

各向同性同质区域选取的高光谱遥感图像噪声估计方法

孙鑫 傅鹏 孙权森

(南京理工大学计算机科学与工程学院, 南京, 210094)

摘要: 在现有高光谱遥感图像噪声估计方法中, 同质区域的选取通常是最关键的步骤, 有效的同质区域选取方法能够提高图像的噪声估计精度。本文充分利用了高光谱遥感图像中丰富的空间信息和光谱信息, 提出了一种各向同性同质区域选取算法, 其中, 为了更好地区分同质区域内像元相似度, 构造了一种新的兰氏-光谱角度量; 结合基于多元线性回归的去相关法, 通过最优区域评估高光谱遥感图像噪声水平。利用不同结构及信噪比的模拟图像和真实高光谱遥感图像进行实验, 通过与现有的多种噪声估计方法比较, 验证了本文方法在针对不同噪声水平、不同复杂程度的图像时更加准确和稳定。

关键词: 高光谱图像; 噪声估计; 多元线性回归; 光谱相似性度量; 同质区域选取

中图分类号: TN751 **文献标志码:** A

Noise Estimation Based on Isotropic Homogeneous Region Detection in Hyperspectral Images

Sun Xin, Fu Peng, Sun Quansen

(School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094, China)

Abstract: It often plays a key role to extract homogeneous regions in the existing noise estimating methods for hyperspectral images (HSI). An effective homogeneous region detection method can improve the accuracy of image noise estimation. An isotropic homogeneous region detection algorithm (IHRDA) is proposed by using spatial information and spectral information, where a new Lance-SAD metric (LSM) is constructed to distinguish the similarity of picture elements in the homogeneous regions; then the noise level of hyperspectral images is estimated using the optimal regions with decorrelation based on multivariable linear regression (MLR) model. In experiments, synthetic images with different structure under different signal to noise ratio (SNR) and true hyperspectral remote sensing images are both compared with many existing methods, which show that the proposed method is more accurate and stable for hyperspectral images with various complexities and different noise levels.

Key words: hyperspectral image; noise estimation; multivariable linear regression; spectral similarity metrics; homogeneous region detection

引言

高光谱遥感图像是成像光谱仪对地物目标的成像结果。对比于普通的遥感图像,高光谱遥感图像具有更高的光谱分辨率。在为地物的分析处理提供更加详尽信息的同时,也因为波段较窄,能量密度较小,图像的噪声影响更加严重^[1]。准确的噪声水平估计可以为图像的后续处理算法提供先验参数,如图像分类^[2]、图像去噪^[3]、图像复原^[4]等。高光谱遥感图像中噪声类型复杂。噪声从构成机理上一般分为电噪声与光噪声等。根据噪声的表现形式,噪声又可以简单地分为随机噪声和周期噪声。图像中的周期噪声可以通过技术方法有效去除^[5],而随机噪声对图像质量和图像可判读性的影响一直存在,无法彻底消除。本文中讨论的噪声为随机噪声,即电噪声。

高光谱遥感图像中随机噪声通常被模拟为加性高斯白噪声,属于信号无关噪声,评估过程中采用高斯分布的标准差进行噪声水平衡量^[6]。对于一幅高光谱图像,噪声的公式表示如下

$$z(i, j, b) = s(i, j, b) + n(i, j, b) \quad (1)$$

式中 (i, j) 表示空间坐标, b 表示波段号, z 表示图像信号, s 表示无噪信号, n 表示噪声信号。

基于上述噪声模型以及高光谱遥感图像地物类型复杂,波段数多的特点,目前已有的多种噪声估计方法通常采用同质区域以及残差分析的方法对噪声进行评估^[7-15]。不同同质区域代表着各种类型的地物,区域内像元满足服从同一分布,在高光谱遥感图像中表现为空间上相邻,光谱上高度相关。有效的同质区域选取能够提高后续的噪声估计准确度。为了选取合适的同质区域,现有研究中多数采用基于规则均匀块或像元光谱匹配分割的方法,选取的同质区域常常存在大量边缘纹理信息,且往往存在过分割现象^[16];同时现有方法在残差分析过程中,利用区域残差通过直方图法、均值法等评估全图各波段的噪声水平,忽略了全图噪声的统计特性,降低了图像的噪声参数计算准确度。

