

文章编号:1001-9014(2006)01-0029-04

高光谱图像光谱域噪声检测与去除的 DSGF 方法

王强¹, 束炯¹, 尹球²

(1. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:高光谱遥感图像中不仅存在空间域噪声而且存在光谱域噪声. 传统的图像滤波仅对图像空间域噪声进行处理, 而不能去除光谱域噪声, 为改进这种状况, 提出了 DSGF (Derivative based Savitzky-Golay Filter) 方法. 首先, 基于反射率光谱的二阶导数对反射率光谱各波段噪声大小进行判定, 然后用不同大小平滑窗的 Savitzky-Golay 滤波器对反射率光谱作两步滤波. 对高光谱图像进行的逐像元 DSGF 滤波, 在去除光谱域中噪声的同时, 保留了图像反射率光谱的大部分细微特征.

关键词:高光谱; 噪声; Savitzky-Golay 滤波; 光谱导数

中图分类号:TP751.1 **文献标识码:**A

DSGF METHOD ON DETECTING AND REMOVING SPECTRAL NOISE OF HYPERSPECTRAL IMAGE

WANG Qiang¹, SHU Jiong¹, YIN Qiu²

(1. Key Lab of GIS, Educational Ministry, ECNU, Shanghai 200062, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, China)

Abstract:Not only spatial noise but also spectral noise exists in hyperspectral images. Only spatial noise but no spectral noise is removed with traditional image filters. To improve this situation DSGF (Derivative based Savitzky-Golay Filter) method was presented here. First noise level of each especial band is determined based on the second derivative of reflectance, then reflectance is filtered twice by Savitzky-Golay filter sizes, which results in removing spectral noise in hyperspectral image. In the meanwhile most fine features of reflectance are remained after hyperspectral image is filtered pixel by pixel by DSGF filter.

Key words:hyperspectral; noise; Savitzky-Golay filter; spectral derivative

引言

在遥感图像数字处理中, 图像噪声的去除是一项较重要而基础的工作^[1]. 高光谱图像具有空间图像和地物光谱两个方面的信息, 因而噪声对高光谱图像的影响最终也会表现为空间域噪声和光谱域噪声两方面. 反射率转换是高光谱图像预处理的重要步骤之一^[2]. 由于高光谱图像成像时自然光照条件影响、地面地形影响、混合像元问题等原因引入各种噪声^[3], 这种噪声存在于光谱域中, 是需要检测并予以去除的.

Boardman, J W 针对这个问题提出了所谓 EF-

FORT 方法^[4]. EFFORT 方法通过高光谱图像本身的统计找到一种轻微的改正以使误差减小进而提高反射率的精度. John R. Jensen 也提到过这个问题, 他认为反射率转换后光谱中会存在相当大的噪声, 并采用一种 SSE 线性校正方法^[5], 将转换后反射率光谱拟合到实测地物光谱上, 以去除反射率光谱中噪声.

高光谱遥感图像中每波段的波段宽度仅为数纳米, 从图像中每个像元提取出的反射率曲线本身有一定的物理意义, 因而图像噪声在光谱域上的反映可以被识别出来. 本文提出了一种基于光谱导数分析的高光谱图像噪声去除方法 DSGF (Derivative

收稿日期: 2005-05-23, 修回日期: 2005-11-27

Received date: 2005-05-23, revised date: 2005-11-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40171088); 国家 863 应用与示范项目(2002AA134020); 上海市科委科技攻关计划项目(035115006); 上海市科委重大项目(04DZ19305)

作者简介: 王强(1978-), 男, 江西黎川人, 华东师范大学在读博士生, 现主要从事遥感、GIS 应用研究.

based Savitzky-Golay Filter). DSGF 方法通过对反射率光谱二阶导数的统计,得到光谱各波段中噪声的判定函数,在噪声较严重的波段进行较多点数的 Savitzky-Golay 滤波,对噪声不太严重的波段进行较少点数的 Savitzky-Golay 滤波。

