

## 基于边缘剔除的陆基高光谱图像噪声评估方法

赵佳乐, 王广龙, 周冰, 应家驹, 王强辉, 李秉璇

Noise evaluation method for land-based hyperspectral images based on edge elimination

引用本文:

赵佳乐, 王广龙, 周冰, 应家驹, 王强辉, 李秉璇. 基于边缘剔除的陆基高光谱图像噪声评估方法[J]. [激光技术](#), 2023, 47(1): 121–126.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 低秩稀疏和改进SAM的高光谱图像误标签检测

引用本文: 刘焯, 渠慎明. 低秩稀疏和改进SAM的高光谱图像误标签检测[J]. [激光技术](#), 2022, 46(6): 808–816.

### 2. 基于FPGA红外成像光谱数据处理系统研究

引用本文: 孙颖馨. 基于FPGA红外成像光谱数据处理系统研究[J]. [激光技术](#), 2019, 43(6): 763–767.

### 3. APD探测系统的噪声特性及其影响因素研究

引用本文: 刘贺雄, 周冰, 高宇辰. APD探测系统的噪声特性及其影响因素研究[J]. [激光技术](#), 2018, 42(6): 862–867.

### 4. 基于引导滤波和模糊算法的红外背景抑制算法

引用本文: 郭佩瑜, 张宝华. 基于引导滤波和模糊算法的红外背景抑制算法[J]. [激光技术](#), 2018, 42(6): 854–858.

### 5. 基于光谱梯度角的高光谱影像流形学习降维法

引用本文: 向英杰, 杨桃, 张俭峰, 等. 基于光谱梯度角的高光谱影像流形学习降维法[J]. [激光技术](#), 2017, 41(6): 921–926.

文章编号: 1001-3806(2023)01-0121-06

## 基于边缘剔除的陆基高光谱图像噪声评估方法

赵佳乐<sup>1</sup>, 王广龙<sup>2\*</sup>, 周 冰<sup>1\*</sup>, 应家驹<sup>1</sup>, 王强辉<sup>1</sup>, 李秉璇<sup>1</sup>

(1. 陆军工程大学石家庄校区 电子与光学工程系, 石家庄 050003; 2. 陆军工程大学石家庄校区 导弹工程系, 石家庄 050003)

**摘要:** 为了准确地对陆基成像条件下高光谱图像的噪声水平进行评估, 提出了一种基于边缘剔除后残差调整的局部标准差法。首先将获取的高光谱图像分成若干大小合适的子块, 而后利用 Canny 边缘检测算子检测出图像的边缘信息, 判断并剔除其中含有边缘的子块, 将剔除边缘子块后的均匀子块采用多元线性回归后求取残差的方法进行噪声估计。结果表明, 对同一幅陆基高光谱图像的不同子区域进行  $4 \times 4$  像素与  $8 \times 8$  像素分块, 得到的噪声总误差值分别为  $1.985 \times 10^3$  与  $2.197 \times 10^3$ 。该噪声估计方法对陆基成像条件下高光谱图像的噪声评估具有较强的鲁棒性, 可为后续陆基高光谱图像处理与应用提供参考。

**关键词:** 光谱学; 高光谱图像; 噪声评估; 边缘剔除

**中图分类号:** TP751

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.01.019

## Noise evaluation method for land-based hyperspectral images based on edge elimination

ZHAO Jiale<sup>1</sup>, WANG Guanglong<sup>2</sup>, ZHOU Bing<sup>1</sup>, YING Jiaju<sup>1</sup>, WANG Qianghui<sup>1</sup>, LI Bingxuan<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China; 2. Department of Missile Engineering, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In order to estimate the noise levels of hyperspectral images under ground-based imaging conditions accurately, a residual-scaled local standard deviations (RLSD) method after edge elimination was proposed. Firstly, the obtained hyperspectral image was divided into several sub-blocks of appropriate size, and then the edge information of the image was detected by using Canny edge detection operator, and the sub-blocks containing edges were judged and eliminated. The noise estimation of the uniform sub-blocks after the removal of edge sub-blocks was carried out by the method of multiple linear regression and residual error. The total error of noise was  $1.985 \times 10^3$  and  $2.197 \times 10^3$  for different sub-regions of the same land-based hyperspectral images by  $4 \times 4$  pixel and  $8 \times 8$  pixel segmentation. The results show that the proposed noise estimation method is robust to the noise evaluation of hyperspectral images under the condition of land-based imaging, which provides a reference for the subsequent processing and application of land-based hyperspectral images.