针对上述问题,本文由同质区域的选取和噪声参数评估两个方面进行了深入研究。本文提出的区域选取算法以兰氏-光谱角度量尺度为基础提高了像元光谱间相似度分辨力,并从粗-精选取两步框架上保证了同质区域内各向同性,较好地去除了空间相关性;随后利用图像的光谱相关性,结合多元线性回归模型进行去相关得到同质区域的噪声标准差,并根据同质区域相对于全图的统计特性,利用选取出的最优区域噪声标准差评估图像的噪声强度,避免了传统算法中奇异区域对评估结果的不利影响。

1 噪声估计方法

本文方法主要分为两步:(1)首先通过粗-精选取框架选取出各向同性的同质区域;(2)随后对各区域回归计算噪声标准差,并选出最优区域评估图像噪声强度。方法流程如图1所示。

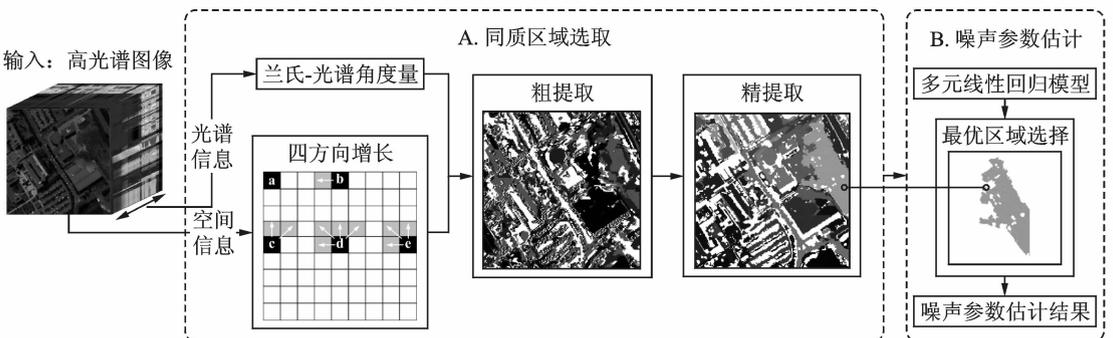


图1 本文方法流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed method

1.1 同质区域选取

同质区域通常指图像中包含同一类地物的区域。高光谱遥感图像中的同质区域内像元具有很强的空间相关性与光谱相关性^[17]。本文提出的同质区域选取算法充分利用了这两个特点,提高了同质区域的选取准确度。对于空间相关性,本文选取算法采用四方向增长和区域合并的思想^[18],主要分为同质区域粗选取和精选取两步框架,选取出各向同性的同质区域。光谱的相似性度量是同质区域选取的重要环节,多数传统算法使用的是光谱角距离来度量光谱间的相似性,然而实际中光谱角距离虽然能反映两条光谱曲线的波形总相似性,但对数值的变化不敏感。为了解决上述问题,本文提出了一种新的光谱相似性度量方法,称为兰氏-光谱角相似性度量。算法公式如下

$$LD = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \frac{|t_b - r_b|}{|t_b| + |r_b|} \quad (2)$$

$$SAD = \frac{\sum_{b=1}^B t_b r_b}{\sqrt{\sum_{b=1}^B t_b^2 \sum_{b=1}^B r_b^2}} \quad (3)$$

$$LSM(t, r) = LD \times \cos^{-1}(SAD) \quad (4)$$

式中: t 和 r 分别表示需要度量的目标光谱和参考光谱, B 为波段数。公式中兰氏距离部分 LD 度量了光谱间的亮度差异,对图像中亮度的变化敏感。式中光谱角距离 SAD 则对两条对比光谱曲线的形状差异进行了描述。通过距离度量与形状度量的结合,兰氏-光谱角相似性度量能够比较全面的表征两条光谱向量的相似度。兰氏-光谱角距离越小,表明两条曲线越相似,两条完全重合的光谱曲线的度量值应为0。结合兰氏-光谱角相似性度量,本文提出的同质区域选取算法伪代码如算法1所示。