1 Savitzky-Golay 滤波器机理分析

由于转换后像素光谱反射率曲线的噪声一般表现为锯齿状,因而噪声去除的过程也可以认为是光谱曲线平滑的过程。常用的曲线平滑法中,均值滤波器平滑法和加权平均法都没有考虑曲线本身的趋势,而最小二乘平滑法则假设曲线具有某种数学特性,并采用多项式拟合曲线趋势。

在曲线平滑方法中,Savitzky-Golay 滤波法是一种经典的最小二乘平滑方法,它使用简化的最小二乘拟合卷积方法对曲线进行平滑处理并可计算平滑后曲线各阶导数^[6]。

通常,可假设曲线为 p 次多项式,即

$$Y_i = a_0 + a_1 i + a_2 i^2 + a_3 i^3 + \dots + a_p i^p, \quad (1)$$

式中, Y_i 代表第 i 点平滑化后的数值。用上述多项式拟合曲线的误差为:

$$S = \sum_{j=-m}^m (Y_j - y_j)^2, \quad (2)$$

式中, y_i 代表平滑前的数值,平滑窗大小 $k = 2m + 1$ 。为使误差 S 为最小,需对 S 作偏微分,并使 S 的各项偏微分等于零,从而得出下式:

$$\frac{\partial S}{\partial a_0} = 2 \sum_{j=-m}^m (a_0 + a_1 j + a_2 j^2 + \dots + a_p j^p - y_j) = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial a_1} = 2 \sum_{j=-m}^m j (a_0 + a_1 j + a_2 j^2 + \dots + a_p j^p - y_j) = 0$$

...

$$\frac{\partial S}{\partial a_p} = 2 \sum_{j=-m}^m j^p (a_0 + a_1 j + a_2 j^2 + \dots + a_p j^p - y_j) = 0, \quad (3)$$

Savitzky 对整个求解过程进行了推导,给出了平滑窗中心点平滑后数值的最后公式及公式中系数的计算方法^[6]。Madden 改正了原 Savitzky-Golay 系数的一些错误,并给出了各阶导数平滑系数的计算公式^[7]。按 Madden 等的推导,平滑后曲线数值的最小二乘卷积方程可写为:

$$Y_j = \sum_{i=-m}^m P_i^{(0)} y_{j+i}, \quad (4)$$

式中, y 是原始光谱值, Y 是平滑后光谱值, $P_i^{(0)}$ 是平滑窗口中第 i 个光谱值的系数, j 是沿原始数据纵坐标数据列的计算点下标。零阶导数二次或三次

多项式拟合的任意点数平滑窗系数计算公式如下:

$$P_i^{(0)} = \frac{3(3m^2 + 3m - 1 - 5i^2)}{(2m + 3)(2m + 1)(2m - 1)}, \quad (5)$$

$$i = -m, \dots, 0, \dots, m$$

式中, m 为平滑窗的宽度的一半。使用 Madden 提供的方程可以计算零到六阶导数的最小二乘拟合卷积系数,从而计算光谱的零到六阶平滑后的导数值。

2 基于光谱导数分析的 Savitzky-Golay 方法

Savitzky-Golay 平滑滤波因为可保留光谱的一些细微特征(如光谱吸收峰),因此在光谱学中应用非常广泛,但由于光谱学中的数据是在严格的实验室控制条件下进行采集的,可近似认为数据的误差呈一定分布。而高光谱数据在成像时由于受自然光照条件、地面地形起伏、大气衰减和 CCD 镜头的工作状态等影响,数据的误差呈现不确定性。因此,在将光谱学中光谱处理方法应用在高光谱图像之前需要对高光谱图像像素光谱的噪声严重程度进行检测。

光谱导数技术(Spectral Derivative)包括对反射光谱进行数学模拟和计算不同阶数的导数值以迅速地确定光谱弯曲点及最大最小反射率的波长位置。光谱导数技术对光谱信噪比非常敏感。光谱的一阶、二阶导数计算公式如下^[8]:

$$\left. \frac{ds}{d\lambda} \right|_i \approx \frac{s(\lambda_i) - s(\lambda_j)}{\Delta\lambda}, \quad (6)$$

$$\left. \frac{d^2s}{d\lambda^2} \right|_j \approx \frac{s(\lambda_i) - 2s(\lambda_j) + s(\lambda_k)}{(\Delta\lambda)^2}. \quad (7)$$

