

文章编号: 1007-4619(2007)02-0201-08

基于局部标准差的遥感图像噪声评估方法研究

高连如, 张 兵, 张 霞, 申 茜

(中国科学院 遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 局部均值与局部标准差法是目前应用最广泛的遥感图像噪声评估方法之一。该方法利用了局部均值与局部标准差的概念, 对含有加性噪声的遥感图像进行噪声评估。但该方法受地物覆盖类型影响很大, 当遥感图像中地物覆盖复杂时, 会得到异常的噪声估算结果。产生这一现象的主要原因是遥感图像中包含边缘和纹理的不均匀子块。为降低地物覆盖复杂性对算法的影响, 本文提出了基于边缘块剔出的局部均值与局部标准差法和基于高斯波形提取的局部均值与局部标准差法, 前一种方法是削弱图像中包含边缘的不均匀子块的影响, 后一种方法是提取反映均匀子块数量特征的高斯波形。利用同一次航空试验中获取的两幅 AVIRIS 辐射图像对改进后的算法进行了检验, 结果表明改进后算法的健壮性明显提高, 且噪声估算结果更准确。

关键词: 噪声; 标准差; 边缘提取; 高斯分布

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

Study on the Method for Estimating the Noise in Remote Sensing Images Based on Local Standard Deviations

GAO Lian-ru, ZHANG Bing, ZHANG Xia, SHEN Qian

(State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Local Means and Local Standard Deviations method (LMLSD) is one of the most widely used methods for estimating the noise in remote sensing images. It employs local means and local standard deviations of small imaging blocks and can be used to evaluate images with additive noises. But this method is badly affected by land cover types when the land cover types of the images vary greatly, estimation of noise can be invalid due to the effects of the heterogeneous blocks containing edges and texture features. In order to reduce the sensibility of LMLSD to land cover complexity, two improved methods were designed: one is to reduce the affection of the heterogeneous blocks, and the other is to pick up the Gaussian distribution that shows the characteristics of the heterogeneous blocks. We validated the two methods with two AVIRIS radiance images acquired in the same aerial experiment. In the validation, the improved methods show distinctly enhanced robustness compared to the common LMLSD, and the estimation of the noise is proved to be more accurate.

Key words: noise; standard deviation; edge detection; gaussian distribution

1 引 言

信噪比是衡量遥感器性能的重要指标之一^[1], 对于遥感数据的应用 also 具有重要的意义。遥感图像

的噪声主要由电噪声和光学噪声组成, 电噪声泛指辐射噪声、热噪声、散粒噪声、转移噪声等; 光学噪声特指因结构引起的空间随机不均匀性噪声。在遥感数据获取过程中, 噪声的产生及其对图像质量的影响复杂多变, 通过量化各个子系统的噪声来对整个

收稿日期: 2006-03-06; 修订日期: 2006-04-06

基金项目: 中科院知识创新工程重要方向项目 (编号: KZCX1-SW-350)

作者简介: 高连如 (1979—), 男, 2002 年毕业于清华大学土木系, 获学士学位, 现在中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室攻读博士学位, 主要从事遥感图像处理、光谱特征分析、目标探测与识别方面的研究工作, 已发表论文 6 篇。E-mail: lgauss@163.com。

成像系统的噪声进行评估不易实现,因此人们往往采用一个简单的模型来描述系统获取图像中的噪声,通过对图像的噪声进行评估来确定整个系统的信噪比。在光学遥感中,图像噪声主要由周期性(系统)噪声和随机噪声构成,其中周期性噪声可以由频域变换滤波有效地消除,而随机噪声的影响一直存在,这种随机噪声一般认为是加性噪声^[2]。加性噪声是指由发生源产生并叠加在图像上且与图像信号无关的噪声,用模型表示为:

$$z(i,j)=s(i,j)+n(i,j) \tag{1}$$

式中, $z(i,j)$ 为包含噪声的图像, $s(i,j)$ 为图像信号, $n(i,j)$ 为图像噪声。通常采用高斯白噪声对这种加性噪声进行模拟,其概率密度函数为:

$$f_z(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n}e^{-x^2/2\sigma_n^2} \tag{2}$$

式中, σ_n 为噪声的标准差。高斯白噪声含有所有频率成分且振幅频谱恒定,又具有高斯分布的性质,是最具有代表性的噪声模型。在遥感图像信噪比估算过程中,一般用图像各波段的均值作为信号,因此本文仅考虑对高斯白噪声的估计。