**Key words:** spectroscopy; hyperspectral image; noise assessment; edge elimination

## 引 言

随着陆基平台成像条件下高光谱成像技术的飞速发展, 针对陆基高光谱图像的分析与预处理显得尤为重要。陆基高光谱图像指的是在地面或者近地面利用成像光谱仪拍摄获得的高光谱图像, 在农业、环境检

测、国防军事等领域广泛应用<sup>[1-3]</sup>。陆基高光谱图像与高光谱遥感图像在成像条件、各项指标参数、空间特性、光谱特性以及分析处理方法上都具有不同程度的差异<sup>[4]</sup>。在成像条件上, 遥感成像采用星载或者机载方式垂直拍摄地物; 而陆基成像条件下, 光源入射方向与探测器接收方向随机, 且成像环境复杂多变。在处理分析上, 高光谱遥感图像空间分辨率很低, 达到几米甚至几十米, 空间形态纹理信息量很少; 而陆基条件下, 高光谱图像空间分辨率可以达到分米量级, 目标分类探测时可以充分利用图像的 2 维空间信息。从成像方式来看, 高光谱遥感图像通过扫描的方式获取, 成像凝视时间较长; 而陆基条件下, 成像时凝视时间较短,

作者简介: 赵佳乐 (1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电对抗与信息处理。

\* 通讯联系人。E-mail: glwang2005@163.com; zhbngxgc@163.com

收稿日期: 2021-12-06; 收到修改稿日期: 2022-01-05

进入探测器的光强度相对不足,图像的信噪比也相对较低。

成像光谱仪通过探测目标在连续波段上很窄光通道中的光亮度来描述目标地物精细的光谱信息<sup>[5]</sup>。因此,被探测器捕获到的有限光能量分配在这成百上千的窄波段中,导致每个窄波段获取的光能量较低,形成的高光谱图像很容易受到噪声干扰而产生“失真”的情况<sup>[6]</sup>。高光谱图像噪声的存在严重影响了图像质量及后续的处理应用效果,如混合像元分解、目标分类与探测<sup>[7]</sup>。准确地对噪声水平进行评估,可以为后续处理与可信性评价提供参考<sup>[8]</sup>。因此,对陆基高光谱图像特性的研究以及噪声的评估十分必要。早期提出的高光谱图像噪声评估方法很多都是基于遥感领域中获取的高光谱图像,传统的噪声评估方法对陆基成像条件下获取的高光谱图像评估的稳定性有待研究。随着高光谱图像噪声研究的不断深入,许多噪声评估的优化方法被相继提出<sup>[9]</sup>。GAO 等人利用目标像元光谱维相邻像元进行多元线性回归计算残差,将图像子块的残差取代局部均值与局部标准差(local mean and local standard deviation, LMLSD)方法中的局部标准差,并利用与 LMLSD 方法相同的统计方式实现对图像噪声的估算,这种方法被称作一种残差调整的局部标准差(residual-scaled local standard deviations, RLSD)方法<sup>[10]</sup>。但是在包含复杂纹理信息的场景中,RLSD 方法无法消除边缘不规则区域产生的影响。基于均匀区域划分和光谱维去相关的高光谱图像噪声评估(homogeneous regions division and spectral de-correlation, HRSDC)方法改进了 RLSD 方法,通过利用光谱角度距离完成均匀区域划分,而后再利用多元线性回归计算残差来进行噪声估计<sup>[11]</sup>。但是其图像子块仍会存在地物边界等不均匀的因素,导致高光谱图像噪声的估算结果存在一定误差。

为了更准确地寻找高光谱图像中去除物体边缘区域的均匀图像子块,本文中基于对陆基高光谱图像光谱与空间特性的分析,提出了一种更适合陆基高光谱图像噪声评估的方法。首先对图像子块进行边缘剔除,然后再利用 RLSD 方法进行噪声估计;利用地面成像光谱仪获取的实际图像对这种方法进行了验证,并与 LMLSD 法、空间光谱维去相关(spectral and spatial de-correlation, SSDC)法、RLSD 方法进行了比较分析,实验表明,该方法对陆基高光谱图像噪声评估结果更加稳定有效。

