

# 基于改进的矩匹配方法高光谱影像条带噪声滤波技术

韩 玲 董连凤 张 敏 吴 静

(长安大学地质工程与测绘学院 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要** 高光谱遥感数据蕴含着丰富的地物反射光谱信息,其原始反射数据中含有大量的噪声,这些噪声严重影响地物反射光谱中的吸收特征,大大降低数据的分析精度,研究有效的高光谱遥感数据噪声滤波算法是改善高光谱数据分析效果的关键环节。研究了推扫高光谱图像(PHI)影像中条带噪声的高频特性,针对目前常用的矩匹配方法及几种改进的矩匹配方法都存在一定的缺点,提出一种改进的行平滑条带滤波方案,对含有条带噪声波段行均值曲线进行平滑处理,并调整图像中各像元的灰度值,以减小行间灰度差异,所得图像的峰值信噪比有所提高,取得了比按波段的矩匹配方法更好的去条带效果,在较好地削弱图像中条带噪声的同时,保留了原图像的辐射特征。

**关键词** 图像处理;高光谱遥感;行平滑滤波算法;矩匹配方法;高频特性;条带噪声

**中图分类号** TP79      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/AOS20092912.3333

## Destriping Hyperspectral Image Based on an Improved Moment Matching Method

Han Ling Dong Lianfeng Zhang Min Wu Jing

(Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

**Abstract** The hyperspectral remote sensing data contains rich information of reflective spectrum of surface feature, however, the original reflection data includes the massive noises, which affects the absorption feature of reflective spectrum and degrades the data analysis precision greatly. The study of hyperspectral remote sensing data noise filtering algorithm is the key to improve data analysis. The hyperspectral image noise filtering technology is studied. Deep research in high-frequency characteristics of pushbroom hyperspectral imager (PHI) stripe noise, in view of the disadvantages of currently common and several improved moment matching methods, an improved smooth filtering algorithm by row is proposed. The line-average curve of the bands contained strip noise is smoothed and gray value of each pixel in the image is also adjusted to reduce the gray differences between the lines. The peak signal-to-noise-ratio of the gained image has been improved and better effect is got comparing with moment matching method by bands. While strip noise is weakened well, the radiative feature of original image is retained.

**Key words** image processing; hyperspectral remote sensing; smooth filtering algorithm by row; moment matching method; high-frequency characteristic; stripe noise

## 1 引 言

遥感数据在获取过程中受到大气、仪器等多方面的干扰,会产生很多噪声。遥感图像中的噪音根据其定量特征可以分为:周期性噪声、条带式噪声和尖峰式噪声。噪声滤波在高光谱遥感数据预处理中占有重要的地位,国内外很多学者对其进行了研究。J. W. Boardman 等<sup>[1]</sup>提出了用最小噪声分离技术

(MNF)隔离高光谱影像中的噪声和判定图像数据内在的特征维数。R. E. Roger 等<sup>[2]</sup>对航空可见光/红外成像光谱仪(AVIRIS)获取的数据进行了噪声分析,认为高光谱遥感数据中的噪声随成像波段的变化非常复杂。陈秋林等<sup>[3]</sup>对实用型模块化成像光谱仪(OMIS)数据的噪声进行了分析,指出 OMIS 数据中的噪声是高斯白噪声等。虽然人们对高光谱影像中

收稿日期: 2008-12-02; 收到修改稿日期: 2009-03-17

基金项目: 交通部西部重点科技攻关课题(200416000001)和陕西省自然科学基金(2006D10)资助课题。

作者简介: 韩 玲(1964—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事遥感技术方面的教学和科研工作。

E-mail: hanling@chd.edu.cn

的噪声特性提出了不同的观点,但目前普遍认为:高光谱遥感数据中的噪声基本属于高斯白噪声,多数情况下,噪声与信号、噪声与噪声之间不具备相关性;高光谱遥感数据中的噪声随波长的变化非常复杂,对其噪声分析时应采用自适应的方法对数据的局部特性进行分析;高光谱数据中的噪声具有空间维和光谱维的多维特性,对高光谱数据滤噪时应全面考虑空间维和光谱维的信息。

噪声滤波技术在高光谱遥感数据分析中占有重要的地位,在选择或者设计高光谱遥感数据滤波算法时,应选择具备自适应性的滤波工具,使其在滤除高光谱影像噪声的同时更好地保留目标的光谱辐射特性。本文根据高光谱遥感数据中噪声特点,针对空间域的条带噪声特点,提出改进的矩匹配条带滤波方法,消除高光谱影像噪声。