算法1. 基于各向同性的同质区域选取

(1) 粗选取

表示注释

输入:高为 H ,宽为 W ,波段数为 B 的高光谱遥感图像 HSI ,粗选取阈值 ξ_1

输出:粗选取区域标号矩阵 S_1 ,大小为 $W \times H$,表示每个像元的区域号

初始化: $S_1(1,1)=1$

while S_1 中存在未分配区域号的点

$I(i,j)=\text{Scan}(HSD)$ # 图像逐行扫描, I 为光谱

$[M,(a,b)]=\text{Min}(LSM4(I(i,j)))$ # 四方向增长^①

if $M < \xi_1$ # 小于阈值说明光谱相似程度满足

$S_1(i,j)=S_1(a,b)$ # 两点属于同一个同质区

else # 大于阈值说明光谱相似程度过小

$S_1(i,j)=\text{Max}(S_1)+1$ # (i,j) 点应属于新区域

end

end

①四方向增长:计算光谱 $I(i,j)$ 与其左、左上、上、右上4个方向光谱曲线的相性度量,得到度量最小值 M ,以及最小值对应位置 (a,b)

(2) 精选取

表示注释

输入:粗选取区域标号矩阵 S_1 ,细选取阈值 ξ_2 ,奇异区域去除阈值 ξ_3

输出:区域标号矩阵 S

初始化: $S_1=\{s_1,s_2,\dots,s_f\}$ # S_1 由 f 个区域组成

while 区域间距离均大于细选取阈值

$I_k = \text{mean}(s_k)$, $k=1,2,\dots,f$ # I 为区域平均光谱

$[I_i, I_j] = \text{extract}(I_k)$ # 从所有平均光谱中取两条光谱

if 区域 s_i 与 s_j 相邻且 $LSM(I_i, I_j) < \xi_2$

merge(s_i, s_j) # 合并为一个区域

end

$S_1 = \text{sort}(S_1)$ # 对区域号重新排序标记

refresh(f) # 更新区域数 f

end

while $i < f$

$i = i + 1$ # 更新区域号

if $\text{num}(s_i) < \xi_3$ # num 表示每个区域包含像元个数

剔除 s_i # 去除过小区域

end

end

$S = \text{sort}(S_1)$ # 对区域号重新排序标记

阈值的选择影响着同质区域的选取效果。阈值 ξ_1 和 ξ_2 过大,会导致粗选取过程中不同区域归为一个区域,产生的区域结构纹理复杂。过小的 ξ_1 和 ξ_2 则会产生大量零碎小区域,小区域由于内部像元数量过少,在不满足阈值 ξ_3 时被剔除。根据实验分析,本文中阈值设置为: $\xi_1=0.022, \xi_2=0.005, \xi_3=50$ 。

1.2 噪声参数估计

通过上述方法得到多个同质区域后,每个区域内可认为是由相同类型地物构成,且具有较少纹理边缘。在区域内每个波段的像元点与其相邻波段点之间具有强相关性,根据其灰度值可以得到一条连续的光谱曲线,同时噪声可以认为是随机分布、谱段间不相关的^[19]。根据上述两点,去相关法可以通过回归计算得到区域的噪声标准差。对于每个同质区域可以进行如下处理:通过式(5)的多元线性回归得到待计算波段像元的灰度预测值 $\hat{x}_{p,k}$,去除具有强相关性的信号;随后利用预测值与真实值计算残差 $r_{p,k}$;最后将得到的残差根据式(7)对区域噪声标准差 σ 进行无偏估计。

$$\hat{x}_{p,b} = ax_{p,b-1} + bx_{p,b+1} + c \quad (5)$$

$$r_{p,b} = x_{p,b} - \hat{x}_{p,b} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{(m-3)^{-1} \sum_{p=1}^m r_{p,b}^2} \quad (7)$$

式中 $x_{p,b}$ 为该同质区在波段 b 上第 p 个像元灰度值。 m 是该同质区域内像元个数。 a, b, c 为多元线性回归系数。

不同于传统的规则图像块,同质区域内的像元灰度值在阈值允许范围内,可以近似看作服从同一个分布,传统算法中用平均值或者直方图的方法估计全图标准差不再适用。对于一个选取效果较好的同质区域,区域内像元数越少,统计意义越小,实际中的噪声估计也会偏低,因此为了找到能够准确代表图像噪声水平的区域标准差,本文提出了一种最优同质区域评估法,分为以下3步:

(1) 奇异区域剔除:设置噪声标准差阈值,噪声标准差小于该阈值的区域认为无统计意义并剔除。阈值计算公式如下

$$\zeta_\sigma = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \alpha \sigma_n \quad (8)$$

