高光谱遥感图像微分域三维混合去噪方法

孙 蕾,罗建书

国防科技大学理学院,湖南长沙 410073

摘 要 高光谱遥感图像是一种三维数据,由二维空间信息和一维光谱信息组成。普通的对二维静态图像 或一维光谱信息去噪的算法忽视了高光谱图像强烈的谱间相关性和图谱合一的特点,无法取得令人满意的 效果。同时现代的高光谱遥感图像噪声级别相对较低,噪声方差随波段不同而不同。针对以上特点,提出一 种微分域三维混合去噪方法。首先将高光谱遥感图像变换到光谱微分域,使细微的噪声变得显著。然后在微 分域中,对二维空间域采用基于小波的非线性阈值去噪 BayesShrink 算法。为克服噪声方差不同的特点,对 光谱维不再采用小波阈值去噪方法,而采用 Savitzky Golay 滤波进行平滑。最后对微分域去噪平滑处理后的 图像进行光谱积分,并进行积分修正,消除光谱积分中引入的积累误差。对信噪比为 600 1 的机载可见红 外成像光谱仪数据(AVIRIS)实验表明,该算法能有效地降低噪声,将信噪比提高到 2 000 1 以上。

关键词 高光谱图像;微分域; BayesShrink 方法; Savitzky Golay 滤波
中图分类号: TP751 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)10-2717-04

引 言

7

高光谱遥感图像是光谱成像仪在航天航空载体上观测地 球而采集到的一种三维数据。其二维空间信息可以反应地物 的空间位置和结构,第三维光谱信息刻画地物的光谱特 性⁽¹⁾。两者结合在一起有利于对地物的判别和分类,在军事 侦查,农林业,环境监测等方面有极为广泛的应用^[2]。由于 高光谱图像在太阳-大气-目标-大气-传感器的电磁辐射传播 路径中,受到很多复杂因素的影响,会引入了大量的噪声, 从而对图像分析带来不利影响。而通过改进物理仪器减少噪 声,特别是对机载成像仪器的改进难度特别大,因此研究高 光谱遥感图像的去噪方法非常有必要。

MNF(minimum noise fraction, 最小噪声分离)是高光谱 图像去噪常用的方法^[3,4]。MNF利用信噪比作为指标,得到 了理论上比较完备的成分分解方法。但是该方法的主要缺点 是在去噪的同时对光谱的峰(比较尖的地方)影响很大,容易 破坏光谱曲线特性,同时需要很长的运算时间。有人研究了 基于小波变换的光谱信号去噪方法,并在实验上取得了良好 的效果。但是他们主要是针对一维光谱信号,对三维的高光 谱图像而言难以达到最佳的效果。Pizurica等^[5,6]提出一种基 于感兴趣特征的概率分布的小波去噪方法。该方法利用高光 谱图像谱间相关性逐个波段地去噪。Atkinson等^[7]提出在光 谱维采用傅里叶变换去噪,在空间维采用 2D 小波变换去噪。 这些方法针对的是各波段噪声方差相同的情况,但这种情况 在实际中很少见,因为实际中高光谱图像的噪声方差随波段 的变化而不同。特别是对于信噪比高的高光谱图像数据而 言,各波段的噪声方差常常与该波段信号的幅值成正比。针 对各波段的噪声方差不恒定的特点,王强等^[8]提出一种高光 谱图像去噪方法,先根据光谱的二阶导数对各波段噪声大小 进行判断,然后采用平滑窗大小不同的 Savitzky Golay 滤波 器进行滤波。Adam 等^[9]提出利用高光谱图像波段间的相关 性和小波变换系数的稀疏性,将去噪问题转化为一个优化问 题,求解该优化问题的时间代价比较大。Othman 和 Qian^[10] 提出一种基于小波阈值收缩的去噪算法,将高光谱图像变换 到光谱一阶微分域,再通过三维 BayesShrink 方法去噪。

本文通过分析高光谱遥感图像的特点,提出一种光谱微 分域三维混合去噪方法。首先将高光谱图像变换到光谱一阶 微分域中。然后对微分域中二维空间图像进行小波分解和 BayesShrink 去噪,针对各波段噪声方差不同的特点,光谱维 采用 Savitzky- Golay 滤波方法平滑。最后对平滑后的数据进 行积分和积分修正,得到最终去噪处理的数据。实验表明该 方法能够有效地降低噪声,提高数据的信噪比。

收稿日期: 2008-09-06,修订日期: 2008-12-08

作者简介:孙 蕾,女,1980年生,国防科技大学理学院博士生 e-mail: bangbangbing1999 @163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(60572135)资助