## 1 陆基高光谱图像噪声评估方法介绍

### 1.1 局部均值与局部标准差法

局部均值与局部标准差法是一种典型的利用全图分析获取图像噪声评估值的自动化方法。这种方法基于以下假设:在空间分辨率足够且地物覆盖均匀的情况下,将待分析图像分块,可以认为这些子块区域都是均匀的,而后利用局部标准差的数值进行最佳噪声估计。具体步骤见下。

(1) 全域分块。将图像分割成很多均匀子块。

(2) 计算各子块的局部均值(local mean, LM)与局部标准差(local standard deviation, LSD)。计算公式如下:

$$D_{LM} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i \quad (1)$$

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

式中,  $S_i$  为子块的第  $i$  个像元的灰度值;  $N$  为图像子块像元的总个数;  $D_{LM}$  与  $D_{LSD}$  分别为子块中局部均值与局部标准差的数值。

(3) 在最大和最小标准差之间建立若干等间隔区间。将子块的局部标准差按照大小排列,将包含子块数最多区间的局部标准差的平均值作为图像噪声估计值<sup>[10]</sup>。

LMLSD 方法充分利用了图像信息,但是会受到子块均匀程度的影响,对均匀的区域计算结果较为理想,然而非均匀区域以及地物边缘区域对其噪声评估产生很大影响,导致这种噪声评估方法误差较大,从而不能精确反映图像真实的噪声特性<sup>[12]</sup>。陆基应用时,获取的高光谱图像虽然具有较高的空间分辨率,但是地物覆盖复杂情况有很大的不可预知性。图像尺寸、地物覆盖类型以及复杂程度都影响计算结果,鲁棒性较差。

### 1.2 残差调整的局部均值与局部标准差法

由于很难满足 LMLSD 方法中 2 维图像由大量均匀小块组成的假设,且高光谱图像光谱维相邻波段具有很高的相关性,同时考虑到基于多元线性回归的 SSDC 方法在处理大尺寸图像子块以及粗纹理图像时出现不稳定的情况<sup>[13]</sup>,为了降低不均匀子块的影响,提出了一种利用多元线性回归去除波段相关性后求出子块的残差来代替 LMLSD 中的 LSD 部分进行噪声估计的方法,称为残差调整的局部均值与局部标准差法。具体步骤见下。

(1) 空间分块。对于第  $k$  波段的图像子块求 LM 的数值为:

$$D_{LM} = \frac{1}{w \times h} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h X_{i,j,k} \quad (3)$$

式中,  $X_{i,j,k}$  是第  $k$  波段中  $(i, j)$  位置上的像元值;  $w \times h$  为子块大小。

(2) 任意子块首先通过多元线性回归预测像元  $X_{i,j,k}$  的信号值为  $\hat{X}_{i,j,k}$ , 具体公式为:

$$\hat{X}_{i,j,k} = a + bX_{i,j,k-1} + cX_{i,j,k+1} \quad (4)$$

式中,  $a, b, c$  为多元线性回归系数, 可通过子块内取样再利用最小二乘法获得。计算各像元点的残差:

$$r_{i,j,k} = X_{i,j,k} - \hat{X}_{i,j,k} \quad (5)$$

(3) 残差的局部标准差的值通过下式求得:

$$D_{LSD} = \left( \frac{1}{w \times h - 3} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h r_{i,j,k}^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

为了得到残差局部标准差的无偏估计, 选择除以  $w \times h - 3$  来求平均。

(4) 利用处理得到的子块残差的局部标准差值求

得图像噪声的估计值。

RLSD 方法充分利用了高光谱图像具有光谱相关性高的特点, 对陆基高光谱图像而言, 光谱波段间相关性水平相对较高, 比较适合采用 RLSD 方法进行噪声估计。虽然 RLSD 方法对地物覆盖类型不敏感, 具有较好的稳定性, 但该方法也会受到子块尺寸与含边缘子块的影响<sup>[14]</sup>。当子块尺寸选取较大时, 子块数统计不易寻找均匀块区间; 当子块尺寸较小时, 参与多元线性回归的像元数较少, 得到的残差代表噪声的实际意义不突出。