遥感图像噪声评估主要有三种方法:试验室法、暗电流法和图像法^[3]。试验室法是通过计算一个均匀亮目标图像的标准差来获取图像的噪声,而暗电流法则通过分析信号暗电流的变化来对图像噪声进行估算,这两种方法都需要试验支持,且在遥感数据实际应用过程中很难实现。图像法是通过遥感图像进行分析估算噪声的方法,由于其简单实用,得到了广泛的应用。最简单的图像法是从图像中选择4个以上的均匀区域,通过计算这些均匀区域的均值和标准差获取图像的信噪比,这种方法称为均匀区域法^[3]。但这种方法存在明显的不足,首先需要人工进行均匀区域选择,很难做到自动化,同时满足要求的均匀区域在大部分遥感图像中并不存在,而且图像子区域噪声估算的结果并不能代表整幅遥感图像的噪声^[4]。Curran提出了另外一种方法,称为地学统计法^[5],要求从图像中选择几条均匀的窄条带,通过这些条带半方差函数的计算对噪声进行估算。这种方法易受条带均匀性影响,同样也很难做到自动化。为此,高伯才提出了局部均值与局部标准差法(LMLSD)^[6],该方法通过全图分析获取图像噪声,并且实现了自动化,但是噪声估算结果受地物覆盖类型影响很大。Roger提出了一种用于高光谱图像噪声评估的方法,称为空间、光谱维去相关法(SSDC)^[7],该方法利用了高光谱图像空间维和光

谱维存在高相关性的特点,通过多元线性回归去除具有高相关性的信号,利用得到的残差图像对噪声进行估算,该方法受地物覆盖类型影响小,并且可以自动执行,是目前最稳定的高光谱图像噪声评估方法^[4,8]。

本文在充分分析 LMLSD 的基础上,进行算法改进,提出了基于边缘块剔出的局部均值与局部标准差法和基于高斯波形提取的局部均值与局部标准差法,旨在降低地物覆盖类型对该方法的影响,提高算法的健壮性和噪声估算结果的准确性。

2 方 法

局部均值与局部标准差法主要基于以下假设:图像是由大量均匀的小块构成的,且图像噪声以加性噪声为主。该方法使用了局部均值和局部标准差的概念,首先将图像分割成很多小的块,在空间分辨率足够高和地物覆盖足够均匀的情况下,这些子块基本上可以认为是均匀的,相比均匀区域法而言,这在更多图像中可以满足,然后计算这些子块的标准差作为局部的噪声大小,并选择包含子块数最多区间的局部标准差的平均值作为整个图像的最佳噪声估计。具体操作步骤如下:

(1) 将图像分割成很多 $4\times4, 5\times5, \dots, 8\times8$ 的小块,计算每个子块的局部均值(LM)和局部标准差(LSD)

$$LM=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N S_i \tag{3}$$

$$LSD=\left[\frac{1}{(N-1)}\sum_{i=1}^N (S_i-LM)^2\right]^{1/2} \tag{4}$$

式中, S_i 为图像子块第 i 个像素的灰度值, N 为图像子块的像素总数。对于均匀的图像子块,局部标准差较小,而包含边缘和纹理的不均匀子块的局部标准差较大。计算出整幅图像所有子块的局部标准差,并找出其中最大和最小的局部标准差值。

(2) 在最大和最小局部标准差值之间建立若干个等间隔的区间,并按照每个子块局部标准差值的大小将其列入相应区间,将包含块数最多的那个区间局部标准差的平均值作为整幅图像的噪声值。

(3) 将图像的平均值与估算得到的噪声值之比作为整幅图像的信噪比。

为了消除步骤(2)中间隔区间划分对噪声评估结果的影响,文献[6]中提出,当图像尺寸不小于 500×500 时,在局部标准差最小值与局部标准差均值的

1.2 倍值之间划分 150 个分隔区间最合理。本文中利用 LMLSD 进行噪声评估时均采用以上参数设置。

通过对 LMLSD 的分析可以看出,当地物覆盖复杂时,包含边缘和纹理的不均匀子块增多,则子块数最多的间隔区间很可能是由包含边缘和纹理的不均匀子块组成。若采用该区间间隔的平均值作为噪声估计,评估结果就会出现异常,使得 LMLSD 估算的噪声值远大于 SSDC 的噪声估计值。本文针对 LMLSD 不适用于地类复杂图像这一不足,设计了两种改进算法。

2 1 改进算法 1——基于边缘块剔出的局部均值标准差法

基于以上分析,本文提出了基于边缘块剔出的局部标准差法。通过地物光谱特征分析可知,相同的地物具有相似的光谱特征,在遥感图像中同一波段内具有相似的灰度值。图像中的边缘是不同地物的分界线,包含边缘的子块可能包含不同的地物,不能用于噪声评估。本方法通过对图像边缘进行探测,去除包含边缘的图像子块,减小图像中不均匀子块对噪声评估的影响,从而提高 LMLSD 的健壮性。该方法实现过程如下:(1)利用边缘探测算子对图像中的边缘信息进行检测;(2)将图像划分成 4×4 的小块,除去包含边缘的子块,利用公式 (3) 和 (4) 计算其余每个子块的局部均值和局部标准差;(3)在局部标准差最小值与局部标准差均值的 1.2 倍值之间划分 150 个分隔区间,将包含块数最多的那个区间的局部标准差的平均值作为整幅图像的噪声估计值。