其中 $\Delta\lambda = \lambda_k - \lambda_j = \lambda_j - \lambda_i$, $\lambda_k > \lambda_j > \lambda_i$ 。更高阶微分可通过迭代方法计算得到。研究表明,光谱的低阶导数处理对噪声影响敏感性较低,而高阶微分对噪声影响敏感度高^[8]。图 1 为灌木的地面实测光谱与该光谱的一阶、二阶导数。从图中可以看出一阶、二阶导数对噪声都比较敏感,但二阶导数则很好的反映了噪声的实际分布情况。因此可以考虑用光谱二阶导数对光谱曲线进行噪声影响程度检测。首先进行光谱二阶导数计算,笔者将二阶导数值 $s''(\lambda_i)$ 与其平均值 μ 之差和给定的某一阈值作比较,以判定该波段噪声的大小,从而确定该波段滤波平滑窗的大小。计算结果表明,对某一波段 i 而言,如果不等式

$$|s''(\lambda_i) - \mu| > \sigma, \quad (8)$$

成立的话,那么该波段反射率值认为是有较大噪声

存在,这里的 σ 是光谱二阶导数的标准差.

在噪声检测完成后,可以先采用较大平滑窗(如 11 点)的 Savitzky-Golay 滤波对较大噪声波段进行局部平滑,其他波段保持不变,得到初步滤波结果;然后采用较小平滑窗(如 5 点)的 Savitzky-Golay 滤波对初次滤波结果的光谱曲线进行整体平滑.这样既对光谱进行了平滑滤波与噪声去除,又最大程度的对光谱细节进行了保留.基于上述两步 Savitzky-Golay 滤波方法,对高光谱图像进行逐像元的光谱滤波后,进而完成了基于光谱导数分析的光谱域噪声去除.

3 方法的实际应用与精度分析

利用上面所提出的方法对上海 2003 年世博会区域 PHI 高光谱图像进行了滤波处理(该 PHI 高光谱图像在进行辐射校正等预处理后采用地面经验线性法转换成了反射率).具体处理步骤如下:

1. 从高光谱图像中逐像元的提取出光谱反射率曲线;
2. 计算反射率曲线的二阶导数;
3. 计算光谱二阶导数的均值与方差,按式(8)计算该像元每个波段的噪声判定系数;

4. 进行一次平滑,对噪声判定系数为 1 的波段值进行 11 点 Savitzky-Golay 平滑,其他波段值保持不变;

5. 进行二次平滑,对一次平滑后的光谱曲线进行 5 点的 Savitzky-Golay 平滑;

6. 提取下一点的光谱曲线并转入步骤(2),直到所有的像元处理完毕.

处理结果如图 2 所示.

从图 2 中可以看出,DSGF 方法对高光谱图像最大的作用首先体现在对光谱平滑上.反射率转换后的图像光谱曲线由于受各种噪声影响而呈现锯齿状(图 2B),在 400nm - 500nm 与 750nm - 980nm 之间波段尤其明显.经 DSGF 方法处理后,图像光谱在这两个光谱区间明显平滑许多(图 2D),同时可以看到,光谱曲线仍保持了一些如吸收峰等细微的光谱特征.图像光谱域中的噪声同时也会体现在空间域中,初始反射率图像的 114 波段与 115 波段之间的差值图像(图 2A)说明了这一点,而这种噪声从单波段的图像中是难以看出的.经 DSGF 方法处理后,这种噪声也基本上得以消除(图 2C).这说明经 DSGF 方法处理后的高光谱图像也对图像空间域质量有所改进,并可加强光谱波段差值应用的有效性.