式中: N 表示图像中同质区域个数, n 为区域标号, α 是剔除系数,通过实验结果对比本文设置 $\alpha=0.7$ 。

(2) 最优区域选取:对于满足式(7)的同质区 C' , 确定为需要的最优同质区。

$$C' = \operatorname{argmax}(\operatorname{num}(C_n)) \quad n=1, 2, \dots, N' \quad (9)$$

式中: num 表示同质区域内像元个数, N' 为剔除后的同质区域个数。

(3) 图像噪声估计:用选出的最优区域噪声标准差代表该图像的噪声强度。 C' 存在多个时,取所有最优区域噪声标准差均值。

2 实验及分析

本文实验分为模拟图像实验比较部分和真实数据实验比较部分。在模拟图像实验部分对高光谱图像加入不同强度噪声,比较本文方法与现有多种方法的噪声估计准确性;在真实数据实验部分,通过对不同复杂度图像的噪声估计,验证本文方法的评估稳定性。

2.1 模拟图像实验

本部分实验利用真实光谱曲线生成了3幅大小为128像素×128像素,包含102个波段的模拟图像,如图2(a-c)所示。其中真实光谱曲线随机提取于帕维亚中心上空拍摄的ROSIS图像。

2.1.1 模拟图像同质区域选取结果

对于3幅模拟图像,本部分实验比较了文献[13]中OSA与本文各向同性同质区域选取的结果比较

如图 2 所示。从选取结果上分析,OSA 法选取出的同质区垂直方向一致性较差,区域会被过度分割成多个区域,该现象对于“凸”型结构的目标影响尤为明显。本文 IHRDA 方法的两步选取框架以及兰氏-光谱角相似性度量保证了区域选取的各向一致性,因此选取出的同质区域准确度更高。