## 2 现有 PHI 影像条带滤波方法

推扫高光谱图像(PHI)系统是由中国科学院上海技术物理研究所研制的一种推扫式成像系统。

条带噪声是影像中具有周期性、方向性且呈条带状分布的一种特殊噪声。这种噪声是传感器的光、电器件在反复扫描地物的成像过程中,受扫描探测元件响应差异、传感器机械运动和温度变化等影响造成的。依据其特点,国内外学者对其进行了大量研究,主要的方法有直方图匹配法<sup>[4~6]</sup>、矩匹配法<sup>[7]</sup>、改进的矩匹配法<sup>[8,9]</sup>等。但这些算法在去除条带噪声的同时,又会产生不同程度的灰度畸变,且矩匹配法适用于几何校正前。如何在去除条带噪声的同时,尽可能大的保留影像的辐射量信息,是噪声滤波的重点。本文将采用几种算法进行实现,并进行分析比较。

### 2.1 矩匹配基本原理

用于去除条带噪声的方法大致上可以分为两类<sup>[10]</sup>。一类是通过傅里叶变换,在频率域通过滤波算子去除周期性噪声的频率成分,然后反变换回空间域获得去噪后图像。这种方法适用于几何纠正前后的数据,而且在某些情况下效果较好。但缺点是不容易选择正确的频率成分,并且对于地物分布复杂地区,条带噪声和图像本身的纹理混在一起,在剔除条带的同时也能去除图像中的某些细节,降低了图像的质量。另一类是针对图像灰度值特征进行的归一化(标准化)和匹配方法,典型的有直方图匹配、矩匹配(Moment matching)方法。前人的研究表明:一般情况下,矩匹配可以获得比直方图匹配更

好的效果,然而其缺点是改变了原始的反射率分布特性,且往往要求图像足够大,地物分布均匀。

### 2.2 现有的改进矩匹配方法

由于标准的矩匹配方法改变了图像在成像行或列方向的均值分布,使图像灰度在空间分布上产生一定的畸变,出现带状效应<sup>[11]</sup>。要减轻或去掉带状效应,需要从含有条带噪声的原始均值分布恢复行或列方向下图像灰度的真实均值分布。刘正军等<sup>[8]</sup>将具体的改进方法分为三类:均值补偿法、傅里叶变换法和相关系数法。

1) 均值补偿法:设 CCD 个数为  $N$ ,在同样的成像条件下,选定图像前  $N$  行数据为参考均值,对其后的每一 CCD 成像行  $l(l = kN + i, k$  为自然数,  $i = 1, 2, \dots, N)$  做均值补偿。

2) 傅里叶变换法:这种方法是根据条带噪声呈短周期的急剧变化,则在频率域内真实均值分布表现为低频成分信息,条带噪声则表现为高频成分。通过一维傅里叶变换,将各行均值序列进行低通滤波,以削弱条带噪声。

3) 相关系数法:相关系数法是根据高光谱影像邻近波段具有较高的相关性,则其直方图具有相似的灰度特性。此方法选择与待处理的波段相关性较高且图像质量好的波段为参考,进行匹配叠加处理。

上面三种方法均对较小且非均匀图像有一定的去条带效果,但也存在不同程度的缺陷。傅里叶变换法很难确定低通滤波算子,去条带效果一般;相关系数法在去条带的同时可能会将某些细节压抑或损害,并可能引入新的噪声;均值补偿法去条带效果受前  $N$  行数据影响。

陈劲松等<sup>[9]</sup>也提出一种按波段的矩匹配方法。此方法与相关系数法类似,选择与含有条带噪声的图像相关性很高的不含有条带噪声的另一波段的图像作为参考图像(这两幅图像内容是同一地区)。这两幅图像对应的 CCD 扫描行所记录的是同一地物,对应扫描行所记录地物灰度的变化可认为具有线性关系。因此可把含有条带噪声图像的每一个传感器形成的子图像(即每个 CCD 所记录的行)数据的均值和方差调整到参考图像对应传感器形成的子图像数据(即对应行)的均值和方差上。对处理后的图像再调整每个像元的灰度值以保证这一波段的光谱特性:

$$Y = \left( \frac{\sigma_r}{\sigma_i} X + \mu_r - \mu_i \frac{\sigma_r}{\sigma_i} \right) \times \frac{A_2}{A_1}, \quad (1)$$

