standard deviation, and entropy of image brightness values.

**Key words:** cloud removal; homomorphic filtering; fourier transform; wavelet transform; QuickBird

收稿日期: 2010-04-22    修订日期: 2010-05-26

基金项目: 广西科学基金(桂科回0639007)。

作者简介: 张波(1985~), 男, 硕士研究生, 专业方向为遥感图像处理及应用。

**E mail:** zhangbo123-abc@163.com

## 1 引言

TM/ETM+、SPOT、QuickBird 和 IKONOS 等中高分辨率图像因其精度高、成本适宜、几何性质稳定等特性<sup>[1-2]</sup>,被广泛应用在地学、资源环境、农林工矿、城市与区域规划等领域。然而,以可见光和近红外为主的光学遥感系统中,传感器记录的地物反射和辐射能量强度与光谱组成会明显受到大气中薄云薄雾的影响<sup>[3]</sup>,而造成遥感图像判读解译的不便。我国长江以南大部地区常年多云多雨,极大限制了遥感技术的应用,为保障遥感数据的有效性与可用性,采用适当的方法消除薄云的影响显得非常必要。

总结先前的研究,有下面 4 种遥感图像薄云去除思路:①基于单幅或单波段图像的去云处理<sup>[1,4-5]</sup>。即利用图像本身在空间域及频率域的特征进行处理,同态滤波方法是常用的一种处理方法。其原理简单、操作方便,不足之处是对图像进行了整体运算,会造成不必要的信息丢失。②基于多光谱信息的遥感图像薄云去除<sup>[1,4]</sup>。方法之一是采用对云比较敏感的传感器,专门探测云的信息,然后进行图像相减,达到去云目的;另一种方法是利用多光谱图像中各波段对云的敏感性差异进行图像运算与处理,得到去云结果。该方法可以有效消除薄云影响而不带来其他副作用,但前提条件较高,在许多应用场合会受到限制。③基于同一传感器不同时相多幅图像叠加运算的去云方法<sup>[1,4,6]</sup>,又称“时间平均法”,即依据同一地区不同时间云的分布不同,将不同时间获取的图像进行叠加运算进行去云处理,其要求参与运算的多幅图像所拍摄的区域在拍摄时期变化不大。但云区重叠问题带来的参与运算的图像数目不确定是导致计算机自动去云不能实现的主要原因,也是该方法的主要瓶颈所在。④基于多源数据的融合方法去云<sup>[1,4,7-8]</sup>,即利用不同传感器获取的多源图像数据,通过数据融合消除薄云对图像的影响。但利用该方法去云首先要解决云覆盖区域多传感器的配准,以及可能存在的辐射差异的处理。现代微波遥感采用的波长范围为 1mm~100cm,可以穿透云层和大气降水,测定云下目标地物发射的辐射<sup>[9]</sup>,能够弥补传统遥感方式易受云雾干扰的不足。

本文针对单幅/单波段遥感影像引入基于小波变换的同态滤波方法进行去云处理。该方法理论上能有效避免对高频信息的影响,可望保留无云区的图像细节信息。

## 2 薄云去除处理方法

### 2.1 薄云图像成像模型

从遥感物理的角度,云属于大气气溶胶范畴,尺度范围在  $10^{-3}\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$  之间,由液态水离子或固态离子组成,沉降速度小,在大气中有一定的稳定性<sup>[4]</sup>。在忽略系统噪声的前提下,薄云对图像的影响实际是云雾粒子对光的散射造成的图像模糊,是类似于高斯噪声的乘性噪声<sup>[10]</sup>。

有薄云覆盖时,遥感卫星传感器获取的图像像元值由太阳光经云层反射部分和太阳光经地面景物反射后穿过云层的部分组成。地物信息部分透过云层被传感器接收,图像上的薄云是叠合了地物信息之后的信息。如何有效分离云层信息和地物信息是去云处理的切入点,也是难点所在。

遥感图像去云处理中,图像光谱特征和空间特征是两个常用特征<sup>[5,11]</sup>。薄云区色调过渡均匀缓和,纹理结构比地物简单,在频率域表现为在低频信息。因此,去云处理可针对图像中的高亮区域和图像低频部分进行提取、抑制、去除。

