



主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2016
07
VOL.21

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



人脸图像处理 P865



第21卷第7期（总第243期）

2016年7月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 顾行发
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
邮政信箱 北京9718信箱
邮 编 100101
电子信箱 jig@radi.ac.cn
电 话 010-64807995
网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

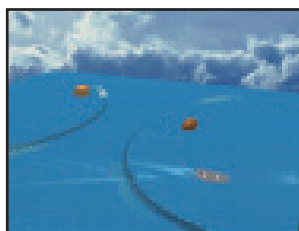
Editor-in-Chief Gu Xingfa
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics
P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China
Zip code 100101
E-mail jig@radi.ac.cn
Telephone 010-64807995
Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

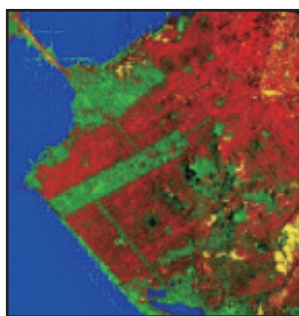
CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 60.00元



大规模柔体的连续碰撞检测
算法(第901页)



大规模流体场景的真实感与
实时模拟(第913页)



星载SAR影像上船舶方位
向模糊去除算法(第951页)

图像处理和编码

低存储化压缩感知

王金铭, 叶时平, 徐振宇, 蒋燕君 835

3D-HEVC深度图像快速帧内编码方法

张洪彬, 伏长虹, 陈锐霖, 萧允治, 苏卫民 845

加权KNN的图文数据融合分类

康丽萍, 孙显, 许光奎 854

结合肤色分割与平滑的人脸图像快速美化

邱佳梁, 戴声奎 865

图像分析和识别

级联型P-RBM神经网络的人脸检测

叶学义, 陈雪婷, 陈华华, 顾亚风, 吕秋云 875

结合全局与局部信息活动轮廓的非同质图像分割

郝智慧, 郭满才, 宋杨杨 886

计算机图形学

带参数的多项式势函数与构造基于Metaball的过渡曲线

李军成, 宋来忠, 刘成志 893

大规模柔体的连续碰撞检测算法

周清玲, 刘艳, 程天翔 901

虚拟现实与增强现实

大规模流体场景的真实感与实时模拟

邵绪强, 杨晓丹, 李继荣, 阎蕾 913

医学图像处理

形状约束下活动轮廓模型冠脉血管图像多尺度分割

郭笑妍, 梅雪, 李振华, 曹佳松, 周宇 923

遥感图像处理

深度置信网络在极化SAR图像分类中的应用

邓磊, 付姗姗, 张儒侠 933

高光谱图像低秩表达与噪声水平估计

唐中奇, 付光远, 赵晓林, 陈进, 张利 942

星载SAR影像上船舶方位向模糊去除算法

邴磊, 邢前国, 邹娜娜, 李圳波, 吴樊 951

TDFA: 一种生成空间影像金字塔的方法

张云舟, 张陌, 王晋年, 张刚 959

无人机侦察视频超分辨率重建方法

张岩, 李建增, 李德良, 杜玉龙 967

CONTENTS

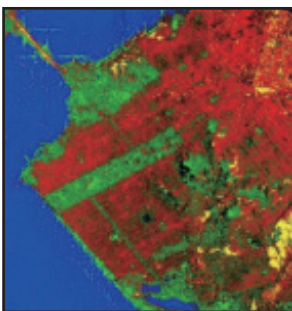
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Continuous collision detection algorithm for large-scale deformable objects (P901)



Realistic and real-time simulation of large-scale fluids (P913)



Application of deep belief network in polarimetric SAR image classification (P951)

Image Processing and Coding

- Reducing the storage space of the measurement matrix for compressive sensing
Wang jinming, Ye shiping, Xu zhenyu, Jiang yanjun 835
- Fast intra coding for depth map in 3D-HEVC
Zhang Hongbin, Fu Changhong, Chan Yuilam, Siu Wanchi, Su Weimin 845
- Fusion method via KNN with weight adjustment for the classification of image-text co-occurrence data
Kang Liping, Sun Xian, Xu Guangluan 854
- Fast facial beautification algorithm based on skin-color segmentation and smoothness
Qiu Jialiang, Dai Shengkui 865

Image Analysis and Recognition

- Cascaded probability state-restricted Boltzmann machine for face detection
Ye Xueyi, Chen Xueting, Chen Huahua, Gu Yafeng, Lyu Qiuyun 875
- Inhomogeneous image segmentation based on active contours with global and local information
Hao Zhihui, Guo Mancai, Song Yangyang 886

Computer Graphics

- The polynomial potential function with a parameter and transition curve based on Metaball technology
Li Juncheng, Song Laizhong, Liu Chengzhi 893
- Continuous collision detection algorithm for large-scale deformable objects
Zhou Qingling, Liu Yan, Cheng Tianxiang 901

Virtual Reality and Augmented Reality

- Realistic and real-time simulation of large-scale fluids
Shao Xuqiang, Yang Xiaodan, Li Jirong, Yan Lei 913

Medical Image Processing

- Multi-scale segmentation of coronary artery image based on active contour model with shape constraints
Guo Xiaoyan, Mei Xue, Li Zhenhua, Cao Jiasong, Zhou Yu 923

Remote Sensing Image Processing

- Application of deep belief network in polarimetric SAR image classification
Deng Lei, Fu Shanshan, Zhang Ruxia 933
- Low-rank representation for hyperspectral image noise level estimation
Tang Zhongqi, Fu Guangyuan, Zhao XiaoLin, Chen Jin, Zhang Li 942
- Azimuth ambiguity removal method for ship detection based on spaceborne SAR images
Bing Lei, Xing Qianguo, Zou Nana, Li Zhenbo, Wu Fan 951
- TDFA: a generation method of spatial image pyramid
Zhang Yunzhou, Zhang Mo, Wang Jinnian, Zhang Gang 959
- Super-resolution reconstruction for UAV video
Zhang Yan, Li Jianzeng, Li Deliang, Du Yulong 967

中图法分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2016)07-942-09

论文引用格式: Tang Z Q, Fu G Y, Zhao X L, Chen J, Zhang L. Low-rank representation for hyperspectral image noise level estimation[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(7): 942-950. [唐中奇, 付光远, 赵晓林, 陈进, 张利. 高光谱图像低秩表达与噪声水平估计[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(7): 942-950.] [DOI:10.11834/jig.20160712]