其中  $X, Y$  分别为含条带图像第  $i$  个 CCD 扫描行各

像素校正前、后的灰度值; $\sigma_i, \mu_i$  为其第  $i$  个 CCD 扫描行的灰度方差、均值; $\sigma_r, \mu_r$  为参考图像对应 CCD 扫描行的  $A_1$  方差、均值。 $A_1$  和  $A_2$  分别为参考图像和含条带图像的灰度均值。这种方法对于复杂地物分布具有很强的适应性,对图像中变化程度缓慢的明暗条带的去除有较好的效果,但对于呈短周期变化的条带,处理效果不明显,选择参考图像的难度也相对较大。

### 3 行平滑条带滤波算法

理想状况下,设各 CCD 在地面光谱响应范围内为一线性响应函数,且具有位移不变性。设  $C_i$  为第  $i$  个 CCD 像素,则  $C_i$  的光谱响应函数可表示为

$$Y_i = k_i X + b_i + \varepsilon_i(X), \quad (2)$$

其中  $Y_i$  为  $C_i$  的响应值,即图像灰度值, $X$  表示地表漫反射中被该 CCD 所接收的分量, $k_i$  为像素  $i$  的增益值, $b_i$  为其漂移值, $\varepsilon_i(X)$  为高斯分布的随机噪声,在信噪比较高的条件下, $\varepsilon_i(X)$  的影响可忽略。于是(1)式可简化为

$$Y_i = k_i X + b_i. \quad (3)$$

可见,由于  $k_i$  与  $b_i$  取值的不同,导致对于同一入射光强度  $X$  产生不同的灰度值。

如果能将  $Y_i$  归一化为同一值  $Y$ , 则条带噪声即可得到有效去除。标准的矩匹配法就是假定图像扫描方向的一行或一列图像具有统计一致性,来滤除条带噪声。标准的矩匹配法假设每个传感器所探测的地物具有相同式均衡的辐射分布,所记录数据的变化也与辐射校正的增益与偏移成线性关系,通过调整每个传感器的均值方差到某一参考值来达到去条带目的<sup>[12]</sup>。CCD 按行扫描获取数据,则各行入射辐射强度的均值和方差近似相等。矩匹配方法选取一 CCD 为参考,将其它 CCD 校正到该标准 CCD 的反射率。其公式如下:

$$Y = \frac{\sigma_r}{\sigma_i} X + \mu_r - \mu_i \frac{\sigma_r}{\sigma_i}, \quad (4)$$

这种方法只适合于几何纠正前的数据,且往往要求图像足够大,地物分布均匀。如果是小图像或是图中地物较复杂的情况,传感器中每个 CCD(即

每行)所扫描的地物变化也很大,均值和方差差异较大。而矩匹配法把原本非一致的各行均值看作近似相等,把所有行的均值和方差都调整到某一个参考行的均值和方差上,从而导致图像上反映的地表光谱信息的分布发生畸变,滤波后通常会产“带状效应”,即图像从整体上表现出一种时暗时明的不连续,不符合自然地理要素分布特征的现象。

由于矩匹配算法和几种改进的矩匹配条带滤波算法,都不同程度的存在缺陷,本文提出一种行平滑条带滤波算法,该方法滤波具体过程如下:

假设高光谱每个波段的真实行均值可形成一条连续的光滑曲线,针对 PHI 影像中条带噪声频率特点,首先对含条带噪声波段行均值曲线进行平滑处理[见(5)式]:若调整后效果仍不佳,可反复处理,直到满意为止(一般两到三次即可)。

$$R_m = \begin{cases} \frac{1}{\omega} \sum_{n=0}^{\omega-1} A_{m+n-\omega/2}, \\ A_m, \end{cases} \quad (5)$$

$$m = (\omega - 1)/2, \dots, N - (\omega + 1)/2$$

式中  $A$  和  $R$  分别代表平滑滤波前后的灰度行均值; $\omega$  为平滑尺度,这里应为条带噪声频率。并调整图像中各像元的灰度值[见(6)式],以减小行间灰度差异:

$$Y_{ji} = X_{ji} \frac{R_i}{A_i}, \quad (6)$$

式中  $X_{ji}, Y_{ji}$  分别为含条带图像第  $i$  行各像素调整前、后的灰度值; $A_i, R_i$  分别为含条带图像第  $i$  行平滑处理前、后的灰度行均值。

## 4 条带滤波实验与分析

针对 PHI 影像中存在的高频条带噪声,采用行平滑条带滤波算法方法进行滤波实验与分析。

### 4.1 PHI 影像条带噪声分析

PHI 总视场角为  $21^\circ$ , 波谱范围  $0.40 \sim 0.85 \mu\text{m}$ , 光谱分辨率  $8 \text{ nm}$ 。实验选用 2002 年获取的北京地区一景数据,影像数据格式 BSQ,数据类型 16 位无符号长整型,实验影像大小  $374 \text{ pixel} \times 374 \text{ pixel}$ ,其它参数见表 1。实验用 PHI 影像未经过反射率转换和几何校正,图像中含有大量条带噪声。