### 2.2 同态滤波方法

同态滤波是以图像的照度/反射率模型为频率域处理的基础,把频率过滤和灰度变换结合起来的一种图像处理方法,通过压缩图像亮度范围和增强对比度改善图像的质量<sup>[12]</sup>。

傅里叶变换将图像的灰度分布函数变换为频率分布函数,把图像从空间域转换到频率域。频率域中的高频信息反映空间域灰度变化剧烈的信息,低频信息代表空间域灰度变化缓慢的部分。依据这一对应关系,同态滤波处理可以对滤波函数做相应设定,使低频成分的增益系数小于 1,而高频成分的增益系数大于 1,从而抑制低频信息,增强高频信息,提高图像的对比度。

同态滤波的效果取决于滤波器的选择。典型的滤波器有:理想滤波器、ButterWorth 高通滤波器和指数高通滤波器。理想滤波器容易产生振铃效应,ButterWorth 滤波器和指数滤波器在高、低频过度处较光滑,用其处理过的图像不会有明显的振铃现象<sup>[12]</sup>。

指数滤波器的形式为:

$$H(u, v) = e^{-\left(\frac{D_0}{D(u, v)}\right)^n} \quad (1)$$

先前很多研究多采用 ButterWorth 滤波器进行实验,其形式如下式所示:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + k \times \left\{ \frac{D_0}{D(u, v)} \right\}^{2n}} \quad (2)$$

其中:  $D_0$  为截止频率,  $D(u, v)$  是点  $(u, v)$  距离频率矩形原点的距离。当  $D(u, v) = D_0$  时,  $H(u, v) = \sqrt{2}/2$ , 即  $k = 0.414$ ,  $n$  为滤波器的阶数。实验中采用上述这两种滤波器进行去云处理和分析。

同态滤波法对傅里叶变换后的图像实施处理, 因为变换后图像具有较高频率分辨率和较低空间分辨率, 滤波可对光照不均匀进行修正。但该方法对整幅图像进行处理, 忽略了图像空间局部特性, 去云的同时会牺牲部分无云区地物信息。如果能把小波分析的“时-频”特性与同态滤波相结合进行去云处理, 即可兼顾空间域图像的局部特性及频率域薄云的低频特性, 使处理后图像不仅局部对比度明显增强, 而且可以较好地保持图像的原始面貌<sup>[1]</sup>。这是本文引入小波分析的理论基础。

### 2.3 小波变换理论

小波分析是在小波变换的基础上, 将任一平方函数或能量有限的信号通过多分辨率分析表示成小波系数的叠加<sup>[5]</sup>。它是继傅立叶分析之后的一种行之有效的“时-频”分析方法, 具有时频局部化和多分辨率的特性<sup>[12~13]</sup>。即与傅里叶变换相比, 小波变换能够兼顾信号在空间域及频率域的局部特征, 通过伸缩平移运算对信号逐步进行多尺度细化, 最终达到高频处时间细分, 低频处频率细分, 能自动适应时频信号分析的要求, 从而可以聚焦任意细节。

图像属于二维离散信号, 将 Mallat 算法<sup>[12]</sup>思想扩展到二维空间, 用一组低通滤波器和高通滤波器分别对图像的行与列先后进行滤波卷积, 然后进行二取一的下抽样。这样经过一次小波变换的结果是将图像分解为一个低频子带和水平、垂直、对角线三个方向的高频子带, 各子带分辨率为原始图像的  $1/2$ , 频率范围也各不相同。多层小波分解是在上一层分解的基础上, 只针对低频子带 LL 进行。结果是将 LL 子带进一步分解为新的  $LL_1$ 、 $HL_1$ 、 $LH_1$ 、 $HH_1$  四部分。如图 1 所示。

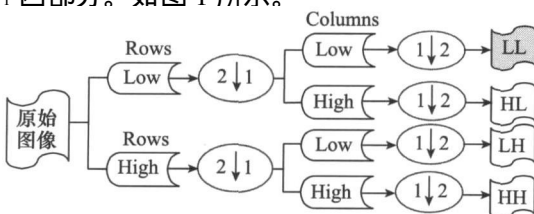


图 1 一次二维小波分解示意图

### 2.4 基于小波变换的去云处理思想

基于小波变换的遥感图像薄云去除的基本思路是, 先将原始图像通过小波处理分解为不同频率与方向特征子图像, 使薄云信息与地物信息相分离, 然后对由薄云信息占据的子图像进行针对性处理。