高光谱图像低秩表达与噪声水平估计

唐中奇^{1,2}, 付光远¹, 赵晓林³, 陈进⁴, 张利²

1. 火箭军工程大学信息工程系, 西安 710025; 2. 清华大学电子工程系, 北京 100084;
3. 空军工程大学无人机系, 西安 710043; 4. 北京市遥感信息研究所, 北京 100192

摘要: 目的 高光谱遥感图像常存在多种不同程度的退化, 进而影响到后续的应用, 因此, 对高光谱图像进行噪声水平估计具有重要意义。在实际情况中, 不同波段的图像噪声水平常有所差异, 需要针对不同谱通道的特性差异进行噪声估计。因此, 本文提出一种基于低秩表达的噪声水平估计算法。**方法** 该算法首先利用多波段图像间的光谱相关性, 建立高光谱数据的低秩表达模型; 再通过该模型对各波段的噪声及其水平进行估计, 并根据需要检测并剔除被噪声淹没的无效波段。**结果** 在多组高光谱数据上进行模拟和真实实验, 证明本文算法能够准确估计高光谱图像的谱通道噪声水平。**结论** 本文算法挖掘了低秩表达在高光谱应用中的特性, 在利用波段间相关性进行全局处理的同时, 也能保留波段间的差异, 具有较强的鲁棒性; 在合适的阈值范围内, 无效波段的漏检率低至 0, 准确率高于 80%。

关键词: 高光谱图像; 噪声估计; 噪声波段检测; 低秩表达

Low-rank representation for hyperspectral image noise level estimation

Tang Zhongqi^{1,2}, Fu Guangyuan¹, Zhao XiaoLin³, Chen Jin⁴, Zhang Li²

1. Department of Information Engineering, Xi'an Institute of High-Tech, Xi'an 710025, China;
2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. Department of Unmanned Aerial Vehicle, Air Force Engineering University, Xi'an 710043, China;
4. Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China

Abstract: **Objective** Most hyperspectral remote sensing images suffer from degradation because of the distortion of atmospheric transmission, the limitation of electron devices, and the influence of poor illumination. As a result, the performance of these images in subsequent applications is seriously affected. Thus, the noise in hyperspectral images must be estimated. Given that the noise levels in different bands are often not equivalent in practice, the noise level in each band must be estimated to select an efficient subset of bands. To achieve this end, this paper proposes a hyperspectral image noise estimation algorithm. **Method** First, given the high correlation between hyperspectral channels, a low-rank-based model is established

收稿日期: 2015-11-30; 修回日期: 2016-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(61132007, 61202332, 61503405); 国家自然科学基金青年基金项目(61403397); 中国博士后科学基金项目(2012M521905); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2015JM6313)

第一作者简介: 唐中奇(1987—), 女, 清华大学电子工程系博士研究生, 主要研究方向为计算机视觉、高光谱图像分析。

E-mail: tangzq12@mails.tsinghua.edu.cn

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61132007, 61202332, 61503405); Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (61403397)

specifically for the hyperspectral case. A proper furthermore rule is selected for the noise estimation model to achieve robust performance. Second, the noise in hyperspectral channels is estimated simultaneously using the proposed model. Third, the noise density in each band is calculated as noise level, and the useless bands can be rejected. **Result** Experiments are performed on both simulated and real datasets. The proposed method is more robust and can achieve better results than several existing methods because it fully utilizes the correlation and difference between bands. **Conclusion** Given that the noise level in bands may be unbalanced, this paper proposes a noise estimation algorithm for hyperspectral images by exploiting the low-rank characteristic of hyperspectral data. By considering noise analysis, this paper proposes a new method to evaluate the quality of hyperspectral images without reference. The proposed algorithm can be applied to highly correlated multichannel images, and the evaluation results are in accordance with expert knowledge and manual interpretation.

Key words: hyperspectral image; noise estimation; noisy band detection; low-rank representation

0 引言

近年来,高光谱遥感在光学成像上取得了巨大的成就,并迅速应用于军事侦察、矿质探测、生态监控以及精准农业等多个领域^[1]。与多光谱图像不同的是,高光谱图像提供了数十至上百的连续波段,光谱分辨率大大增强,可识别一些在宽波段遥感中不可探测的物质^[2]。然而,由于光照、大气、传感器等因素的影响,多数高光谱图像仍存在不同程度的退化,主要表现为高斯、椒盐、条带和死行等多种不同类型的噪声,而图像质量的好坏直接影响到接踵而至的应用^[3]。由于高光谱图像各个谱通道具有不同的光学特性,其相应波段上图像的噪声水平也不尽相同,一些波段可能不含原图像的有用信息或完全被噪声淹没,例如水吸收波段。此外,椒盐噪声、条带和死行等也常出现在部分谱段上。因此,针对各个谱通道进行噪声估计,有利于更精准地度量各波段噪声水平。

针对高光谱图像的噪声水平估计,现有研究中提出了多种不同的方法。一些方法从图像处理的角度,利用局部均值和方差对高光谱图像进行噪声水平估计^[4]。Gao 等人^[5]提出先将高光谱图像分割为多个区域,再统计所有区域的光谱标准差均值作为噪声水平。Julio 等人^[6]在 Gao 等人研究的基础上,提出采用迭代核(RC)改善分割算法,以获得更准确的估计。另有一批方法利用图像的小波变换对各波段的图像进行估计。Chang 等人^[7]利用小波系数估计图像的噪声水平,Zhao 等人^[8]将这一技术推广到高光谱应用中。Xu 等人^[9]采用多线性回归和小波变换进行高光谱图像的噪声估计。还有一批方法从整体去噪的角度出发,将单谱段噪声估计扩展到多

谱段,例如视频块匹配 3D 过滤法(VBM3D)^[10]。在这些方法中,多数基于方差估计或小波变换的方法对高光谱图像进行逐波段估计,算法执行效率较低,且一般未考虑波段间相关性。VBM3D 等整体估计方法在处理效率上有所提高,但大多假设各波段的噪声水平是均衡的,而忽视了实际情况中波段噪声水平的差异对算法鲁棒性造成的影响。