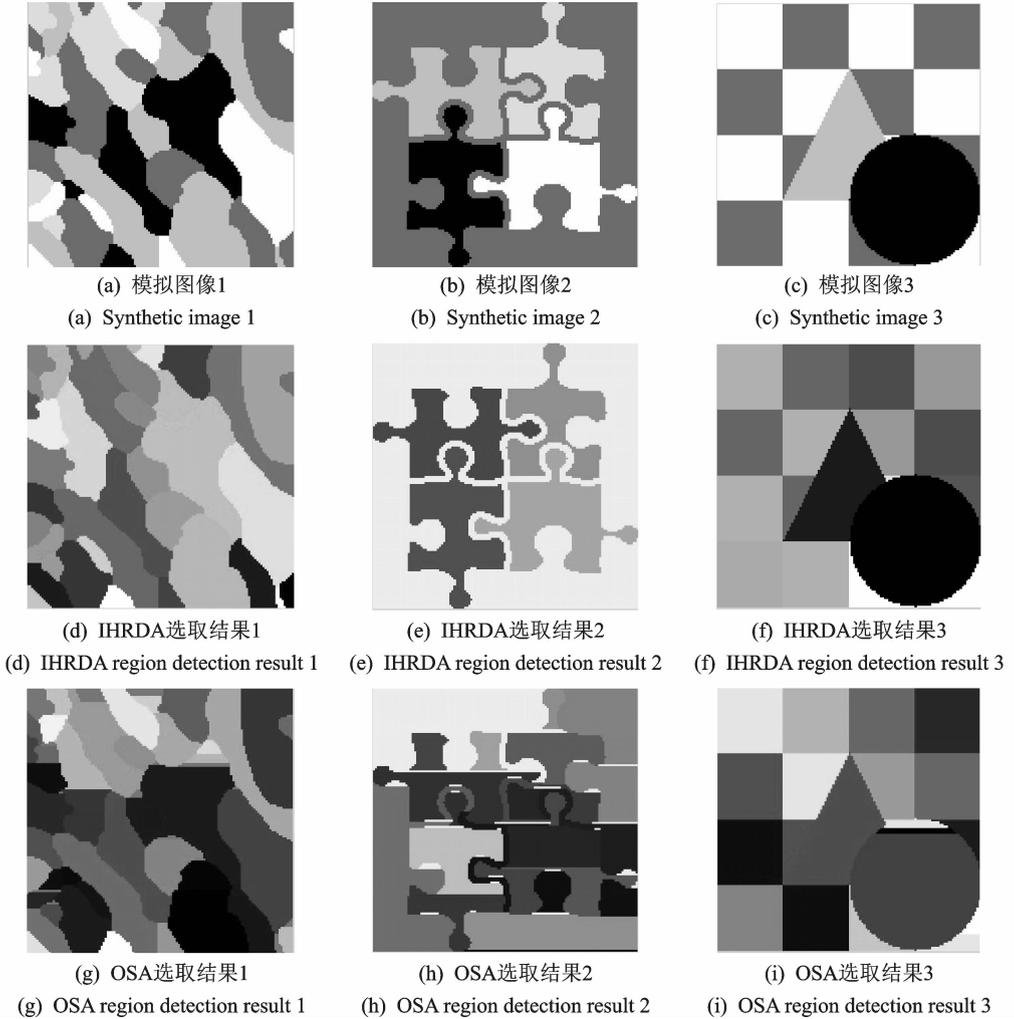


图 2 模拟图像第 40 波段及两种方法的选取结果

Fig. 2 Band 40 of synthetic images and the corresponding homogeneous region detection results by the two algorithms

2.1.2 模拟图像噪声参数计算结果

实验中为了在高光谱各波段图像中准确加入噪声,将模拟图像灰度值归一化为 0~1 之间,并引入信噪比作为噪声指标。信噪比公式如下

$$SNR_b = 20 \log \frac{M_b}{\sigma_b} \tag{10}$$

式中: M_b 为波段 b 图像灰度均值, σ_b 为图像中噪声标准差。根据信噪比可以确定加入噪声的强度。本部分实验通过对模拟图像加入 3 种不同水平的噪声水平(表示为噪声 1、噪声 2、噪声 3),使得图像各波段数据的信噪比分别为 15,25,35 dB。同时为了对噪声估计结果进行定量分析,实验采用了绝对误差均

值计算结果。公式如下

$$\text{MAE}(\sigma_b, \bar{\sigma}_b) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B |\sigma_b - \bar{\sigma}_b| \quad (11)$$

式中 σ_b 和 $\bar{\sigma}_b$ 分别为图像波段 b 的真实噪声标准差与评估方法得到的噪声标准差。

实验中比较了本文与文献[7-15]方法。从表 1 的评估结果中可以看出,文献[7,9,10,14]方法仅通过对图像空间信息进行分析处理,忽视了光谱信息,导致评估结果精度较低。文献[15]方法则由于缺少对高光谱遥感图像中同质区域的选取,计算的噪声估计结果也不准确。文献[8,11,12,13]方法以及本文方法利用了高光谱遥感图像中光谱相关性,考虑了图像中区域内一致性,得到较好的评估结果。从实验结果看,在这 5 种方法里,本文方法的噪声估计精度高于其他四种方法。图 3 详细比较了这 5 种准确度较高的方法。文献[8,11,12]方法在图像划分时采用的是规则图像块划分,内部由服从不同分布的多个同质区域组成,这种随机性导致通过回归预测得到的像元无噪信号值是不准确的。因此这 3 种方法使用了均值或者直方图区间均值的方式,降低了随机性,而不是从图像块区域样本估计图像总体的方向,对全图噪声进行评估,导致最终噪声的评估精度低于本文方法。同时文献[11]的方法中认为实际相邻像素间的关系是非线性的,采用了相关向量机去相关。然而实际情况中,很可能因为回归过程中的欠拟合或者过拟合,造成实际评估偏大或者偏小。文献[13]选取出了同质区域,但在噪声参数估计方面使用了标准差均值的方法。结合图 2 及表 1 可以看出,标准差均值法在同质区域选取效果较差时(如图 2(h)),能够降低误选取造成的噪声估计偏差。但另一方面在选取效果较好时(如图 2(g,i)),该方法评估精度远低于本文中最优区域法。