小波分解的层数视实验数据而定, 一般 2 层小波分解即可得到明显效果<sup>[1]</sup>。基于小波分解的同态滤波处理的一般过程如图 2<sup>[13]</sup>:

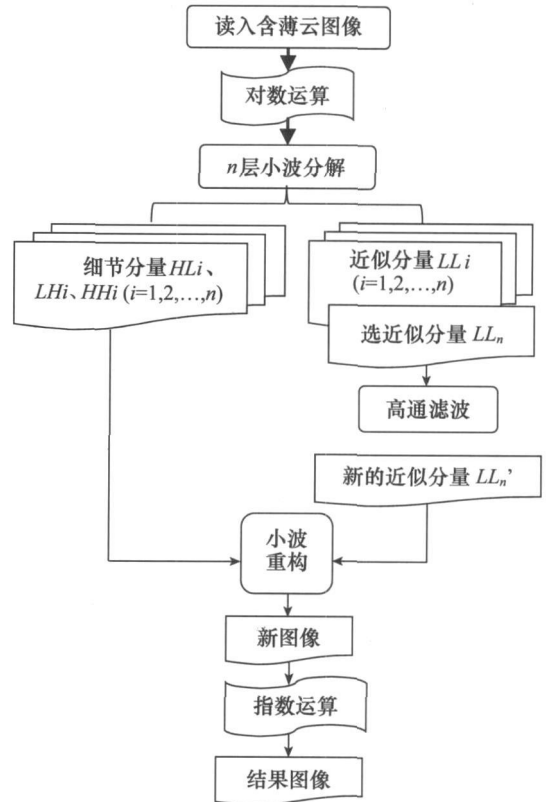


图 2 基于小波变换的去云处理流程

## 3 薄云去除实验

### 3.1 研究区域与实验数据

实验研究区域为广西西南的北仑河口(图 3), 大致范围为东经  $107^{\circ}51' \sim 108^{\circ}12'$ , 北纬  $21^{\circ}25' \sim 21^{\circ}40'$ 。是中越两国的国界河口, 河口以北为我国广西东兴市, 西面为越南海宁省, 东南则是开阔的北部湾海域。研究区地处北回归线以南的亚热带/热带气候区, 海洋与陆地自然资源以及生态物种都非常丰富, 然而常年多云多雨天气使该地区的光学遥感应用倍受限制。

实验数据来自 DigitalGlobe 公司 QuickBird 遥感平台的高分辨率遥感图像, 获取时间为 2003 年 11 月 3 日, 包含蓝、绿、红、近红外 4 个波段及一个全色波段, 多光谱数据空间分辨率为  $2.44\text{m}$ , 全色波

段的空间分辨率为 0.63m。图像左下角有薄云覆盖,水面情况模糊,无法辨识(图 3)。由于可见光波段越短越易受大气影响,本文选对薄云最敏感的多光谱蓝波段图像为实验对象。所选靶区为图像的一部分,包括无云区的水域和陆地以及部分薄云覆盖的水域(见图 5)。并截取部分陆地信息作为参照,用以验证本实验对无云区域信息的影响(见图 4)。

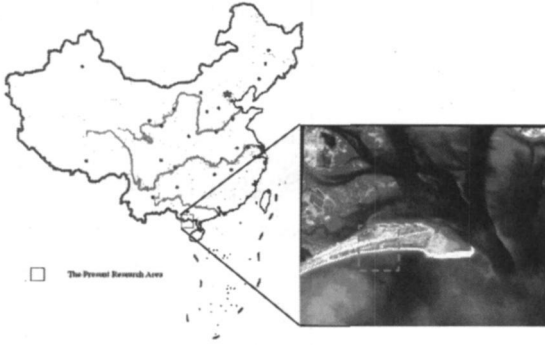


图 3 实验研究区域与假彩色(RGB= 432)遥感图像

### 3.2 实验及结果分析

实验以 Matlab 为主要平台,结合使用遥感图像处理软件 ENVI,选用 Davbechies 小波函数,进行基于 2 层小波变换的遥感图像薄云去除处理。滤波器的阶数选择为  $n=3$ ,截止频率通过试验获取。实验中首先对无云区域的参照图像进行处理,以检验新的方法对图像中无云区域的影响。实验结果评价分为目视评价和统计指标评价分析两个方面。