### 1.3 基于边缘剔除的 RLSD 噪声评估方法

传统的噪声处理评估方法是针对高光谱遥感图像的, 对陆基成像条件下的高光谱图像适用性有限。通过对陆基高光谱图像光谱信息与空间纹理信息的分析, 陆基高光谱图像具有光谱波段相关性高、空间分辨率高、纹理尺寸较大以及地物覆盖类型复杂等特点<sup>[15]</sup>。基于边缘剔除的 RLSD 噪声评估方法, 综合了边缘剔除非均匀子块与残差调整的局部标准差思想, 具体的步骤流程如图 1 所示。

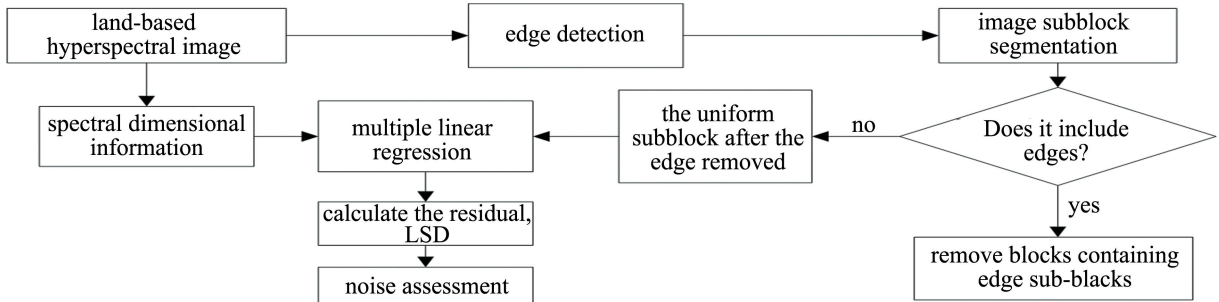


图 1 基于边缘剔除的 RLSD 噪声评估方法流程图

Fig. 1 Flow chart of RLSD noise assessment method based on edge elimination

首先对需要进行噪声评估的陆基条件下获取的高光谱图像进行边缘检测, 通过对多种边缘检测算子的对比分析, 发现 Canny 算子的效果较好<sup>[16]</sup>。边缘检测的目的是充分利用高光谱图像的空间结构特征, 筛选出图像中空间不均匀的区域。

然后对高光谱图像进行子块分割, 通过检测分割后的子块是否包含边界像元, 去除包含边缘的子块, 一定程度上去除了非均匀子块对噪声评估结果的影响。利用(4)式对边缘剔除后的均匀子块进行多元线性回归, 最小二乘法拟合最佳参数。利用(5)式求各像元实际灰度值与估计值的残差, 去除光谱波段间的高相关性。

最后求每个均匀子块中的残差值作为子块的噪声估计值, 对所有均匀子块的噪声估计值处理分析作为图像噪声的最佳估计值。

## 2 实验验证与结果分析

### 2.1 数据准备

实验中所用的陆基高光谱图像由 HIS-300 型成像光谱仪拍摄, 这款成像光谱仪的成像波长范围为 449 nm~801 nm, 光谱波段间隔设置为 4 nm, 共得到 89 个波段图像。该图像拍摄于 2021-04-27, 主要地物类型比较丰富, 包括草地、植被、墙体、石灰地、标定板、伪装板、迷彩衣等。数据采集示意图如图 2 所示。

实验中拍摄到的高光谱图像大小为 1002×1002 像素, 为了便于比较分析, 选取其中较清晰的波段灰度图像用作边缘检测图像, 在灰度图像上分别截取两幅尺寸为 320×320 像素的图像, 如图 3 所示。图中 A 区域中地物分布情况简单, 均匀区域较多, 纹理基元尺寸大; B 区域中地物种类较多, 分布相对复杂, 纹理基元



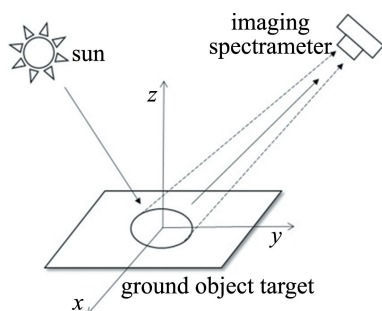


图 2 数据采集示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of data acquisition