表 1 噪声估计结果

Tab. 1 Results of noise estimation

方法	模拟图像 1			模拟图像 2			模拟图像 3		
	噪声 1	噪声 2	噪声 3	噪声 1	噪声 2	噪声 3	噪声 1	噪声 2	噪声 3
本文	1.20×10^{-3}	7.14×10^{-4}	2.11×10^{-4}	2.81×10^{-3}	2.21×10^{-4}	4.86×10^{-5}	6.67×10^{-3}	3.44×10^{-4}	1.20×10^{-4}
文献[7]	6.24×10^{-2}	1.82×10^{-2}	2.65×10^{-3}	6.51×10^{-2}	1.87×10^{-2}	2.10×10^{-3}	7.08×10^{-2}	2.12×10^{-2}	4.14×10^{-3}
文献[8]	6.77×10^{-3}	1.56×10^{-3}	5.27×10^{-4}	4.02×10^{-3}	1.35×10^{-3}	4.84×10^{-4}	3.92×10^{-2}	1.33×10^{-2}	4.07×10^{-3}
文献[9]	6.69×10^{-2}	1.78×10^{-2}	5.40×10^{-3}	6.53×10^{-2}	2.01×10^{-2}	6.47×10^{-3}	1.82×10^{-2}	3.78×10^{-3}	1.37×10^{-3}
文献[10]	4.46×10^{-2}	1.26×10^{-2}	4.02×10^{-3}	2.42×10^{-2}	6.54×10^{-3}	1.84×10^{-3}	5.86×10^{-2}	1.54×10^{-2}	4.70×10^{-3}
文献[11]	1.12×10^{-2}	2.60×10^{-3}	6.12×10^{-4}	7.60×10^{-3}	1.69×10^{-3}	3.32×10^{-4}	2.73×10^{-2}	7.70×10^{-3}	2.36×10^{-3}
文献[12]	1.27×10^{-3}	1.31×10^{-3}	8.40×10^{-4}	3.12×10^{-3}	2.04×10^{-3}	8.83×10^{-4}	1.66×10^{-2}	4.47×10^{-3}	1.30×10^{-3}
文献[13]	1.15×10^{-2}	1.88×10^{-3}	5.77×10^{-4}	7.22×10^{-3}	1.30×10^{-3}	4.87×10^{-4}	2.69×10^{-2}	6.75×10^{-3}	2.27×10^{-3}
文献[14]	2.63×10^{-2}	6.24×10^{-3}	1.79×10^{-2}	2.32×10^{-2}	3.43×10^{-3}	8.76×10^{-3}	4.98×10^{-2}	1.01×10^{-2}	1.00×10^{-3}
文献[15]	1.48×10^{-2}	5.32×10^{-3}	6.38×10^{-2}	9.40×10^{-3}	3.54×10^{-3}	1.68×10^{-3}	3.26×10^{-2}	9.72×10^{-3}	2.95×10^{-3}

2.2 真实数据实验

本部分实验中,为了验证本文算法对于不同复杂程度的真实高光谱遥感图像噪声估计的稳定性,从帕维亚大学上空拍摄的 ROSIS 图像中截取两幅图像用于真实数据实验,称为真实数据 1 和真实数据 2。图像数据包含 103 个波段,大小均为 256 像素 \times 256 像素。图 4 中显示了图像数据第 40 波段图像,可以看出真实数据 1 中场景大部分为河流沙滩,地理结构相对简单。真实数据 2 则包括更多地物建筑和更复杂边缘纹理。