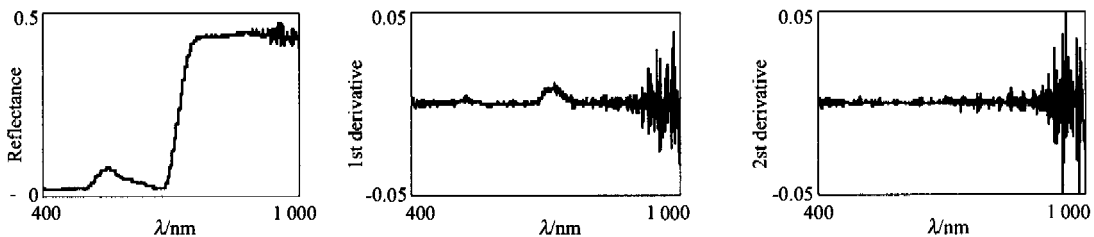


图 1 含有噪声的灌木地面实测光谱与该光谱的一阶、二阶导数
Fig.1 Noisy measured spectrum of shrub with it's first and second derivative

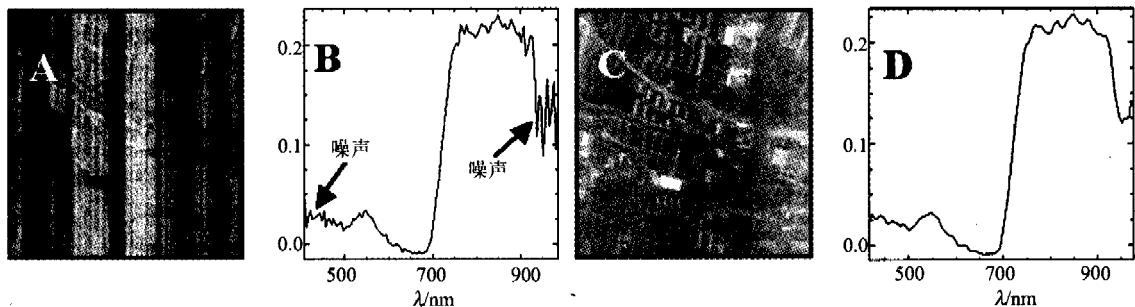


图 2 A 为原始图像 114 波段与 115 波段差值;B 为原始图像中植被反射率光谱;C 为 DSGF 滤波后 114 波段与 115 波段差值;C 为 DSGF 滤波后图像中植被反射率光谱
Fig.2 Picture A is the difference between band 114 and band 115 of raw image; Picture B is the reflectance spectrum of vegetation extracted from raw image; Picture C is the difference between band 114 and band 115 of filtered image; Picture D is the reflectance spectrum of vegetation extracted from filtered image

为了与高光谱其他一些噪声去除方法进行比较,我们还使用了多种方法对高光谱图像进行处理,并对处理后的高光谱图像像素光谱用两种光谱相似函数—光谱欧几里德距离和光谱角距离进行光谱相似度计算,得出了如表 1 和表 2 的结果。

从表 1、表 2 中可以看出,EFFORT 方法得到光谱与实测光谱之间距离最大,与原图像像素光谱之间的距离最小,说明 EFFORT 方法对图像像素光谱改进效果最小,基本上保持了图像像素光谱的原样。MNF 方法得到的光谱与图像像素光谱的距离值说明其对光谱噪声去除的效果比较好,但与实测光谱的距离值仍偏大,说明 MNF 方法去除噪声的同时,也把大部分的光谱特征去除了。DSGF 光谱与均值滤波光谱相比,DSGF 光谱与实测光谱的距离和与图像像素光谱的距离都要小于均值滤波光谱与实测光谱和图像像素光谱的距离。这说明,均值滤波后光谱过于平滑,而 DSGF 方法滤波后光谱保留了原光谱的大部分特征,在进行光谱匹配时最具有优势。

4 结论与讨论

本文针对高光谱图像光谱域中存在的噪声,提出一种利用光谱导数分析、诊断光谱噪声,并使用 Savitzky-Golay 滤波进行噪声去除的 DSGF 方法,得出以下结论:

1. DSGF 方法能有效的去除光谱中存在噪声,并能保留光谱原有的大部分光谱特征,是地物实测光谱和高光谱图像预处理的一种有效手段;
2. 对高光谱图像进行光谱域的 DSGF 滤波,可以在去除高光谱图像光谱域噪声的同时去除因光谱域噪声引起的空间域噪声;