近年来,低秩表达在智能检测与认知上取得了一系列令人瞩目的成果,广泛应用于纹理分析、人脸识别等领域^[11]。在低秩表达的框架中,不同的正则化约束被用于不同矩阵数据的恢复: ℓ_0 范数($\|\cdot\|_0$)可用于处理矩阵数据中稀疏的随机坏点^[12]; ℓ_F 范数($\|\cdot\|_F$)则常用于去除矩阵数据中幅值较小的稠密噪声^[13];而针对矩阵的列损坏, $\ell_{2,0}$ 范数($\|\cdot\|_{2,0}$)常被采用^[14]。对于高光谱图像,为了合理描述不同波段的噪声水平差异,本文首先挖掘了数据的低秩特性,建立高光谱图像的低秩矩阵模型,并采用合适的正则化策略,更准确地估计多波段图像的噪声。为了消除无效波段(不含有用信息或噪声污染严重)对于整体图像质量的影响,该算法还将各波段的噪声水平作为检测无效波段的依据。与其他现有方法相比,本文算法能够揭示高光谱图像的低秩结构,去除各波段噪声水平不均衡对整体噪声估计的影响,还能够依据谱通道噪声水平对各谱段的图像质量进行评价。

1 高光谱噪声水平估计

本文算法的总体研究流程如图 1 所示。首先,挖掘高光谱数据的低秩特性,将数据立方体转化为相应的矩阵形式,再利用低秩模型进行谱通道噪声

估计;然后,在获得噪声矩阵后,对各波段进行噪声水平估计;最后,依据各波段的噪声水平,根据需要挑选高光谱图像的有效波段子集。

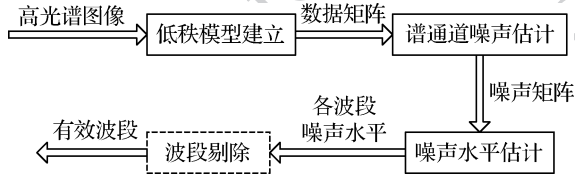


图1 本文总体研究流程

Fig. 1 The overall framework of the proposed method

1.1 谱通道噪声估计

由于高光谱遥感器的光谱分辨率极高,其相邻波段间隔很窄,甚至存在一定的光谱重叠^[15],因此,原始的高光谱数据存在严重的信息冗余,波段之间具有很强的相关性^[16-17]。由此可推测出,真正的信号数据(无噪)应该具有某一低秩结构。基于这一低秩特性,就可以建立高光谱数据的低秩表达模型。

设原始的高光谱图像数据立方体为 $\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{m \times n \times b}$, $\{m, n\}$ 表示图像的空间尺寸, b 为波段数。按列优先顺序,将每个波段的图像拉成向量(如图2(b)(c)所示), $\mathbf{H}$ 则转化为2维矩阵形式 $\mathbf{F} \in \mathbf{R}^{k \times b}$ ($k = m \times n$),如图2(d)所示, $\mathbf{F}$ 的每列对应于 $\mathbf{H}$ 的一个波段。

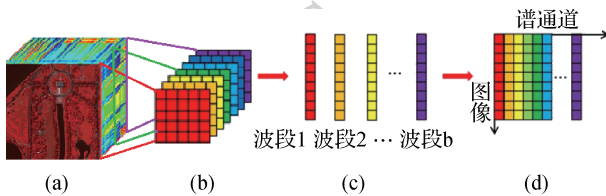


图2 高光谱数据形式转化

Fig. 2 Transformation of hyperspectral data

当数据无噪时,由于波段间的强相关性, $\mathbf{F}$ 的列空间应该具有低秩结构,那么, $\mathbf{F}$ 的各列可由字典 $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_l]$ 的线性组合表示,即

$$\mathbf{F} = \mathbf{AZ} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{Z}$ 为数据 $\mathbf{F}$ 的低秩表达系数矩阵。由此,数据低秩结构的求解问题可以表述为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{Z}} \quad & \text{rank}(\mathbf{Z}) \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{F} = \mathbf{AZ} \end{aligned} \quad (2)$$

然而,在实际情况下,高光谱图像往往受到多因素噪声的干扰,设 $\mathbf{N}$ 为噪声的矩阵形式,那么对原始数据进行噪声估计的问题可表述为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{Z}, \mathbf{N}} \quad & \text{rank}(\mathbf{Z}) + \lambda \|\mathbf{N}\|_{\ell} \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{F} = \mathbf{AZ} + \mathbf{N} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\lambda > 0$ 为模型参数, $\|\cdot\|_{\ell}$ 为正则化策略,可选择不同的正则化策略解决不同的优化问题。

如前所述,在实际情况下,高光谱图像各波段的噪声水平往往并不均衡,在噪声估计中需要考虑各谱段的差异。由于 $\mathbf{F}$ 的各列对应各个谱通道,而 $\ell_{2,0}$ 范数 ($\|\cdot\|_{2,0}$) 适用于处理列样本损坏与污染的情况^[14],可以敏锐捕捉不同谱通道之间噪声水平的差异,因此,选用该范数约束为正则化策略,用于谱通道噪声的估计。由此,式(3)可转化为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{Z}, \mathbf{N}} \quad & \text{rank}(\mathbf{Z}) + \lambda \|\mathbf{N}\|_{2,0} \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{F} = \mathbf{AZ} + \mathbf{N} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $\mathbf{Z}$ 为采用字典 $\mathbf{A}$ 时信号数据的低秩表达, $\mathbf{N}$ 为谱通道噪声。如文献[14]所论证,模型参数可选取 $\lambda = 3/(7\|\mathbf{F}\|_{\sqrt{k_n}})$, k_n 为损坏波段数的上限。

在实际求解过程中,通常将 $\text{rank}(\cdot)$ 转为核函数 $\|\cdot\|_*$, $\ell_{2,0}$ 范数松弛为 $\ell_{2,1}$ 范数,此时式(4)可转化为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{Z}, \mathbf{N}} \quad & \|\mathbf{Z}\|_* + \lambda \|\mathbf{N}\|_{2,1} \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{F} = \mathbf{AZ} + \mathbf{N} \end{aligned} \quad (5)$$

此外,当选取字典 $\mathbf{A} = \mathbf{F}$ 时常能获得较为鲁棒的结果^[11,14],故式(5)可以进一步转化为

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{Z}, \mathbf{N}} \quad & \|\mathbf{Z}\|_* + \lambda \|\mathbf{N}\|_{2,1} \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{F} = \mathbf{FZ} + \mathbf{N} \end{aligned} \quad (6)$$