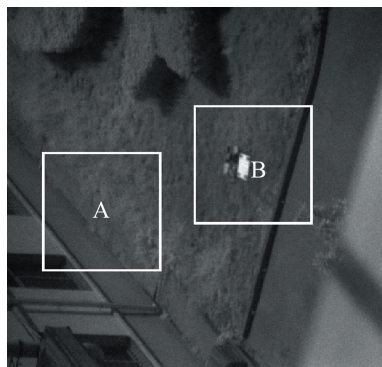


图 3 实验场景灰度图像  
Fig. 3 Gray scale image of experimental scene

尺寸相对较小。理论上这两幅图像的噪声情况相同,对两者采用相同的噪声评估方法估计噪声,结果越相似,证明该噪声评估方法越稳定。

2.2 评估方法比较

实验中选择 SSDC 与 LMLSD 这两种经典的噪声评估方法以及 RLSD 方法用作对比,SSDC 法被认为是一种可靠的、自动化、非常稳定的高光谱图像噪声评估方法<sup>[17]</sup>。局部均值与局部标准差法是处理均匀地物区域的基础方法。选择 RLSD 方法对比可以突出边缘剔除不均匀子块的作用。采用这 3 种经典算法与本文中的方法作对比,更具有可靠性与说服力。

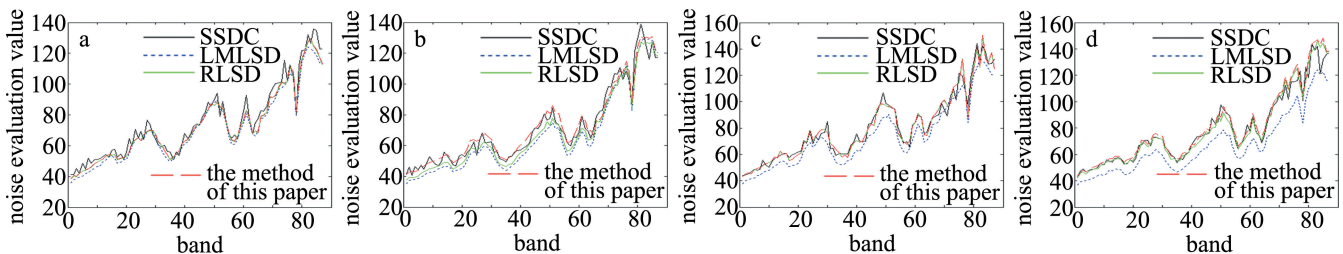


图 5 A、B 两区域在不同分块条件下 4 种方法的噪声评价  
a—区域 A 在 4×4 分块下的 4 种方法的噪声估计值 b—区域 B 在 4×4 分块下的 4 种方法的噪声估计值 c—区域 A 在 8×8 分块下的 4 种方法的噪声估计值 d—区域 B 在 8×8 分块下的 4 种方法的噪声估计值

Fig. 5 Noise evaluation value of four methods under different block conditions for two regions A and B

a—estimation results of four noise assessment methods under 4×4 block in area A b—estimation results of four noise assessment methods under 4×4 block in area B c—estimation results of four noise assessment methods under 8×8 block in area A d—estimation results of four noise assessment methods under 8×8 block in area B

利用 Canny 算子对两幅 320×320 像元的图像进行边缘检测,Canny 算子是进行边缘检测的常用且有效的算子之一。选择调整合适的参数,分别对上述陆基高光谱图像 A、B 两个区域进行边缘检测,提取边缘后如图 4 所示。

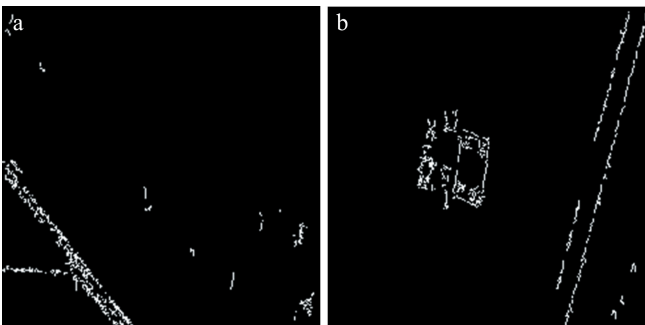


图 4 边缘检测后的图像  
a—A 区域图像 b—B 区域图像  
Fig. 4 Image after edge detection  
a—area A b—area B