1 光谱微分技术

光谱微分技术^[11] 能够很好地消除背景,使难以分辨的 噪声变得更敏感。点 *y_{i,j}* 表示高光谱图像在波长为 ,第 *i* 行第 *j* 列的像素的亮度值。一阶微分的定义为

$$\frac{\partial y_{i,j}}{\partial} = \lim_{0} \frac{y_{i,j,+} - y_{i,j,-}}{p_{i,j,-}}$$

n(n>1) 阶微分的定义为
$$\frac{\partial^{n} y_{i,j}}{\partial^{n}} = \frac{\partial}{\partial} \left(\frac{\partial^{n-1} y_{i,j,-}}{\partial^{n-1}} \right)$$

将波长 离散为 k, = k+1 - k, 对任意 k = 1, 2, ..., N。一阶微分离散表达式为

$$\frac{\partial y_{i,j,k}}{\partial k} = \frac{y_{i,j,k+1} - y_{i,j,k}}{\partial k}$$

2 BayesShrink 去噪

BayesShrink 去噪方法是一种经典的二维图像去噪方法, 由 Chang 等提出^[12]。该方法首先将数据进行小波变换,在贝 叶斯准则下求得使贝叶斯风险最小的理想阈值 *T*_{Bayes}。小波 系数经过阈值函数处理后,再进行小波逆变换得到重构图 像。阈值 *T*_{Bayes}的求解非常复杂,一般用以下方法近似求解。

设含噪声信号 y = x + v, x表示纯信号, v表示噪声, ^y 表示 y 的标准差。对 y 进行小波变换后, 用{ d_j }表示最精细 尺度一层的小波系数。用 ^ 和 ^ x 分别表示估计的噪声和纯信 号的标准差, ^ = $\frac{\text{Median}(/ - d_i /)}{0.6745}$, ^ x = $\sqrt{\max(\wedge_y^2 - \wedge^2, 0)}$ 。 实际中, 用阈值 $T = \frac{\wedge_x^2}{\wedge_x}$ 近似代替阈值 T_{Bayes} , 其误差一般不 超过 5 %。

3 Savitzky-Golay 滤波

Savitzky 和 Golay^[13]提出 Savitzky- Golay 滤波,该方法 用基于最小二乘的多项式曲线拟合方法来平滑光谱曲线。 Madden^[14]给出了任意阶 Savitzky- Golay 滤波基于线性方程 的求解方法。

设 y_i 表示平滑前第 i 点的数值, \hat{y}_i 表示平滑后的数值, 平滑窗口大小为 2m + 1。设拟合曲线为 p 阶多项式

$$= \int_{j=i-m} (\mathcal{Y}_i - y_i)^2$$

为使误差最小,对 作偏微分,令 各项偏微分为零,得 到下列线性方程组

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial a_0} = 2 \sum_{\substack{j=i-m \ i+m \ i+m \ i+m \ i+m \ j+m \ i+m \ i+m \ j+m \ i+m \ j+m \ i+m \ j+m \ i+m \ j+m \ j+m$$

通过解线性方程,得到 *a*₀, *a*₁, ..., *a_p*,便可以求得拟者 多项式曲线。

4 本文算法

高光谱遥感图像的噪声有两个主要特点^[15,16]。(1) 各波 段噪声的方差是不同的,它随各波段信号的幅值而变化; (2) 高光谱遥感图像的噪声级别较低,信噪比相对其他图像 而言比较高。为达成用户需求和参数设计方面的平衡,综合 考虑认为信噪比为 600 1 最为合适。基于这两个特点,单纯 地使用的图像去噪方法或光谱平滑技术难以达到令人满意的 效果。因此本文针对高光谱遥感图像噪声特有的性质,提出 一种新的去噪算法。

噪声通过光谱微分技术可以变显著^[12]。因此首先采用 光谱一阶微分将高光谱图像变换到微分域内。在微分域内用 BayesShrink 去噪方法对空间维图像进行去噪,可以有效地 将二维空间噪声去除。对于光谱维,采用 Savitzky Golay 滤 波平滑。最后进行光谱积分和积分修正,得到去噪图像。

光谱积分的公式为

 $y_{i,j,k} = y_{i,j,0} + \frac{\frac{k+1}{l+1}}{\frac{\partial y_{i,j,l}}{\partial l}}, \quad k = 1, 2, ..., N$