2 2 改进算法 2——基于高斯波形提取的局部均值标准差法

当采用 LMLSD 对地物覆盖均一的遥感图像的噪声进行评估时,在局部标准差值范围内对子块数进行统计得到的波形,理论上应是高斯分布曲线。但在实际应用过程中,当地物覆盖复杂时,经常出现整条统计结果曲线不止由一个高斯波形构成的现象,其中第一个波形代表对均匀子块数的统计结果,第二个波形代表对非均匀子块的统计结果,显然只

有第一个高斯波形对评估噪声有效。因此,当地物覆盖复杂时,在 LMLSD 方法中,包含子块数最多的区间很可能是由不均匀子块构成,评估结果并不能代表遥感图像的噪声。这里提出一种基于高斯波形提取的 LMLSD,在该方法中主要通过傅里叶变换和低通滤波器,提取统计曲线的低频波形,求第一个波形顶点对应区间的平均值作为图像噪声最佳估计。该方法实现过程如下:(1)将图像划分成 4×4 的小块,利用公式 (3) 和 (4) 计算每个子块的局部均值和局部标准差;(2)在局部标准差最小值与局部标准差均值的 1.2 倍值之间划分 150 个分隔区间,对每个区间内包含的子块数进行统计;(3)对子块数统计曲线进行傅里叶变换,在频率域利用理想低通滤波器去除高频成分,再经过傅里叶逆变换得到子块数统计曲线的低频波形;(4)再提取的低频波形中,将第一个波形顶点对应区间的平均值作为图像噪声最佳估计。

3 试验数据

本文选用了两幅 AVIRIS 辐射图像作为试验图像对两种改进的算法进行验证,其中所用图像数据类型为 16 比特整型,除以系数 500 可得到 AVIRIS 辐射数据 ($1^{\circ}\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr}$)。AVIRIS 是由美国喷气动力实验室 (JPL) 研制的覆盖 400—2500 nm 波长范围的成像光谱仪,该成像光谱仪包含 224 个波段,光谱采样间隔为 10 nm,为了运算方便,本研究只选择了其中第 6—105 波段 (423—1333 nm) 的数据作为试验图像。所选择的 two 幅试验图像为同一次航空试验中获得,如图 1 和表 1 所示,两幅试验图像各波段的均值如图 2 所示。图像获取时间为 1997 年 6 月 20 日,地点为美国 Moffett Field 地区。两幅图像地物覆盖复杂性差异很大,图 1(a) 地物以水体为主,较均一,而图 1(b) 覆盖地物以城市和山地为主,同时包含少量水体,纹理较复杂。由于两幅图像为同一次航空试验中获得,可以认为包含噪声的大小相同,通过对比两幅图像的噪声评估结果可以验证所用算法的健壮性。

表 1 AVIRIS 辐射数据详细介绍
Table 1 Detailed information of AVIRIS radiance images

编号	图像尺寸/像素	空间分辨率/m	获取时间	获取地点	地物覆盖类型
(a)	(C)1994-2025 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net				
(b)	500×500	20	06/20/1997	Moffett Field	不均匀城市、山地和均匀水体

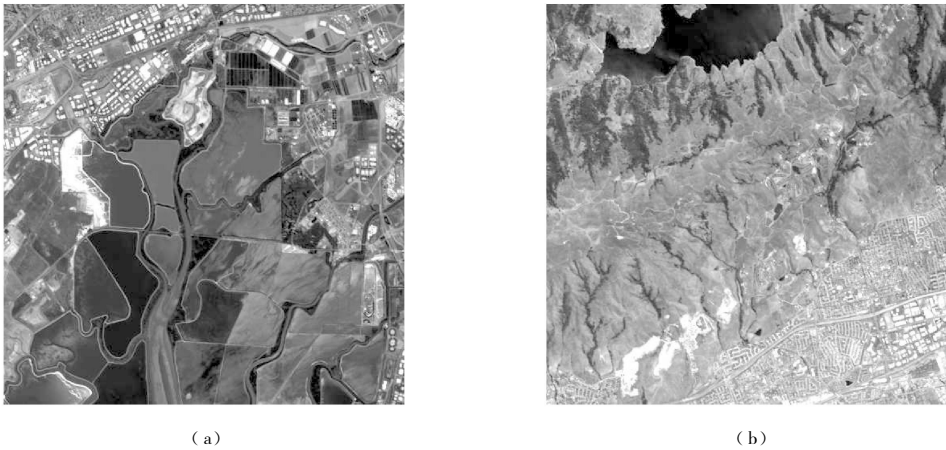


图 1 AVIRIS辐射图像(第 20 波段, 558nm)
Fig 1 AVIRIS radiance images(band 20, centered at 558nm)