将原始尺寸为 320×320 像素的图像,分别分割成为 4×4 与 8×8 的子块,用于研究不同子块尺寸对噪声估计稳定性的影响,利用得到的二值图像将子块分割后包含边缘的子块剔除,剔除前后子块数量如表 1 所示。

表 1 边缘剔除前后的子块数

	area A	area A	area B	area B
	4×4 block	8×8 block	4×4 block	8×8 block
before edge elimination	6400	1600	6400	1600
after edge elimination	6105	1476	5994	1416

在不同分块下采用 SSDC、LMLSD 和 RLSD 噪声估计方法分别对区域 A、B 进行噪声估计用作对比,实验得到的结果如图 5 所示。

从图中可以看出,在不同的分块条件与不同的地物复杂程度下,这 4 种对陆基高光谱图像的噪声评估方法得到了相似的结果,反映出不同条件下这 4 种噪声评估方法都没有受到严重影响,对噪声的评估值具有一定的可靠性。因此,采用 SSDC 方法、LMLSD 方法、RLSD

方法在不同分块条件下作为本文中噪声评估方法的比较方法是有效的。理论上同一幅图像的子区域在相同的分块条件与噪声评估方法下得到的结果相同,为了进一步研究本文中噪声评估方法的稳定性,将各种评估方法在 A、B 两区域上进行对比,结果如图 6 所示。

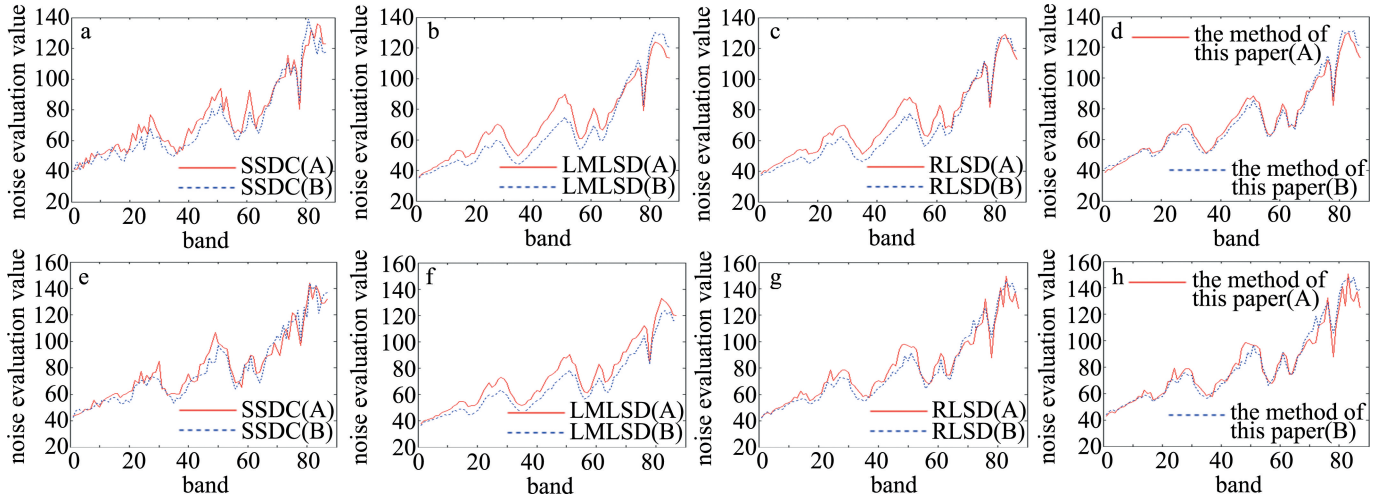


图 6 在 4×4 分块与 8×8 分块下,采用不同方法时 A、B 两区域的噪声评估值

a—在 4×4 分块下 SSDC 方法的噪声评估值 b—在 4×4 分块下 LMLSD 方法的噪声评估值 c—在 4×4 分块下 RLSD 方法的噪声评估值 d—在 4×4 分块下本文中方法的噪声评估值 e—在 8×8 分块下 SSDC 方法的噪声评估值 f—在 8×8 分块下 LMLSD 方法的噪声评估值 g—在 8×8 分块下 RLSD 方法的噪声评估值 h—在 8×8 分块下本文中方法的噪声评估值