至此,问题式(6)可通过不精确增量拉格朗日乘子法 (IALM) 求解^[18]。首先,添加辅助变量矩阵 $\mathbf{V}$,将式(6)转化为其等价形式

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{Z}, \mathbf{N}, \mathbf{V}} \quad & \|\mathbf{V}\|_* + \lambda \|\mathbf{N}\|_{2,1} \\ \text{s. t.} \quad & \mathbf{F} = \mathbf{FZ} + \mathbf{N}, \mathbf{Z} = \mathbf{V} \end{aligned} \quad (7)$$

然后,引入拉格朗日乘子 $\mathbf{L}_1$ 和 $\mathbf{L}_2$,将式(7)转化为其无约束形式

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{Z}, \mathbf{N}, \mathbf{V}, \mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2} \quad & \|\mathbf{V}\|_* + \lambda \|\mathbf{N}\|_{2,1} + \\ & \text{tr}[\mathbf{L}_1^T (\mathbf{F} - \mathbf{FZ} - \mathbf{N})] + \text{tr}[\mathbf{L}_2^T (\mathbf{Z} - \mathbf{V})] + \\ & \frac{\eta}{2} (\|\mathbf{F} - \mathbf{FZ} - \mathbf{N}\|_F^2 + \|\mathbf{Z} - \mathbf{V}\|_F^2) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\eta > 0$ 为惩罚因子。最后,通过在式(8)中依次迭代地更新某一变量(其他变量固定),就可解得谱通道噪声的最优估计矩阵 $\mathbf{N}^*$ 。

1.2 基于噪声水平估计的无效波段检测

在求得谱通道噪声的最优估计 $\mathbf{N}^*$ 后,可以对

各波段进行噪声水平估计。对于每一波段 j ,其所含噪声对应于 N^* 的第 j 列(记为 $[N^*]_{:,j}$),定义 $[N^*]_{:,j}$ 的 ℓ_2 范数为波段的噪声水平, T 为噪声波段的检测阈值。若

$$\|[N^*]_{:,j}\|_2 > T \quad (9)$$

则判定波段 j 为无效波段,应当予以剔除。不满足此条件时,则认为其噪声水平不显著,可予以保留。

由于不同高光谱数据受到的污染程度不尽相同,因此,应当根据不同数据的噪声分布特点设置显著性噪声水平的具体数值:当数据污染程度较高时, T 值较大,反之亦然。实际上, T 也代表了一个较高的噪声水平,通常情况下,可设为明显高于高光谱图像噪声水平平均值的某一数值。

2 实验与结果分析

为了验证本文算法的有效性,分别在模拟数据和真实的高光谱数据上进行实验。在现有的噪声水平估计方法中,方差估计法^[4]和小波估计法^[7]应用较为普遍,本文将同时实现这两种方法作为对比。另外,VBM3D法^[11]为现有的高光谱噪声估计中表现最好的方法之一,也作为对比方法。

2.1 模拟实验

在模拟实验中,选用高光谱数字图像采集试验仪(HYDICE)拍摄的Washington DC National Mall^[19]为基准图像。该数据的空间尺寸为 1280×307 像素,空间分辨率可达1 m;共含210个波段,去除水吸收波长范围(900~1400 nm)内的波段后,剩余191个波段可用。由于该数据成像质量较高,在模拟实验中将其作为无噪的参考图像^[8,21]。由于篇幅所限,取该数据的某一子集进行实验,其空间图像的尺寸为 256×256 像素,如图2(a)所示。

在参考图像上分别添加不同种类的噪声,获得待测试的含噪声的高光谱图像(简称含噪图像)。在加噪前,分别对各波段数据进行归一化处理。模拟实验中可添加的噪声包括

1)高斯噪声。分别为每个波段的图像加入零均值的高斯噪声,其方差随机取0~0.1之间,含噪波段示例如图3(a)所示。

2)椒盐噪声。在波段10~13上加入椒盐噪声,噪声比例为20%,如图3(b)所示。

3)条带噪声。在波段60~63上加入列条带噪

声,波段100~103上加入行条带噪声,如图3(c)(d)所示。条带宽度随机取1~3像素之间。

此外,还可在参考数据中加入仅含噪声的无效波段,用于验证本文算法对于噪声波段检测的有效性。

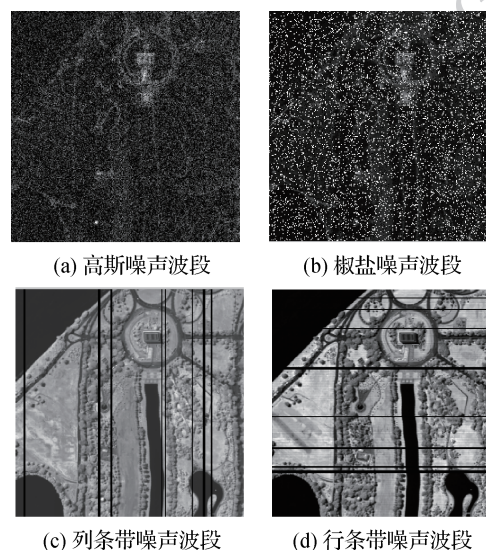


图3 模拟含噪数据

Fig. 3 The simulated noisy data

((a) Gaussian noise; (b) salt & pepper noise;
(c) column-corrupted stripes; (d) row-corrupted stripes)

在模拟高斯噪声的实验中,图4记录了不同方法下所有波段噪声水平的估计值和实际值的相对位置,如图4中“+”所示。横、纵坐标均为归一化后的值。

从图4可见,VBM3D法估计结果的分布较为分散,与实际情况的一致性较差;一些噪声水平原本较高的波段,其估计值反而较低,这一现象说明该方法因未考虑各波段差异而导致结果的鲁棒性较差。方差法和小波法的估计结果虽然与实际值的总体趋势一致,但仍然有一部分波段的估计结果不太准确,例如靠近横轴偏右的一些点,代表其相应波段所含的实际噪声水平较低,但估计值反而较高,这可能是由于单波段估计方法无法利用谱通道相关特性而造成的。相比其他方法,在图4(d)中,本文算法的估计点主要集中在直线 $y=x$ 附近,估计值与实际值之间具有良好的一致性,这说明本文算法能够兼顾波段间相关性及其差异,增强波段噪声水平估计结果的鲁棒性。

在模拟椒盐噪声的数据中,波段10~13被添加了20%的椒盐噪声,其他波段可视为无噪波段。图5为不同方法对各波段噪声水平的估计结果。可以看到,在含椒盐噪声的波段上,各类方法均能检测到明显的峰值,然而,其他波段的估计结果却有较大