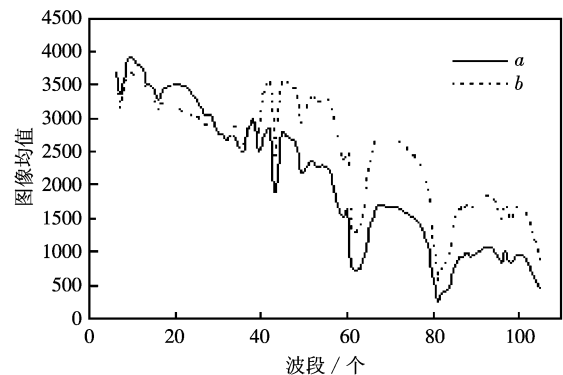


图 2 AVIRIS辐射图像均值
Fig 2 Mean values of AVIRIS radiance images

4 试验结果与分析

本文采用 LMLSD 对图 1 中两幅 AVIRIS 辐射图

像的噪声进行评估,并与 SSDC 估算的噪声进行对比,结果如图 3 所示。可以看出,对于地物覆盖均匀的图 1(a),两种方法得到了相似的结果,但是当地物覆盖不均匀时,如图 1(b),则通过 LMLSD 得到的噪声估算结果会存在很大偏差。

采用基于边缘块剔出的 LMLSD 方法,对图 1 中两幅遥感图像的噪声进行评估,并将评估结果与 SSDC 估算的噪声进行对比,其中基于边缘块剔出的 LMLSD 用“EE-LMLSD”表示。在本研究中,对多种边缘检测算子进行了对比分析,其中 Canny 算子^[9]效果最好,而且能够实现自动化,可用于本方法中对遥感图像边缘信息进行检测。图 1 中两幅 AVIRIS 影像第 6 波段的边缘检测结果如图 4 所示,可以看出,边缘检测结果很好地反映了图像的轮廓信息,且图 4(b)中地物覆盖复杂度要高于图 4(a)。边缘剔除前后 LMLSD 中参与运算的子

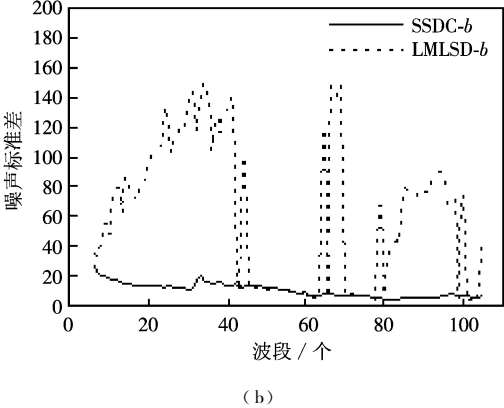
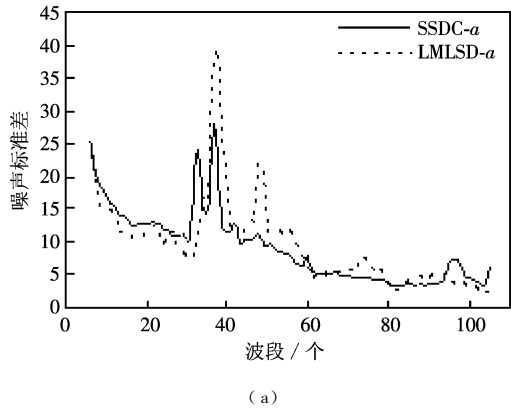