Fig. 6 Different methods are used to evaluate the noise values of A and B regions under 4×4 block and 8×8 block

a—noise evaluation value of SSDC method under 4×4 block b—noise evaluation value of LMLSD method under 4×4 block c—noise evaluation value of RLSD method under 4×4 block d—noise evaluation value of the method in this paper under 4×4 block e—noise evaluation value of SSDC method under 8×8 block f—noise evaluation value of LMLSD method under 8×8 block g—noise evaluation value of RLSD method under 8×8 block h—noise evaluation value of the method in this paper under 8×8 block

利用同种方法对两子图噪声评估值在各个波段的差值平方和来描述噪声评估方法的稳定性高低,结果如表 2 所示。

表 2 不同方法估计两个子图噪声的误差值

Table 2 Estimation error of two subgraphs noise using different methods

	the method of this paper	SSDC	LMLSD	RLSD
deviation of noise estimate(4×4 block)	$1.985 \times 10^3$	$4.000 \times 10^3$	$5.377 \times 10^3$	$3.600 \times 10^3$
deviation of noise estimate(8×8 block)	$2.197 \times 10^3$	$4.444 \times 10^3$	$5.007 \times 10^3$	$3.769 \times 10^3$

整体来看,针对陆基高光谱图像的噪声评估方法中,LMLSD 方法稳定性最差,其主要是由于 LMLSD 方法没有利用陆基高光谱图像波段之间的高相关性,并且这种方法受地物覆盖具体情况影响较大,难以去除非均匀子块影响。SSDC 方法与 RLSD 方法取得了优于 LMLSD 方法的结果,主要原因是这两种方法充分利用了高光谱图像光谱波段的高相关性,并通过多元线性回归拟合削弱了极端点的影响,提高了噪声评估的准确性,但仍然无法消除图像中非均匀子块的影响。

基于边缘剔除的 RLSD 方法首先利用 Canny 边缘检测算子提取出图像的边缘,由于地物分布具有连续性,检测出的边缘像素点所在的子块是不均匀的。将含有边缘像素点的子块剔除,大大减小了噪声估计过程中非均匀子块的影响,而后利用多元线性回归与计算局部标准差。经实验验证,基于边缘剔除的 RLSD 方法用于陆基高光谱图像噪声评估是稳定有效的。

### 3 结 论

陆基成像条件下高光谱图像与高光谱遥感图像存在较大差异,本文中结合陆基高光谱图像 1 维光谱与 2 维空间信息的特点,提出了一种基于边缘剔除后残差调整的局部标准差法。通过对同一幅图像不同地物复杂程度区域的噪声评估结果进行分析,与经典的 3 种噪声评估方法(SSDC 方法、LMLSD 方法、RLSD 方法)进行比较,本文中方法得到的噪声评估值总体偏差最小,噪声评估结果的准确度更高。这种方法充分利用了陆基高光谱图像光谱空间与几何空间的特点,去除了部分非均匀子块的影响,结合均匀区域波段间

高相关性,采用多元线性回归后求残差来进行噪声评估,提高了噪声估计数据的可靠性。实验证明,采用本文中的方法得到的噪声偏差值最小,在  $4 \times 4$  分块与  $8 \times 8$  分块下,分别为  $1.985 \times 10^3$  与  $2.197 \times 10^3$ ,相比于常用方法偏差值最小。

综上所述,基于边缘剔除的陆基高光谱图像噪声评估方法对不同地物覆盖的图像具有很好的适用性,其噪声估算结果也更加准确,为陆基成像条件下高光谱图像噪声评估提供了一种准确、可信赖的方案。