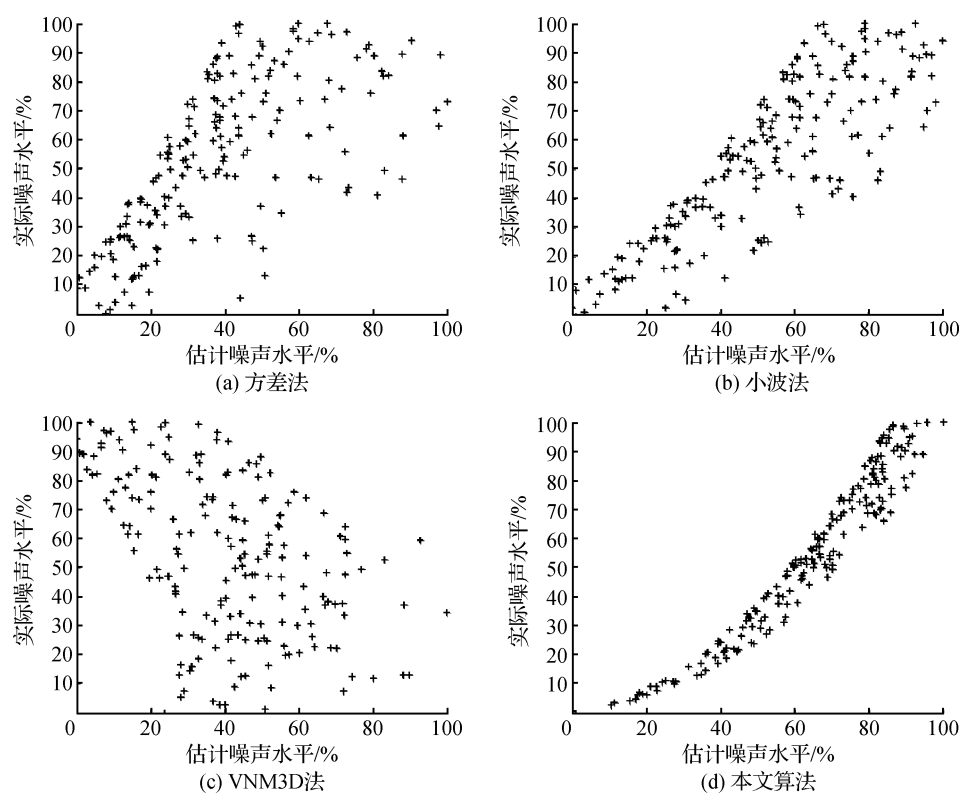


图4 高斯噪声水平估计

Fig. 4 Estimation of Gaussian noise ((a) variance; (b) wavelet; (c) VBM3D; (d) proposed method)

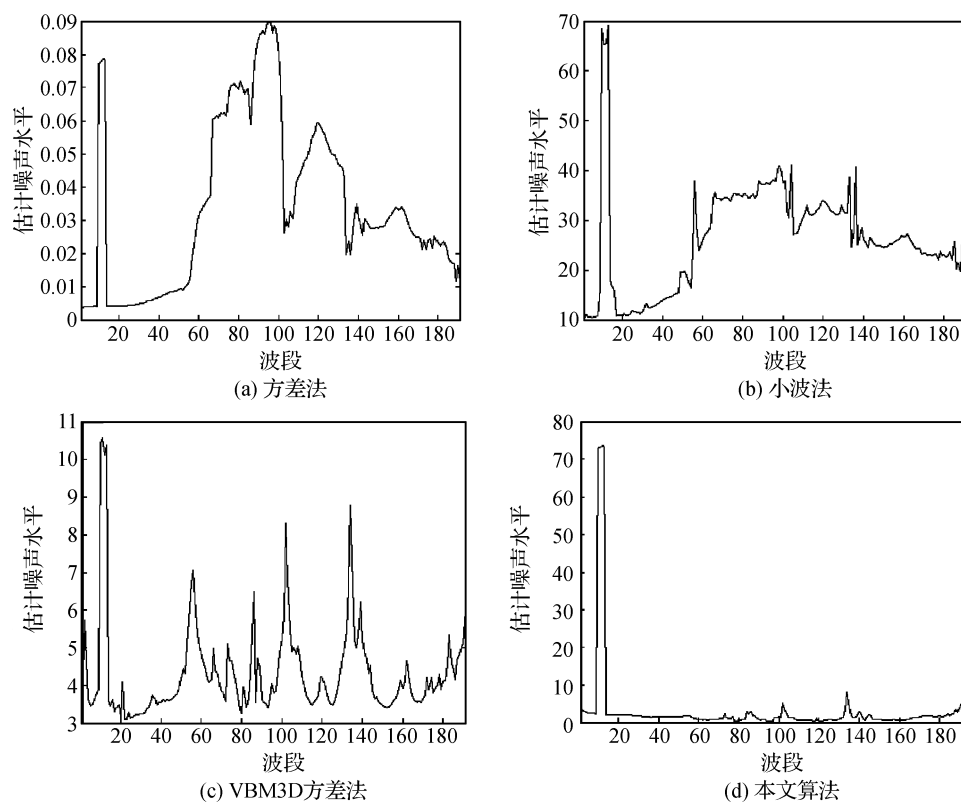


图5 椒盐噪声水平估计

Fig. 5 Estimation of salt & pepper noise ((a) variance; (b) wavelet; (c) VBM3D; (d) proposed method)

差异。前3种方法在一些无噪波段上检测出较高的噪声水平,尤其方差法在波段80~100之间检测的

噪声水平甚至超过了真正含噪的波段,这无疑会给噪声波段的检测带来干扰。相比这些方法,本文算法在检测出椒盐噪声波段的同时,也能正确地估计出低噪声的波段,这证明本文算法对于椒盐噪声估计和检测的有效性。

在模拟条带噪声的两组实验中,波段 60~63 和波段 100~103 分别加入了列损坏和行损坏的条带噪声。图 6 和图 7 分别为这两组实验的噪声估计结果。从图 6 和图 7 中可见,前 3 种方法对于稀疏的条带噪声均不敏感,真正含噪声的波段被淹没在其他无噪波段中,难以区分开来。而本文算法能够准确检测出条带噪声所在的波段位置,如图 6(d) 和图 7(d) 所示,波段 60~63 和波段 100~103 (含噪