从上式可以发现对于微分域去噪后的高光谱数据而言,其微 分和原始信号的微分是有一定误差的,而且这误差是随着 k的增大而不断积累的。积分带来的误差会集中在低频部分, 对于波长比较长的波段而言,这种积累的误差甚至可能比原 始噪声引起的误差更大,因此在积分时需要进行误差修正来 解决这个问题。含噪声信号的低频部分集中能量,噪声分布 在高频部分。故可以用含噪声信号的低频代替积分之后的信 号的低频部分,以此修正在积分中带来的误差。为了快速求 得低频分量,我们采用 MAF (moving average filter)。MAF 是一种简单的低通滤波器,它用数据的相邻点的平均值来平 滑该点。选取一个宽度为 +1 滑动窗口,称之为修正窗口。 用 $\overline{y}_{kf_{kk}}$ 表示积分后的光谱信号, $y_{kf_{kk}}$ 表示原来含噪声的信 号, $\widetilde{y}_{kf_{kk}}$ 为修正信号。其积分修正过程为

 $\widetilde{y}_{i,j,k} = \overline{y}_{i,j,k} - \frac{k+2}{y}_{i,j,k} + \frac{k+2}{y}_{i,j,k} + \frac{k+2}{y}_{i,j,k}$

修正窗口的宽度太小,修正值受噪声影响会比较大。宽 度太大,求均值的点过多,求得的低频分量不够准确。根据 经验选择窗口长度为5比较合适。

本文的具体算法流程如下:

(1) 对高光谱图像进行光谱微分;

(2) 在微分域中,用 BayesShrink 方法对二维空间信号 进行去噪; (3) 在微分域中对光谱维信号,用 Savitzky-Golay 滤波 进行平滑;

(4) 对光谱维进行积分;

(5) 积分修正, 消除积分中引入的积累误差。

5 实验结果

为了验证本文提出的算法的有效性,使用美国喷气推进 实验室(JPL)机载可见红外成像光谱仪(AVIRIS)提供的 224 波段高光谱遥感图像进行仿真实验。该图像波长范围在 0.4 ~2.5 µm,光谱分辨率达 10 nm,每个像素用 16 bit 表示。选 用高光谱图像 Lunar Lake 和 Jasper Ridge,从中截取图像块 大小为 128 ×128 ×224(长 ×宽 ×波段)作为实验数据。根据 文献[18,19]建立的高光谱遥感图像噪声模型和提供的参数, 各波段所加的噪声与该波段信号的幅值成正比,信噪比为 600 1。

去噪效果用信噪比来客观衡量。信噪比越高表明去噪效 果越好。ŷ_{i,j,k}表示去噪处理后的像素值,x_{i,j,k}表示纯信号。 信噪比定义为

SNR =
$$\frac{\left|\begin{array}{c} x_{i,j,k} \right|^{2}}{\left|\begin{array}{c} x_{i,j,k} \right|^{2}} \\ \frac{x_{i,j,k}}{\left|\begin{array}{c} y_{i,j,k} \right|^{2}} \\ y_{i,j,k} - x_{i,j,k} \right|^{2}} \end{array}$$

本文算法通过 Matlab7.0 实现,并与目前高光谱图像去 噪效果优秀的 HSSNR(混合空间谱间去噪)算法^[11]进行了比 较。两种算法都能有效的降低噪声,本文算法比 HSSNR 算 法去噪效果更好。

Table 1 SNR of AVIRIS imageries

	Lunar Lake	Jasper Ridge
去噪前	600	700
HSSNR 算法	2 446. 9	2 196. 9
本文算法	2 514.0	2 203. 3

为了进一步分析本文提出的算法的性能,我们计算了每 个波段去噪后图像与原图像的 RMSE(误差均方根, root of mean square of errors)。RMSE 越小表明去噪后的图像与原 始图像越接近。波长为 k的波段的 RMSE 定义如下

$$\mathbf{RMSE}_{k} = \sqrt{\frac{1}{MN} (\widetilde{y}_{i,j} + \widetilde{y}_{i,j,k} - x_{i,j,k})^{2}}$$

从图 1 来看,两种算法的去噪效果都很明显,而且结果 比较接近,本文算法略微好于 HSSNR 算法。由于图像 Jasper Ridge 的两条 RMSE 曲线几乎重合难以比较,我们对两 种算法的 RMSE 作差,即用 HSSNR 算法的 RMSE 减去本 文算法的 RMSE,如果作差值大于 0,说明本文算法的 RMSE 更小,去噪效果更好。作差值小于 0,说明 HSSNR 算 法去噪效果更好。作差结果如图 2 所示。