表 1 四种方法处理后的光谱与实测光谱和原图像光谱的欧几里德距离

Table 1 Euclid distances between the field spectrum, image spectrum and four filtered spectra

	MNF 光谱	EFFORT 光谱	均值滤波光谱	DSGF 光谱
实测光谱	0.2136	0.2414	0.2033	0.1956
图像光谱	0.0973	0.0431	0.1258	0.1126

表 2 四种方法处理后的光谱与实测光谱和原图像光谱的光谱角距离

Table 2 Spectral angle distances between the field spectrum, image spectrum and four filtered spectra

	MNF 光谱	EFFORT 光谱	均值滤波光谱	DSGF 光谱
实测光谱	0.0835	0.0970	0.0773	0.0769
图像光谱	0.0425	0.0188	0.0549	0.0489

高光谱图像成像影响因素多,噪声类型及表现多种多样。DSGF 方法针对高光谱图像光谱域噪声进行处理,还存在着不少不足之处。

首先,地物目标可能会有高频的吸收线,在高光谱图像光谱域中表现出与部分噪声相同的特征。本文提出的滤波方法可能会把这种很细的吸收线滤去,损失掉有用的信息。如果高光谱遥感图像中地物目标的高频吸收波段已知的话,那么在进行滤波时就不对该波段进行滤波处理,而是保存其原始信号,应便于进行进一步应用。

其次,本文针对机载高光谱遥感图像的光谱域噪声特点对高光谱图像进行滤波,并通过使用多种方法进行了比较,说明 DSGF 方法对于机载高光谱遥感图像的光谱域噪声滤波比较合适。但由于篇幅所限,本文仅通过实测的含噪声地物光谱曲线和高光谱图像进行了分析。应该在此基础上叠加不同类型的噪声,并采用不同的滤波方法进行对比实验,以明确各种不同滤波方法的优缺点和各自的适用性,这也将是本文的进一步研究方向。

REFERENCES

- [1] Chen Shu-Peng, Tong Qing-Xi, Guo Hua-Dong. *Mechanism of remote sensing information* [M]. Beijing: Science Press, (陈述彭,童庆禧,郭华东. 遥感信息机理研究. 北京:科学出版社), 1998, 139—230.
- [2] YIN Qiu, SHU Xiao-Zhou, XU Zhao-An. Analysis on the Ultra-Spectral characteristics of Water Environmental Parameters about Lake [J], *J. Infrared Millim. Waves* (尹球,疏小舟,徐兆安. 湖泊水环境指标的超光谱响应特征分析. 红外与毫米波学报), 2004, 23(6):427—435.
- [3] LIU Tang-You, KUANG Ding-Bo, YIN Qiu, Study on Hyperspectral Quantitative Model of Concentrations for Chlorophyll-a of Alga and Suspended particles in TaiLake [J], *J. Infrared Millim. Waves* (刘堂友,匡定波,尹球. 湖泊藻类叶绿素-a 和悬浮物浓度的高光谱定量遥感模型研究. 红外与毫米波学报), 2004, 23(1):11—15.
- [4] Boardman, Joseph. Post-ATREM polishing of AVIRIS apparent reflectance data using EFFORT: a lesson in accuracy versus precision [C], *Pasadena Summaries of the Seventh Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, 1998.
- [5] John R. Jensen. 2002 Hyperspectral analysis of hazardous waste sites on the savannah river site [R], USA. *report of Westinghouse Savannah River Company*, 2003:21—26.
- [6] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [J], *Anal. Chem.*, 1964, 36:1627—1639.
- [7] Madden H. Comments on the Savitzky-Golay convolution method for least-squares fit smoothing and differentiation of digital data [J]. *Anal. Chem.*, 1978, 50(9):1383—1386.
- [8] Fuan Tsai, William Philpot. Derivative analysis of hyperspectral data [J]. *Remote Sensing Environment*, 1998, 66: 41—51.