波段)均出现了明显的峰值。这证明了本文算法对于条带噪声检测的有效性。

另外,在实际情况中,由于不同光谱通道的特性,一些波段(例如水吸收波段)可能无法反映地表的反射光谱信息,应该予以剔除。对此,本文设置了另一组模拟实验,用于检测高光谱图像中的无效波段。在参考图像的每个波段随机添加小幅的高斯噪声,然后在谱段末尾加入一个仅含噪声的波段,作为待测试的含噪数据。图 8 为本文算法对该数据噪声水平的估计结果。可以看出,尽管各波段都被高斯噪声所污染,但最后一个波段(波段 192)的噪声水平仍远大于其他波段,从而可被检测出来。这证明了本文算法对于噪声波段检测的有效性。

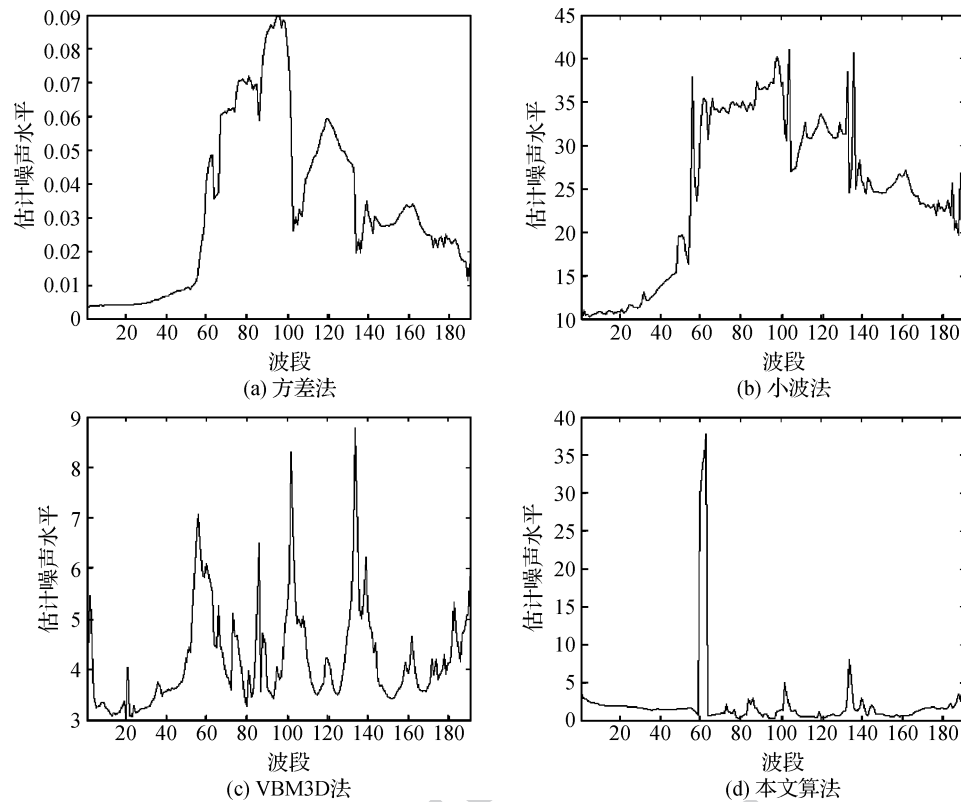


图 6 列条带噪声水平估计

Fig. 6 Estimation of column-corrupted strips ((a) variance; (b) wavelet; (c) VBM3D; (d) proposed method)

2.2 真实数据实验

为了验证算法的实用性,将在两组真实数据上对本文算法进行测试。这两组数据分别是由 Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) 高光谱传感器拍摄的 Salinas 场景和 Indian pines 场景^[20],如图 9 所示。实验 1 中,选取去除水吸收波段后的 Salinas 数据子集,其空间大小为 86×83 像

素,空间分辨率为 3.7 m/像素,用于验证噪声水平估计的有效性。实验 2 中,选取含 220 个波段(含水吸收波段)的 Indian pines 数据,其空间大小为 145×145 ,空间分辨率为 20 m/像素,主要用于验证噪声波段检测的有效性。

2.2.1 实验 1

图 10 为 Salinas 数据各波段的噪声水平估计结

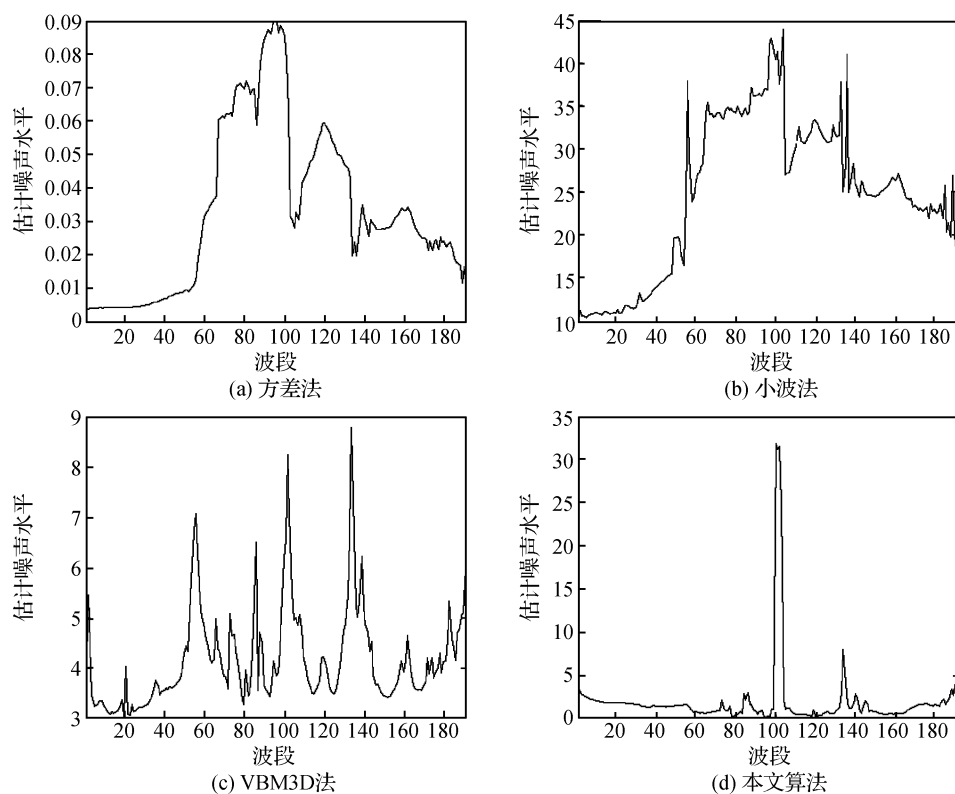


图7 行条带噪声水平估计

Fig. 7 Estimation of row-corrupted strips ((a) variance; (b) wavelet; (c) VBM3D; (d) proposed method)