统计指标评价选择以下几种参量作为评价指标<sup>[1,5,14]</sup>:

**均值:**影像所有像元的平均灰度值。去云处理后图像的亮度应低于原始图像,可据此评价去云处理有效性。

**标准差:**即为像元灰度值与图像灰度均值之差的平方和的均方根,反映图像的细节信息,用于指示去云处理后图像上的细节信息变化情况。

**熵值:**用作对信息量的测度。图像异质性越大,熵值就越高,表明图像的信息含量越高。可以期望通过去云处理后的图像熵值会有所提升。

上述 3 种指标用以对文中所述方法对无云区的影响程度量化评估,旨在筛选下一步去云处理的合理方法。此外还使用 2 个指标对去云结果的有效性进行评价验证。一个是光谱偏差:即处理后图像与原始图像的光谱差异,值越小,差异越小。另一个是图像间相关系数:表征经过处理的图像与原始图像的相关性,可反映对图像整体特征的

保留程度。

以下简称基于傅里叶变换的同态滤波方法为方法一,基于小波变换的同态滤波方法为方法二。

试验首先计算和选取两种方法滤波器的截止频率。以下是同态滤波 Butterworth 滤波器(阶数为 3)滤波试验的部分代码,可通过设定截止频率  $d_0$  为不同值,产生不同的效果。

```
n= 3;
d0= 1.3;
n1= fix( N/ 2);
n2= fix( M/ 2);
for i= 1:N
    for j= 1: M
        d= sqrt( ( i- n1)^2+ ( j- n2)^2);
        if d= = 0
            h= 1;
        else
            h= 1/ (1+ 0.414* ( d0/d)^(2* n));
        end
        result(i, j) = h* D(i, j);
    end
end
```

最后选定截止频率  $d_0= 1.3$  进行后续的试验。

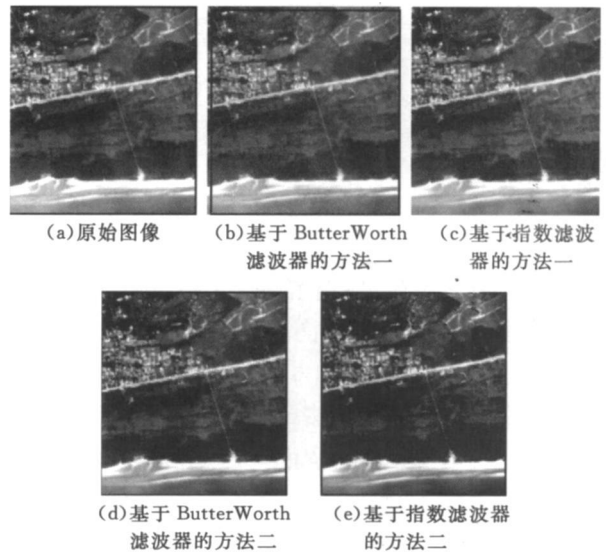


图 4 实验参照图像

图 4 是基于 Butterworth 滤波器和指数滤波器,用方法一和方法二对参照图像处理之后的效果图。可以看出,处理之后的前 3 幅图像(图 4(b)、图 4(c)、图 4(d))与原始图像(图 4(a))相比,灰度分布相差不大,即这几项处理对图像无云区的影响比较有限,能够保持原先的状态。而基于指数滤波器的方法二处理后的图像(图 4(e))明显变暗,一些地物难以辨识,说明该方法对图像的影响较大,信息丢失

明显。

表1为评价指标的计算结果,总体上两种方法处理后图像的灰度均值都有相当程度的下降(方法一下降8.7%~20.9%,方法二下降19.9%~37.3%),实验图像中陆地上有连续分布的农田与树林,这类地物分布均匀,变化缓和,相对于其他地物,其在频率域中占据低频分量,滤波处理的时候,部分信息被除去,导致图像标准差也呈现减小的现象,即图像连续分布的均匀区域会变得模糊,图像熵值减小也源于该原因。基于ButterWorth滤波器的方法二所得图像的熵值比方法一要大,即其可以保留更多原图像信息。而基于指数滤波器的两种方法所得图像熵值均比较小,说明基于指数滤波器的处理牺牲较多原图像信息。在指数滤波器的设计中,自然指数e是无限不循环的,计算机实现中的近似取值是该滤波器的强制滤波的特点及导致其滤波结果信息丢失的原因所在。由此也可以得出结论,虽然指数滤波器与ButterWorth滤波器在高低频过度处均比较平滑,但基于后者的处理方法对图像的信息保留更有效。