图 3 采用 LMLSD 和 SSDC 对 AVIRIS 辐射图像进行噪声评估

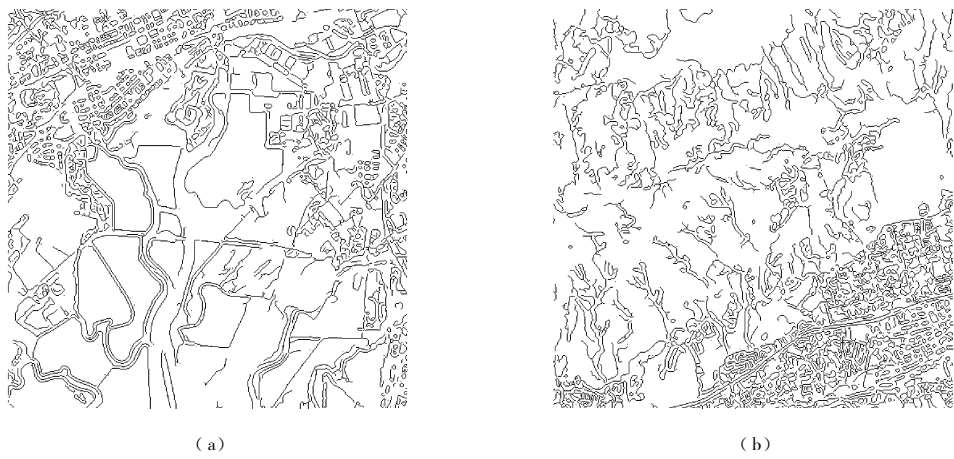


图 4 AVIRIS辐射图像第 6 波段边缘检测结果

Fig 4 Edge map from band 6 of AVIRIS radiance images

块数统计结果如表 2 所示,可以看出,两幅图中部分包含边缘的子块已经去除,而且从图 4(b)中去除子块的数量要高于图 4(a),也说明了图 4(b)中地物覆盖复杂度要高于图 4(a)。在基于边缘剔出的 LMLSD 方法中,共有超过 50% 的像素参与了遥感图像噪声评估,因此可以认为评估结果代表了整幅图像的噪声。

表 2 基于边缘块剔出的 LMLSD 中子块数统计

Table 2 Number of blocks used in LMLSD based on edge elimination

AVIRIS 图像	LMLSD 中子块数	基于边缘块剔 出的 LMLSD 中子块数	基于边缘块剔出的 LMLSD 中噪声评估 所用像素数占图像 总像素数的百分比 /%
(a)	15625	8361	53.51
(b)	15625	8068	51.64

遥感图像的信噪比对边缘检测结果会产生一定影响,从而可能影响到本方法估算的噪声结果。为了分析图像质量对该方法的影响,本文设计了一系列具有不同信噪比的模拟数据,检验结果表明,当图像中地物覆盖不是很复杂且图像信噪比大于 20:1 时,边缘检测结果对本方法噪声估算结果的影响不大;当图像信噪比很低时,如 10:1 左右,地物覆盖类型对 LMLSD 估算结果的影响很小,可以直接采用 LMLSD 对图像的噪声进行评估。

在遥感图像中,包含边缘的子块一般由不同的地物构成,其局部标准差较大,反映在散点图 5(a)上即为图中上方局部标准差较大的大云团,而均匀子块的局部标准差较小,分布在图中左下角的位置。在图 4 左下角由均匀子块所构成的云团中,代表信号的局部均值和代表噪声的局部标准差之间没有明显的相关性,说明 AVIRIS 图像的噪声主要由加性

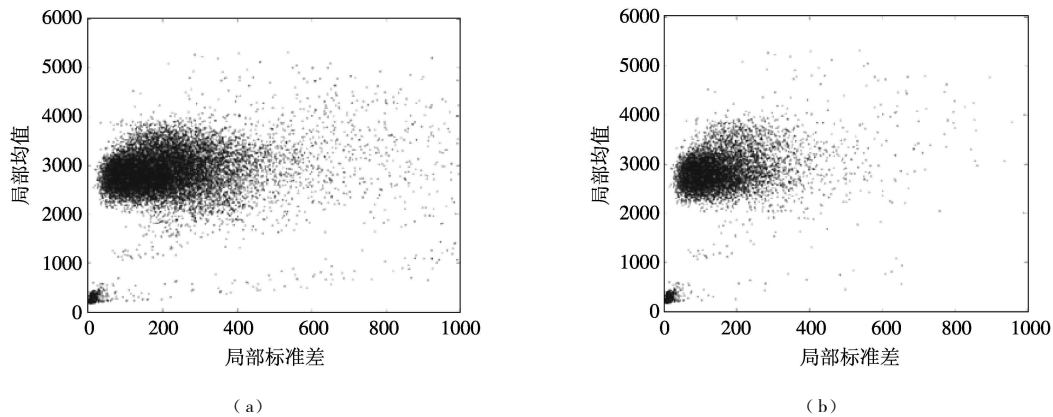


图 5 AVIRIS 辐射图像(图 1(b))第 67 波段含边缘块剔出前后局部均值与局部标准差散点图

Fig 5 Two scatter plots of local means versus local standard deviations from band 67 of AVIRIS radiance images (Figure 1 (b)) before and after blocks containing edges are removed