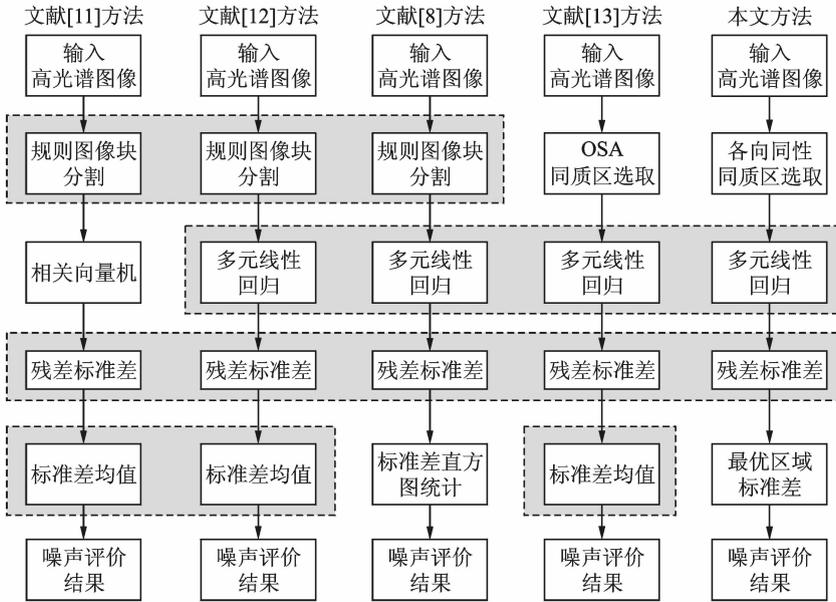


图 3 噪声估计方法比较

Fig. 3 Comparison of noise estimation methods

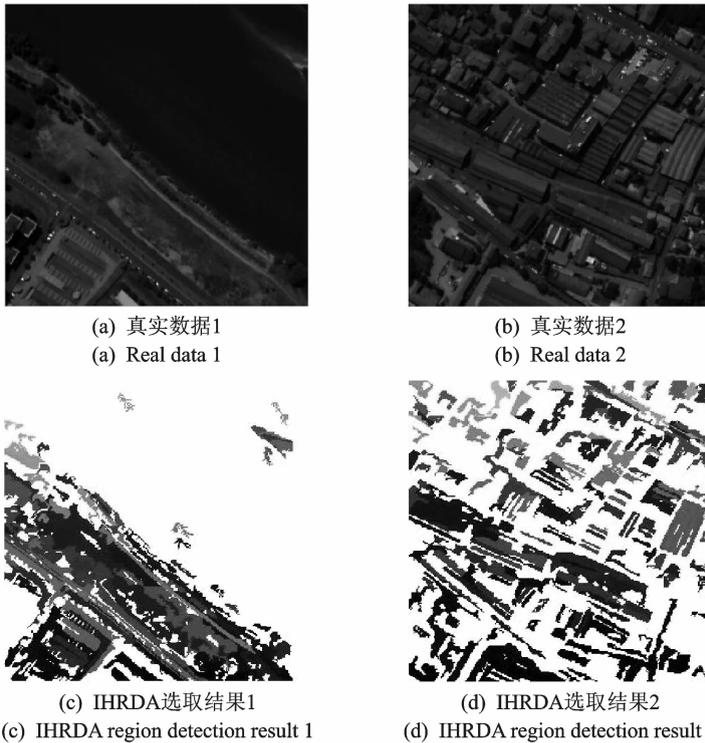


图 4 真实高光谱波段 40 数据以及同质区域选取结果

Fig. 4 Band 40 of real hyperspectral data utilized in the experiment and the corresponding homogeneous region detection results

实验中两幅图像选自同一幅高光谱图像,应处于相同的噪声水平下。利用本文方法与模拟实验部分噪声估计综合表现较好的文献[8]方法进行对比,结果如图5所示。图5对比结果可以看出对于不同复杂程度的图像,本文噪声估计结果一致性更好,验证了本文算法能够稳定地对高光谱遥感图像进行噪声强度评估。

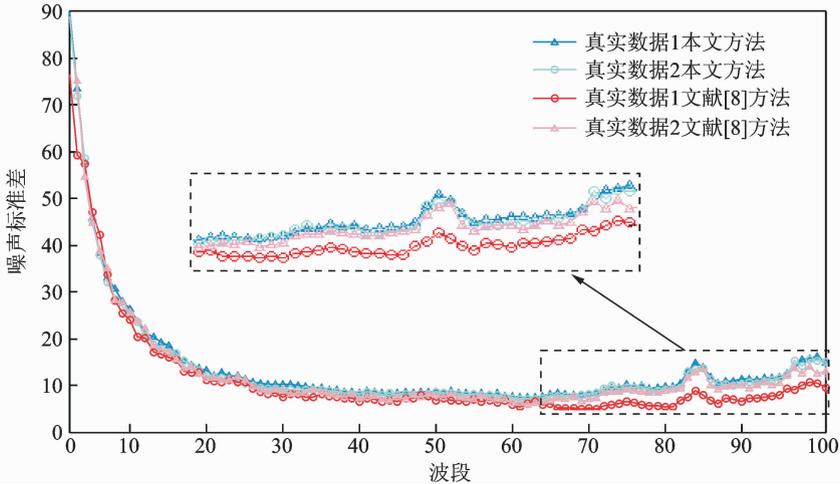


图5 本文方法与文献[8]方法的比较

Fig. 5 Comparison between the proposed method and the method in Ref. [8]