表1 无云区去云影响评价指标计算结果

	原始图像	方法一		方法二	
		ButterWort 滤波	指数 滤波	Butter Worth 滤波	指数 滤波
均值	80.363	73.389	63.542	64.337	50.042
标准差	6.318	5.981	5.936	6.151	6.018
熵值	6.854	6.619	6.422	6.678	6.268

指数滤波器的处理的结果信息丢失较为严重,与实验设计的初衷不相符,下一步的去云实验中将不采用该滤波器,仅用Butterworth滤波器基于傅里叶变换和小波变换的去云处理。

图5是采用ButterWorth滤波器基于方法一和方法二的去云处理结果对比图。图5(a)是原始图像,包括云层覆盖区与非云层覆盖区。图5(b)为采用ButterWorth滤波器基于方法一的处理结果,与原始图像对比可见,图像右下角部分薄云覆盖已被去除,但效果并不明显。由于方法一是对图像整体光照均匀度的一种修正,实践也表明,截止频率较大时,薄云去除较多,但信息丢失也较大;而截止频率较小时,又得不到明显去云效果,不能兼顾图像的空间域与频率域的特征。图5(c)是基于方法二的ButterWorth滤波效果,从图中可以看出,右下角的云层覆盖去除已比较明显,而且左边云层虽然没有

完全去除,但已有明显的消失。观察陆上地物,很明显基于方法二的结果更为清晰,地物对比更为明显。由此可见,从目视效果评价,方法二是优于方法一的。

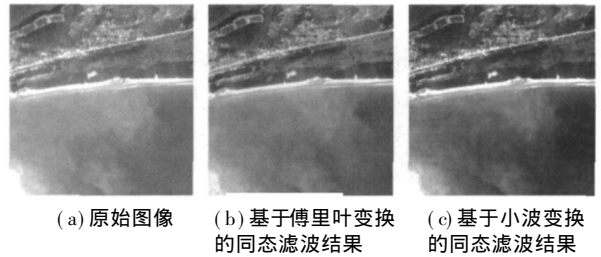


图5 实验图像

表2中的统计指标用于比较不同方法的去云效果。两种方法均使图像均值下降,表明亮度较大的薄云区域被有效处理,而方法二由于仅仅过滤低频分量,去云效果比方法一要好。与原始图像比较,两种方法处理后图像的标准差均有增大,表明薄云造成的像元高亮一般趋势被清除之后,地表细节信息被突出了。方法二中ButterWorth滤波处理所得图像的标准差大于方法一的相应处理结果,符合本文的设想。表2中的熵值在两种方法图像处理后均增大,表明薄云去除后一些地表信息变得清晰可读。而方法二所得图像的熵值比方法一所得结果要小,其原因主要是在原始图像上,地物存在面积较大、连续分布而且变化缓和的区域,在小波变换后的频率域这些区域属于低频分量中的高频信息,进行高通滤波时,难免会对这些信息产生影响。从追加的两个评价指标分析,方法二的结果图像与原始图像的光谱偏差比方法一大,说明基于方法二的去云处理比方法一更有效,能去除较多的薄云信息,如图5(c)所示;并且,从结果图像与原始图像的相关性分析,即便方法二的结果产生较大的光谱偏差,但仍然能够保障与原始图像的高度相关,即在保留原始图像的整体特征与局部特征方面,方法二也比方法一更有效。

表2 图像去云效果评价指标计算结果

	原始图像	方法一	方法二
		ButterWorth 滤波	ButterWorth 滤波
均值	82.302	73.753	60.881
标准差	6.877	7.445	7.510
熵值	6.012	6.357	6.285
光谱偏差	×	39.334	40.385
相关系数	×	0.975	0.983