噪声组成,即噪声的大小与信号大小无关^[4]。在包含边缘的子块去除后(图 5(b)),不均匀子块的影响减小,反映在散点图上即为上方的云团减小,而均匀子块所构成的云团变化不大。由于不均匀子块减少,局部标准差均值减小,则进行子块数统计的局部标准差的范围也发生变化。在 LMLSD 中,局部标准差均值为 221.6,进行子块数统计的区间为 3.2—265.9;在基于边缘块剔出的 LMLSD 中,局部标准差均值均为 154,进行子块数统计的区间为 3.2—184.8。在两个不同标准差值范围内对各区间包含的子块数进行统计,结果如图 6 所示,可以看出,均匀子块数变化不大,非均匀子块的影响减小,图中左侧代表图像噪声的区间被提取出来。基于边缘块剔出的 LMLSD 正是通过对进行子块数统计的准差值的范围和非均匀子块数的控制来降低地物覆盖类型对 LMLSD 的影响。

基于边缘块剔出的 LMLSD 噪声评估结果如图 7(a)和(b)所示。可以看出,剔出边缘块的方法对地物覆盖均匀的图 1(a)影响不大,在地物覆盖不

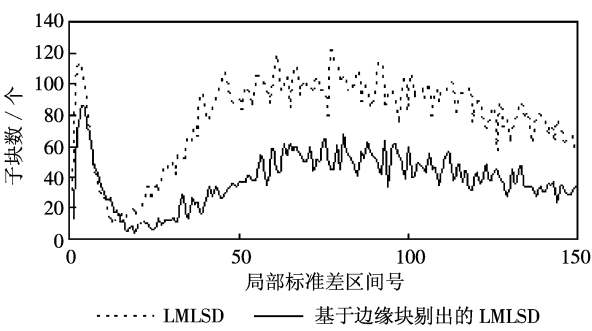


图 6 图 5 中两散点图在 150 区间内的子块数统计
Fig 6 Statistical curve of number of blocks in 150 bins from two scatter plots shown in Figure 5

均匀的图 1(b)中可以改善部分波段噪声评估的结果,但在其余波段不均匀子块的影响依然存在。这主要是由于基于边缘块剔出的 LMLSD 方法,虽然削弱了包含不同地物的不均匀子块的影响,但是很多包含同一地物不均匀子块的影响依然存在,这种影响无法消除,而在图 1(b)中均匀子块过少,因此噪声估算结果依然存在偏差。

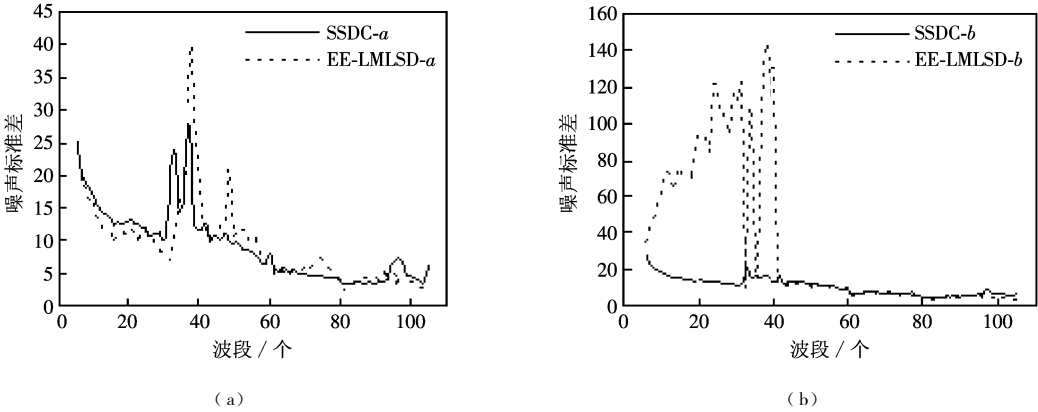


图 7 利用基于边缘块剔出的 LMLSD 对图 1 中 AVIRIS 辐射图像进行噪声评估的结果
Fig 7 Estimations of the noise for AVIRIS radiance images shown in Figure 1 via LMLSD based on LMLSD based on edges elimination

采用基于高斯波形提取的 LMLSD 方法对图 1 中两幅遥感图像的噪声进行评估,并将评估结果与 SSDC 估算的噪声进行对比,其中基于高斯波形提取的 LMLSD 用“LMLSD-FT”表示。图 5(a)的子块数统计曲线及通过本方法提取的低频波形如图 8 所示,图中箭头所指位置即为第一个波形(高斯波形)顶点的位置,也是均匀子块所构成的区间的位置,该区间的局部标准差的平均值是对该波段图像噪声的最佳估计。

基于高斯波形提取的 LMLSD 噪声评估结果如

图 9(a)和(b)所示。可以看出,通过提取高斯波形,避免了 EE-LMLSD 方法在图 1(b)噪声评估中出现的问题,噪声评估结果与 SSDC 噪声评估结果很相近。但是在采用该方法对图 1(a)的噪声进行评估时,在部分波段出现了偏差,主要是在低频波形提取时,波形顶点与均匀子块数最多的区间号偏离,但影响不大,可以作为最终噪声评估结果。