3 结束语

针对高光谱遥感图像噪声估计过程中,普遍存在的噪声估计精度不高,不同复杂程度图像评估稳定性差的问题,本文提出了一种新的噪声估计方法。通过构造各向同性同质区域选取法,结合兰氏-光谱角相似性度量选取相较于其他方法区域内一致性更好的同质区域。随后在同质区域中根据最优区域选取法选取最优区域,用最优区域噪声标准差评估得到更加准确的图像噪声参数。实验部分利用模拟图像与真实数据,证明本文算法优于其他前沿算法的计算精度,在处理不同强度噪声,不同复杂度地理环境图像时本方法均表现出很好的鲁棒性。需要指出的是本文算法充分利用了光谱信息,对于某些光谱相关性不强的波段,评估结果会产生偏差。如何解决这一问题将是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] Fu P, Li C, Xia Y, et al. Adaptive noise estimation from highly textured hyperspectral images[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(30):7059-7071.
- [2] Chen C, Li W, Tramel E W, et al. Spectral-spatial preprocessing using multihypothesis prediction for noise-robust hyperspectral image classification[J]. *Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing IEEE Journal of*, 2014, 7(4):1047-1059.
- [3] 王文豪, 高尚兵, 周静波, 等. 图像中椒盐噪声去除算法研究[J]. *数据采集与处理*, 2015, 30(5):1091-1098.
Wang Wenhao, Gao Shangbing, Zhou Jingbo, et al. Research on denoising algorithm for salt and pepper noise[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2015, 30(5):1091-1098.
- [4] Qian Y, Ye M. Hyperspectral imagery restoration using nonlocal spectral-spatial structured sparse representation with noise estimation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2013, 6(2):499-515.
- [5] Liu X, Bourennane S, Fossati C. Reduction of signal-dependent noise from hyperspectral images for target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2014, 52(9):5396-5411.

- [6] Gao L, Du Q, Zhang B, et al. A comparative study on linear regression-based noise estimation for hyperspectral imagery[J]. Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing IEEE Journal of, 2013, 6(2): 488-498.
- [7] Jiang P, Zhang J Z. Fast and reliable noise level estimation based on local statistic[J]. Pattern Recognition Letters, 2016, 78(C): 8-13.
- [8] Gao L. Residual-scaled local standard deviations method for estimating noise in hyperspectral images[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2007, 6787: 39.
- [9] Zhu B, Wang X, Li Z, et al. A new method based on spatial dimension correlation and fast Fourier transform for SNR estimation in remote sensing images[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium. Melbourne, Australia: IEEE, 2013: 4114-4117.
- [10] Qin B, Hong B, Zhang Z, et al. A generally applicable noise-estimating method for remote sensing images[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5): 481-490.
- [11] 王晓飞, 侯传龙, 阎秋静, 等. 基于相关向量机的高光谱遥感图像噪声估计算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4159-4163.
Wang Xiaofei, Hou Chuanlong, Yan Qiuqing, et al. Noise estimation algorithm based on relevance vector machine for hyperspectral imagery[J]. Laser and Infrared, 2014, 43(12): 4159-4163.
- [12] 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.
- [13] Gao L R, Zhang B, Zhang X, et al. A new operational method for estimating noise in hyperspectral images[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2008, 5(1): 83-87.
- [14] Azzari L, Foi A. Indirect estimation of signal-dependent noise with nonadaptive heterogeneous samples[J]. IEEE Transactions on Image Processing, A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 2014, 23(8): 3459-3467.
- [15] Xu D, Sun L, Luo J. Noise estimation of hyperspectral remote sensing image based on multiple linear regression and wavelet transform[J]. Boletim De Ciencias Geodesicas, 2013, 19(4): 639-652.
- [16] Martiín-Herrero J. Comments on "A new operational method for estimating noise in hyperspectral images"[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2008, 5(4): 705-709.
- [17] Erturk A, Cesmeci D, Gullu M K, et al. Endmember extraction guided by anomalies and homogeneous regions for hyperspectral images[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2014, 7(8): 3630-3639.
- [18] Geng X R, Zhang X, Chen Z C, et al. Classification algorithm based on spatial continuity for hyperspectral image[J]. Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2004, 23(4): 299-302.
- [19] He W, Zhang H, Zhang L, et al. Hyperspectral image denoising via noise-adjusted iterative low-rank matrix approximation [J]. Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing IEEE Journal of, 2015, 8(6): 3050-3061.

作者简介:



孙鑫(1994-),男,硕士研究生,研究方向:模式识别、高光谱图像处理, E-mail: 56991348@qq.com。



傅鹏(1986-),男,讲师,研究方向:模式识别、计算机视觉、高光谱图像处理。



孙权森(1963-),男,教授,研究方向:模式识别、计算机视觉、数据融合。

(编辑:张 彤)