## 4 结束语

去云处理是重要的遥感图像预处理环节,傅里叶变换对空间域和频率域不能兼顾的缺陷导致以其为基础的图像处理往往会有信息丢失。而小波变换将图像分解为一系列具有不同分辨率、频率和方向特征的子带信号,可以支持在综合考虑图像空间域与频率域特征的情况下进行处理操作。综合去云效果与信息保留两方面考虑,基于小波变换的处理结果要优于传统基于傅里叶变换的同态滤波方法。尽管引入的方法得到了较好的去云效果,但是在进行

高通滤波时,滤波器截止频率的确定仍是通过人工多次试验的方式获得。因此,对滤波器仍需进一步的研究改造,以期能通过对图像特征的综合分析自动获得这个参数,使该方法更加科学、有效。同时,当地物大面积特征相近、变化不明显时,也是一种低频信息,处理过程中难免导致这类信息的丢失,所以要取得效果较好的去云结果图像,除了提高所用算法的科学性与精确性外,更重要的是应该综合利用各种方法来进行处理,可以用单波段/单幅遥感图像处理方法对薄云或云层覆盖进行识别,然后利用数据融合方法对云区像元值进行恢复。

## 参考文献

- [1] 曹爽. 高分辨率遥感影像去云方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [2] 贺辉, 彭望球, 匡锦瑜. 自适应滤波的高分辨率遥感图像薄云去除算法[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(3): 305-311.
- [3] Lillesand, Thomas, M. Kiefer, Ralph W. . 遥感与图像解译[M]. 彭望球, 徐先川, 周涛, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] 刘洋, 白俊武. 遥感图像中薄云的去除方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2008(313): 120-122, 125.
- [5] 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.
- [6] 汪兴方. 遥感图像去云方法的研究及其应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [7] Tseng DC, Tseng HT, Chien CL. Automatic cloud removal from multi temporal SPOT images [J]. Applied Mathematics and Computation, 2008(205): 584-600.
- [8] Cihlar J., Howarth J. Detection removal of cloud contamination from AVHRR images [J]. IEEE. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(3): 583-589.
- [9] 梅安新, 彭望球, 秦其明, 刘慧平. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [10] 曾好德, 张韧. 基于小波分解的薄云薄雾图像的恢复与增强[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(1): 76-80.
- [11] 周春艳, 王萍, 郑学芬. 基于 MATLAB 的遥感图像薄云去除 [J]. 西部探矿工程, 2006(S1): 224-225, 227.
- [12] 张汗灵. MATLAB 在图像处理中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [13] 陈武凡. 小波分析及其在图像处理中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [14] 张金泉, 杨进华, 卢珊. 基于同态滤波的图像去烟雾方法研究[J]. 机械与电子, 2009(7).

(上接第8页)

## 参考文献

- [1] 向彪. 卫星地面预处理系统控制单元设计与控制技术研究[D]. 北京: 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 2008. 6
- [2] James W. Cutler, Christopher A. Kitts Mercury. A satellite ground station control system [C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, 2004.
- [3] 李闯, 吴秀清. 基于先验知识的小目标快速随机识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2003(12).
- [4] 唐丹, 金海, 张永坤. 集群动态负载均衡系统性能的评价[J]. 计算机学报, 2004, 27(6): 80-81.
- [5] QI Zhaohui, SUN Jizhou, LI Xiaotu. A fuzzy congestion control algorithm based on queue [J]. Journal of Software, 2005, 16(2): 286-294.
- [6] 赵宗弟, 胡凯, 胡建平. 基于 OpenPBS 的集群作业调度策略的设计与实现[J]. 计算机与数字工程, 2006, 34(11).
- [7] 林闯. Web 服务器机群请求分配和选择的性能分析[J]. 计算机学报, 2000, 23(5): 500-508.
- [8] David B. Jackson, Heather L. Jackson, Quinn O. Snell. Simulation based HPC workload analysis [J]. IEEE, 2001.
- [9] Xiao Qin. Performance comparisons of load balancing algorithms for I/O intensive workloads on clusters [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2008, 31(1): 32-46.
- [10] Qin X, Jiang H. Improving effective bandwidth of networks on clusters using load balancing for communication intensive applications [C]//Proceedings of the 24th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference. 2005: 27-34.