实际上,边缘块剔出方法相当于在 LMLSD 之前所作的一个预处理操作,而高斯波形提取方法相当于在 LMLSD 之后所作的一个后处理操作。在实际

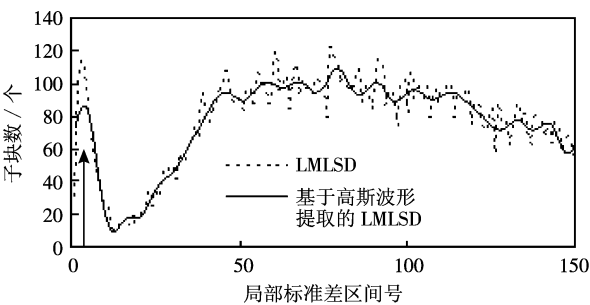


图 8 图 5(a)散点图在 150 区间内的子块数统计曲线及低频波形

Fig 8 Statistical curve of number of blocks in 150 bins from scatter plot shown in Figure 5(a) and its low-frequency wave

应用过程中,也可以将两种操作结合在一起,这时就会避免单独采用两种操作时所出现的一些问题。同时采用这两种处理方法对图像噪声进行评估,结果

显示在图 10 中,通过与 SSDC 估算的噪声值进行对比可以看出,改进后的 LMLSD 同样稳定。

从图 10 中可以发现,SSDC 对两种具有不同地物覆盖类型图像的噪声评估结果也存在很大差异,通过对同时期获取的其他 AVIRIS 数据进行分析,图 1(b)采用 SSDC 评估的噪声值合理,而图 1(a)采用 SSDC 估算的噪声值存在异常。在图 1(a)的噪声估算结果中,第 37 波段出现尖峰,且第 41 波段之后噪声估算值小于图 1(b)中评价的噪声值。这主要是由于图 1(a)中地物以水体为主,AVIRIS 第 37 波段 (692nm) 为水体的特征波段,不同类型的水体在该波段具有不同的辐射值,而 SSDC 采用了多元线性回归去除波段间相关性的方法,将这些信息作为噪声处理,因此在第 37 波段出现尖峰。由于水体在近红外和短波红外存在强吸收,所以在 AVIRIS 第 41 波段 (730nm) 之后信号比较低,而多元线性回归对地物辐射值的大小很敏感,采用 SSDC 方法对

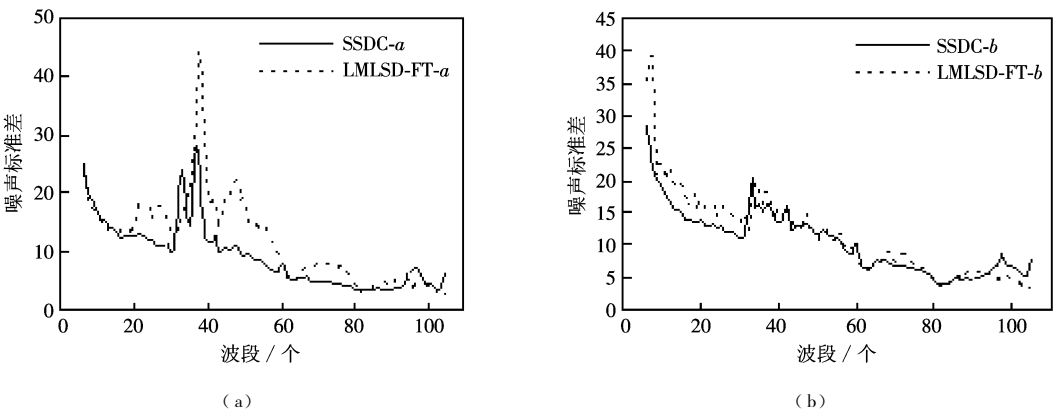
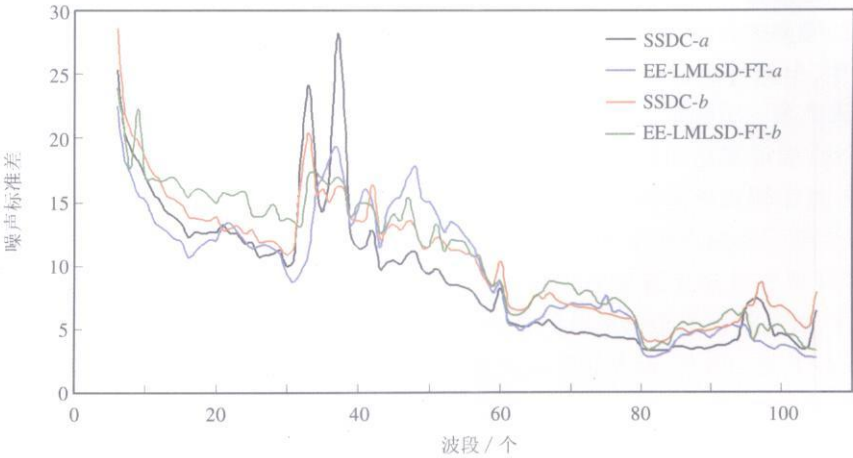