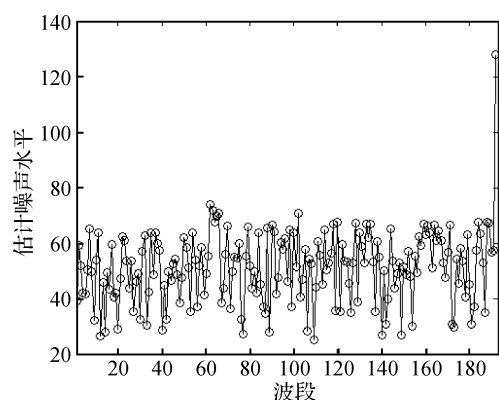


图8 无效波段检测

Fig. 8 Detection of the useless band

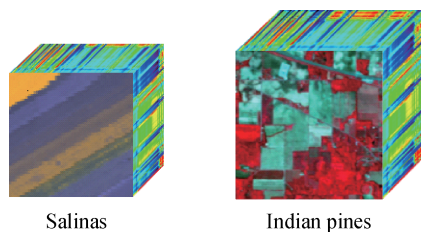


图9 真实高光谱数据

Fig. 9 Real hyperspectral data

果。可以看到,大部分波段噪声水平较低,仅前几个波段噪声水平较高。为了验证本文算法估计的噪声

水平与真实图像质量的一致性,图11选取了4个不同噪声水平的波段进行显示。可以看到,波段1的噪声水平估计值最高(12.65),该波段的图像受到了较强程度的污染,可视化信息基本被淹没在噪声里;波段3的噪声水平为6.57,其图像中含有一些较为明显的噪点;波段65和波段101的噪声水平估计值相对较低,几乎难以看出明显的噪声污染,图像细节也较为清晰。由此可知,本文算法的噪声水平估计值与高光谱图像的真实质量有很好的 consistency,证明了本文算法的有效性。

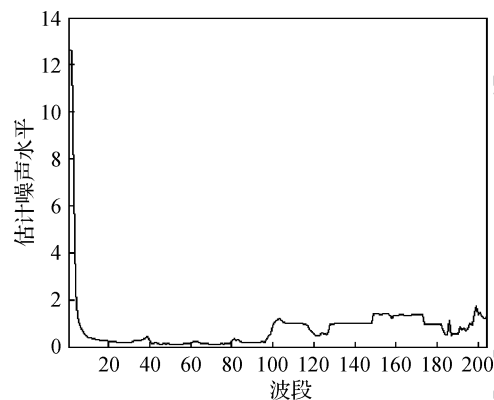


图10 Salinas 噪声水平估计

Fig. 10 Estimation of noise level on Salinas

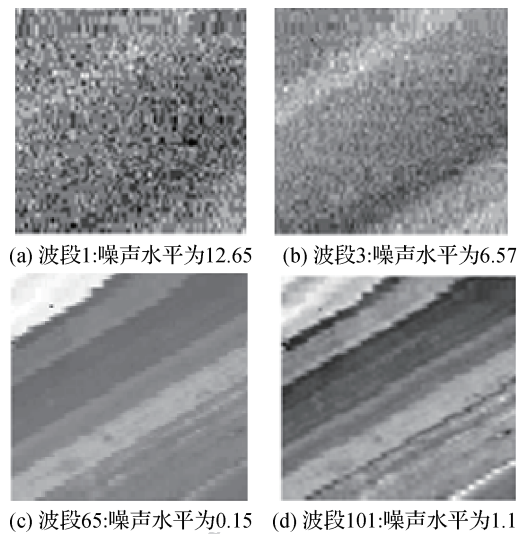


图 11 Salinas 不同波段的图像及其噪声水平估计
Fig. 11 Bands and their estimated noise levels of Salinas
((a) band 1; noise level is 12.65; (b) band 3; noise level is 6.57; (c) band 65; noise level is 0.15; (d) band 101; noise level is 1.10)

2.2.2 实验 2

为了进一步验证本文算法对于无效波段检测的有效性,在 Indian pines 数据大气校正前的 220 波段上进行实验,而将大气校正后的剩余波段数据(去除了水吸收波段 104 ~ 108,150 ~ 163 和 220)作为参考。

图 12 为各波段的噪声水平估计结果,其波段图像的噪声水平平均值为 5.44,由前所述,可选取远高于均值的某一值作为噪声波段检测的阈值 T 。表 1 为阈值取 12 ~ 17 时,检测的无效波段数目及其漏检率和准确率。从表 1 可见,在 $T \in [12,16]$ 时,漏检率为 0,准确率高于 80%。其中,当选取阈值 $T = 16$ 时,本文算法检测到的无效波段共 22 个,依次为波段 1,61,104 ~ 108,150 ~ 163,220。与参考数据相比较,可以发现,20 个水吸收波段被成功检测出来,证明了本文算法用于无效波段检测的有效性;另检出的两个波段(波段 1 和 61),其成像质量均较差,如图 13(a)(b)所示,波段 1 几乎被噪声淹没,波段 61 包含较多的噪点,图像细节均出现丢失或严重的模糊现象,而这两个波段的噪声水平估计值依次为 27.55 和 18.69。对于噪声水平较低的波段,例如中的波段 120、180,其噪声水平估计值分别为 1.63 和 1.98。如图 13(c)(d)所示,这两个波段的图像边缘清晰,细节丰富,几乎看不到明显的噪点,这进一步证明了本文算法的正确性。

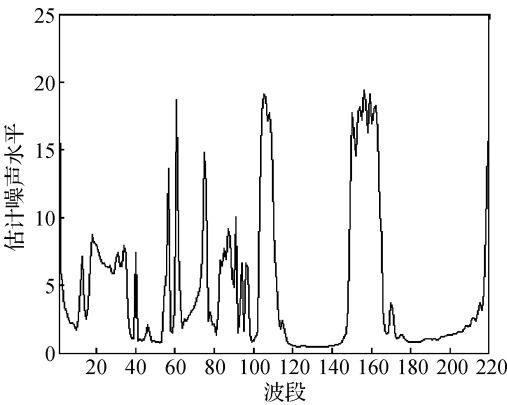


图 12 Indian pines 噪声水平估计
Fig. 12 Estimation of noise level on Indian pines

表 1 不同阈值下的无效波段检测

Table 1 Useless band detection with different thresholds			
阈值 T	无效波段数	漏检率/%	准确率/%
12	25	0	80.00
13	25	0	80.00
14	25	0	80.00
15	23	0	86.96
16	22	0	90.91
17	16	25	93.75