### 参 考 文 献

- [1] SUN J, JIN H T, LU B, *et al.* Prediction model of rice protein content based on hyperspectral image and depth characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(15):295-303 (in Chinese).  
孙俊,靳海涛,芦兵,等. 基于高光谱图像及深度特征的大米蛋白质含量预测模型[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15):295-303.
- [2] YAN Y, HUA W Sh, ZHANG Y, *et al.* Visible near-infrared hyperspectral camouflage target characteristic analysis [J]. Infrared Technology, 2019, 41(2):171-175 (in Chinese).  
严阳,华文深,张炎,等. 可见-近红外高光谱伪装目标特性分析[J]. 红外技术, 2019, 41(2):171-175.
- [3] DONG Y Q, MAO J H, LIANG D, *et al.* Monitoring and application of unmanned aerial vehicle hyperspectral water quality in urban river [J]. Environmental Science and Technology, 2021, 44(s1):289-296 (in Chinese).  
董月群,冒建华,梁丹,等. 城市河道无人机高光谱水质监测与应用[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(s1):289-296.
- [4] QIU Ch, BAI T Zh, ZHANG Sh, *et al.* Fast inversion measurement of near-infrared reflectance of scene [J]. Infrared Technology, 2018, 40(2):107-113 (in Chinese).  
邱纯,白廷柱,张硕,等. 景物近红外反射率快速反演测量研究[J]. 红外技术, 2018, 40(2):107-113.
- [5] YE Zh, BAI L, HE M Y. A review on spatial spectrum feature extraction from hyperspectral images [J]. Journal of Image and Graphics, 2021, 26(8):1737-1763 (in Chinese).  
叶珍,白璘,何明一. 高光谱图像空谱特征提取综述[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(8):1737-1763.
- [6] ZHANG B. Advancement of hyperspectral image processing and information extraction [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5):1062-1090 (in Chinese).  
张兵. 高光谱图像处理与信息提取前沿[J]. 遥感学报, 2016, 20(5):1062-1090.
- [7] YAN Y, HUA W Sh, LIU X, *et al.* Research of hyperspectral unmixing methods [J]. Laser Technology, 2018, 42(5):692-698 (in Chinese).  
严阳,华文深,刘恂,等. 高光谱解混方法研究[J]. 激光技术, 2018, 42(5):692-698.
- [8] TONG Q X, ZHANG B, ZHANG L F. Current progress of hyperspectral remote sensing in China [J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5):689-707 (in Chinese).  
童庆禧,张兵,张立福. 中国高光谱遥感的前沿进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5):689-707.
- [9] ZHANG L F, LU X H, CEN Y, *et al.* Optimized spatial and spectral decorrelation method for noise estimation in hyperspectral images [J]. Journal of Remote Sensing, 2021, 25(7):1411-1421 (in Chinese).  
张立福,鹿旭晖,岑奕,等. 高光谱图像空间光谱维去相关噪声评估[J]. 遥感学报, 2021, 25(7):1411-1421.
- [10] GAO L R, ZHANG B, ZHANG X, *et al.* Study on the method for estimating the noise in remote sensing images based on local standard deviations [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(2):201-208 (in Chinese).  
高连如,张兵,张霞,等. 基于局部标准差的遥感图像噪声评估方法研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(2):201-208.
- [11] GAO L R, ZHANG B, ZHANG X, *et al.* A new operational method for estimating noise in hyperspectral images [J]. IEEE Geo Science and Remote Sensing Letters, 2008, 5(1):83-87.
- [12] 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 (in Chinese).  
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.
- [13] 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 (in Chinese).  
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.
- [14] ZHU B, WANG X H, TANG L L, *et al.* Review on methods for SNR estimation of optical remote sensing imagery [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(2):303-309 (in Chinese).  
朱博,王新鸿,唐伶俐,等. 光学遥感图像信噪比评估方法研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(2):303-309.
- [15] YU T Q, WEI W, ZHANG Y N, *et al.* Analysis of the BRDF characteristics of Dunhuang Radiometric Correction Site in the Spring [J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(6):612004 (in Chinese).  
余谭其,韦玮,张艳娜,等. 敦煌辐射校正场春季 BRDF 特性分析[J]. 光子学报, 2018, 47(6):612004.
- [16] XUE W, ZHANG Y Sh, DONG G J, *et al.* An edge-detection method of sub-pixel based on Canny operator [J]. Remote Sensing Information, 2013, 28(1):8-10 (in Chinese).  
薛武,张永生,董广军,等. Canny 算子子像素边缘检测方法[J]. 遥感信息, 2013, 28(1):8-10.
- [17] FU P, SUN Q S, JI Z X. A spectral-spatial information based approach for the mixed noise estimation from hyperspectral remote sensing images [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2015, 34(2):236-242 (in Chinese).  
傅鹏,孙权森,纪则轩. 基于光谱-空间信息的高光谱遥感图像混合噪声评估[J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(2):236-242.