图 9 利用基于高斯波形提取的 LMLSD 对图 1 中 AVIRIS 辐射图像进行噪声评估的结果

Fig 9 Estimations of the noise for AVIRIS radiance images shown in Figure 1 via LMLSD based on Gaussian distribution pick-up



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

图 10 同时利用两种操作方法对图 1 中 AVIRIS 辐射图像进行噪声评估的结果

Fig 10 Estimations of the noise for AVIRIS radiance images shown in Figure 1 via the both methods at the same time

该波段范围内陆水体图像的噪声进行评估时会出现偏差。从图 10 中可以看到,经过改进,基于遥感图像空间特性的 LMLSD 方法不存在类似的问题。

通过以上分析可以看出,虽然 SSDC 方法比较稳定,但仍存在以下三点不足:一是当高光谱图像仅包含一种地物,且该地物在图像波段范围内存在特征吸收时,SSDC 不能用于对图像的噪声进行评估;二是在相同的噪声水平下,辐射值大小不同的光谱会得到不同的噪声评估结果,即 SSDC 对地物辐射值的大小很敏感;三是该方法不能用于对多光谱遥感图像的噪声进行评估,因为多光谱图像波段间的相关性很低。而改进后的 LMLSD 可以用于对多光谱和高光谱图像的噪声评估,且不同地物覆盖类型的影响降低。

5 结论与讨论

遥感图像信噪比的估算对于遥感系统性能评估和遥感数据应用具有非常重要的意义。本文在对遥感图像中的噪声类型进行分析和对各种遥感图像噪声评估方法进行比较的基础上,认为局部均值与局部标准差法更适于对多数遥感图像的噪声进行评估。在该方法中,要求图像是由很多均匀的子块构成,而实际上大部分图像往往是由均匀子块和非均匀子块共同构成,当这些非均匀子块在图像中处于主导地位时,利用局部均值与局部标准差法对噪声进行评估时可能出现异常。本文利用边缘块剔除方法和高斯波形提取方法对原算法进行改进,改进后的算法对不同地物覆盖类型的适应能力增强,算法更加稳定。同时,本文中提出的算法不仅可以用于对高光谱和多光谱遥感图像的噪声进行评估,还可以用于对微波图像的噪声进行评估。在微波图像中噪声以乘性噪声为主,但经过对数处理即可将乘性

噪声变成加性噪声,然后再利用本文提出的方法对图像进行噪声评估。

参 考 文 献 (References)

- [1] Chen Z C. A Research on the Technology of On-orbit Calibration and Validation of China DMC Micro-satellite [D]. Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences. Ph. D. Dissertation. 2005. [陈正超. 中国 DMC 小卫星在轨测试技术研究 [D]. 中国科学院遥感应用研究所, 博士论文, 2005.]
- [2] Comer B R. Noise Estimation in Remote Sensing Imagery Using Data Masking [J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(4): 689—702.
- [3] Freek D. Van Der Meer Steven M Dejong Imaging Spectrometry: Based Principles and Prospective Applications [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 2001.
- [4] Chen Q L. Xue Y Q. Estimation of Signal/Noise Ratio from Data Acquired with OMIS [J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(4): 284—289. [陈秋林, 薛永祺. OMIS 成像光谱数据信噪比的估算 [J]. 遥感学报, 2000, 4(4): 284—289.]
- [5] Paul J Curran Jennifer L Dungan. Estimation of Signal-to-Noise: A New Procedure Applied to AVIRIS Data [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1989, 27(5): 620—628.
- [6] Gao B C. An Operational Method for Estimating Signal to Noise Ratios from Data Acquired with Imaging Spectrometers [J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 43(1): 23—33.
- [7] Roger R E. Arnold J F. Reliably Estimating the Noise in AVIRIS Hyperspectral Images [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(10): 1951—1962.
- [8] Jiang Q S. Wang J Y. Study on Signal-to-Noise Ratio Estimation and Compression Method of Operational Modular Imaging Spectrometer Multi-spectral Images [J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(11): 1335—1340. [蒋青松, 王建宇. 实用型模块化成像光谱仪多光谱图像的信噪比估算及压缩方法研究 [J]. 光学学报, 2003, 23(11): 1335—1340.]
- [9] Canny J. A Computational Approach to Edge Detect [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679—698.