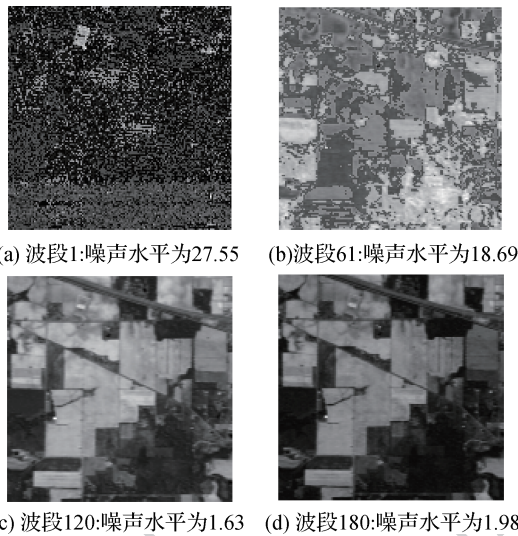


图 13 Indian pines 不同波段的图像及其噪声水平估计
Fig. 13 Bands and their estimated noise levels of Indian pines
((a) band 1; noise level is 27.55; (b) band 61; noise level is 18.69; (c) band 120; noise level is 1.63; (d) band 180; noise level is 1.98)

3 结 论

针对多数高光谱图像各波段噪声水平并不均衡

的现象,提出了一种基于低秩表达的噪声水平估计算法。该算法从高光谱图像的波段相关性中挖掘了数据的低秩特性,利用这一特性建立低秩矩阵模型进行噪声水平估计。为了表现各波段噪声水平的差异,算法针对噪声分布的特点,在低秩表达模型中选取了合适的正则化策略,有助于提高谱通道噪声估计的准确性。通过多组模拟和真实数据实验证明,本文算法具有较高的准确性和更强的鲁棒性。

本文从噪声分析的角度,为无参考的高光谱图像质量评价提供了一个新的思路。本文算法适用于波段间相关性较强的多波段图像,其评价结果与专家知识或人工判读具有良好的一致性,从而有利于高光谱图像的后续应用。需要注意的是,由于本文算法利用多波段图像间的相关性建立低秩表达模型,因此高光谱图像需要预先进行几何校正,以保证多波段图像的空间配准。

参考文献 (References)

- [1] Yuan Y, Zheng X T, Lu X Q. Spectral-spatial kernel regularized for hyperspectral image denoising[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53 (7): 3815-3832. [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2385082]
- [2] Yuan Q Q, Zhang L P, Shen H F. Hyperspectral image denoising with a spatial-spectral view fusion strategy[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52 (5): 2314-2325. [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2259245]
- [3] Liu X F, Bourennane S, Fossati C. Nonwhite noise reduction in hyperspectral images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(3): 368-372. [DOI: 10.1109/LGRS.2011.2169041]
- [4] 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. [DOI: 10.1016/0034-4257(93)90061-2]
- [5] Gao L R, Zhang B, Zhang X, et al. A new operational method for estimating noise in hyperspectral images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(1): 83-87. [DOI: 10.1109/LGRS.2007.909927]
- [6] Martiín-Herrero J. Comments on "A new operational method for estimating noise in hyperspectral images"[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4): 705-709. [DOI: 10.1109/LGRS.2008.2004214]
- [7] Chang S G, Yu B, Vetterli M. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(9): 1532-1546. [DOI: 10.1109/83.862633]
- [8] Zhao Y Q, Yang J X. Hyperspectral image denoising via sparse representation and low-rank constraint[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53 (4): 296-308. [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2321557]
- [9] Xu D, Sun L, Luo J S. Noise estimation of hyperspectral remote sensing image based on multiple linear regression and wavelet transform[J]. Boletim de Ciências Geododésicas, 2013, 19(4): 639-652. [DOI: 10.1590/S1982-21702013000400008]
- [10] Dabov K, Foi A, Egiazarian K. Video denoising by sparse 3D transform-domain collaborative filtering[C]//Proceedings of the 15th European Signal Processing Conference. Poznan: IEEE, 2007: 145-149.
- [11] Liu G C, Lin Z C, Yu Y. Robust subspace segmentation by low-rank representation[C]//Proceedings of the 26th International Conference on Machine Learning. Haifa: ICML, 2010: 663-670.
- [12] Candès E J, Li X D, Ma Y, et al. Robust principal component analysis? [J]. Journal of the ACM, 2011, 58 (3): 11:1-11. [DOI: 10.1145/1970392.1970395]
- [13] Candès E J, Plan Y. Matrix completion with noise[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98 (6): 925-936. [DOI: 10.1109/JPROC.2009.2035722]
- [14] Liu G C, Lin Z C, Yan S C, et al. Robust recovery of subspace structures by low-rank representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35 (1): 171-184. [DOI: 10.1109/TPAMI.2012.88]
- [15] Zhang B, Gao L R. Hyperspectral Image Classification and Target Detection[M]. Beijing: Science Press, 2011. [张兵, 高连如. 高光谱图像分类与目标探测[M]. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [16] Tang Z Q, Fu G Y, Chen J, et al. Multiscale segmentation-based sparse coding for hyperspectral image classification[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23 (9): 2708-2714. [唐中奇, 付光远, 陈进, 等. 基于多尺度分割的高光谱图像稀疏表示与分类[J]. 光学精密工程, 2015 23 (9): 2708-2714.] [DOI: 10.3788/OPE.20152309.2708]
- [17] Tang Z Q, Fu G Y, Yu X, et al. A class-Oriented model for hyperspectral image classification through hierarchy-tree-based selection[C]//The 2nd International Symposium on Computer Vision in Remote Sensing. Xiamen, China: CVRS, 2015.
- [18] Lin Z C, Chen M M, Ma Y Q, et al. The augmented Lagrange multiplier method for exact recovery of corrupted low-rank matrices[R]. UIUC Technical Report UILU-ENG-09-2215, 2009.
- [19] AVIRIS data [DB/OL]. [2015-11-30]. <https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/hyperspectral.html>.