从图 2 看出本文算法的大多数波段的 RMSE 是小于 HSSNR 算法的。造成这种差别的原因主要为对第三维光谱 信息的处理上。由于噪声的方差因波长而异,故光谱维的噪 声不是高斯白噪声。HSSNR 算法的光谱维去嗓采用的是 BayesShrink 方法,这种方法去噪的噪声类型是高斯白噪声,因此用 BayesShrink 方法给光谱去噪并不能达到最佳效果。 而采用 Savitzky Golay 滤波则不受噪声类型的限制。因此本 文算法具有更优越的去噪效果。



6 结 论

本文提出了一种新的高光谱遥感图像去噪方法。将高光 谱图像变换到光谱微分域后, 对空间维图像进行 Bayes-Shrink 方法去噪, 光谱维采用 Savitzky- Golay 滤波进行平滑。 最后通过积分和积分修正得到重构图像。该方法的优点主要 体现在它充分考虑到了高光谱遥感图像的噪声方差随波段不 同而不同的特点,对空间维和光谱维采用了不同的平滑方 法。因此该算法比其他去噪方法更适合高光谱遥感图像去 噪。

参考文献

- [1] Green R O, Eastwood M L, Sarture C M, et al. Remote Sensing of Environment, 1998, 65: 227.
- [2] TONG Qing-xi, ZHANG Bing, ZHENG Lan-fen(童庆禧,张 兵,郑兰芬). Hyperspectral Remote Sensing Principle, Technology and Application(高光谱遥感——原理、技术与应用). Beijing: Higher Education Press(北京:高等教育出版社), 2006.
- [3] Green A A, Berman M, Switzer P, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(1): 65.
- [4] Lee J B, Woodyatt A S, Berman M. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(3): 295.
- [5] Pizurica A, Philips W, Scheundersy P. SPIE Conf. Wavelets , San Diego, California, USA, 31 July-4 Aug, 2005, 5914: 508.
- [6] Pizurica A, Philips W. IEEE Trans. Image Processing, 2006, 15(3): 654.
- [7] Atkinson I, Kamalabadi F, Jones DL. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGASS), 2003, 2:743.
- [8] WANG Qiang, SHU Jiong, YIN Qiu(王、强,束 炯,尹 球). J. Infrared Millim. Waves. (红外与毫米波学报), 2006, 25(1): 29.
- [9] Zelinski A C, Goyal V K. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2006, 104: 387.
- [10] Othman H, Qian Shen-En. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(2): 397.
- [11] Faber N M. Anal. Chem., 1999, 71(3): 557.
- [12] Chang S G, Yu B, Vetterli M. IEEE Trans. on Image Processing, 2000, 9(9): 1532.
- [13] Savitzky A, Golay MJ E. Anal. Chem., 1964, 36: 1627.
- [14] Madden H H. Anal. Chem., 1978, 50: 1383.
- [15] Mates D M, Zwick H, Jolly G, et al. System Studies of a Small Satellite Hyperspectral Mission, Data Acceptability. Canada: Can. Gov. Contract Rep., 2004.
- [16] Bukingham R, Staenz K, Hollinger A B. Can. Aeronaut. Space J., 2002, 48(1): 115.

Three-Dimensional Hybrid Denoising Algorithm in Derivative Domain for Hyperspectral Remote Sensing Imagery

SUN Lei, LUO Jian-shu

College of Sciences, National University of Defense and Technology, Changsha 410073, China

Abstract To tackle denosing problems in hyperspectral remote sensing imagery, a three dimensional hybrid denoising algorithm in derivative domain was proposed. At first, hyperspectral imagery is transformed into spectral derivative domain where the subtle noise level can be elevated. And then in derivative domain, a wavelet based non-linear threshold denoising method, Bayes-Shrink algorithm, is performed in the two-dimensional spacial domain. In the spectral derivative domain, considering that the noise variance is different from band to band, the spectrum is smoothed using Savitzky-Golay filter instead of wavelet threshold denoising method. Finally, the data smoothed in derivative domain are integrated along the spectral axis and corrected for the accumulated errors brought by spectral integration. The algorithm was tested on airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) data cubes with signal-to-noise ratio (SNR) of 600 1. Experimental results show that the proposed algorithm can reduce the noise efficiently, and the SNR is improved to more than 2 000 1.

Keywords Hyperspectral imagery; Derivative domain; BayesShrink method; Savitzky- Golay filter

(Received Sep. 6, 2008; accepted Dec. 8, 2008)