表 1 PHI 影像数据信息

Table 1 PHI image data information

Image size	Spectral coverage	Band number	Location	Image time	Data Type	Storage format	Sampling interval	Spectral resolution	Field of view
$374 \times 374$ pixels	$0.40 \sim 0.85$ $\mu\text{m}$	120	Beijing	October 2002	16 bit unsigned long integer	BSQ	1.8 nm	5 nm	$21^\circ$

图 1 中分别是 49 波段和 38 波段图像。从图中可以看到有明显的条带噪声,49 波段条带不明显,图像质量相对较好;而 38 波段条带相当规则,表现为交替的明暗条纹。总体上看,影像中条带噪声有周期短、变化急剧的特性。PHI 影像绝大部分波段中的条带同 38 波段,只有少数的几个波段图像质量相对较好。求 49 波段和 38 波段各行的均值,得到图 2 行均值分布曲线。对两个波段的均值曲线进行分析发现,两波段波形整体走向相似。图 3 为局部行均值曲线,38 波段均值曲线上下波动剧烈,条带周期为 2(由图 3 局部放大图像可清晰得出)。49 波段均值分布曲线近似光滑,条带特性不明显。

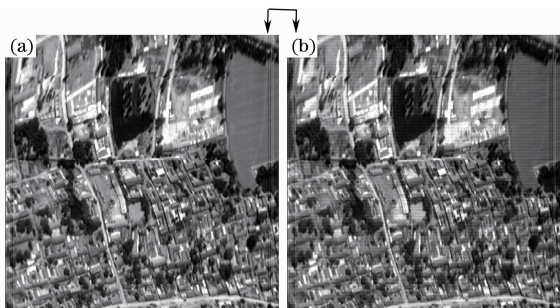


图 1 49 波段(a)和 38 波段(b)原始图像

Fig. 1 Original images of band 49(a) and band 38(b)

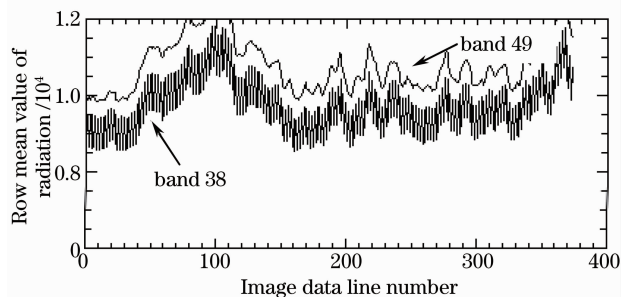


图 2 波段影像行均值分布

Fig. 2 Distribution of row mean value on band image

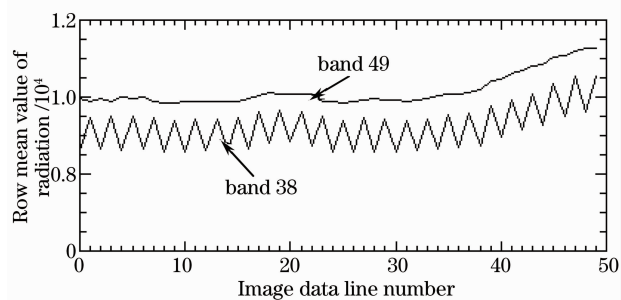


图 3 局部行均值曲线

Fig. 3 Curve of local row mean value

局部放大后,38 波段曲线呈锯齿状。其中,曲线中的波峰对应影像中的亮条纹,波谷对应影像中的暗条纹。观察 PHI 影像其它波段,发现所有波段

均带有轻重不同的条带噪声,只有少数几个波段图像质量相对好些。

根据以上对 PHI 影像条带噪声的分析,若采用按波段的矩匹配滤波方案,则不现实,没有完全不含条带噪声的波段,参考影像中的细微条纹也必然会影

#### 4.2 滤波实验及分析

在进行滤波处理前,首先应去除原图像左右两侧的几处坏线,见图 1 箭头所指向的区域。利用 ENVI4.0 下的“替代坏行”工具剔除图像中的坏线,因该工具只对行进行处理,在操作时应先将原图像进行旋转,交换行列,坏线处理后再将图像反转,恢复图像的原始行列次序。坏线处理后图像如图 4 所示。

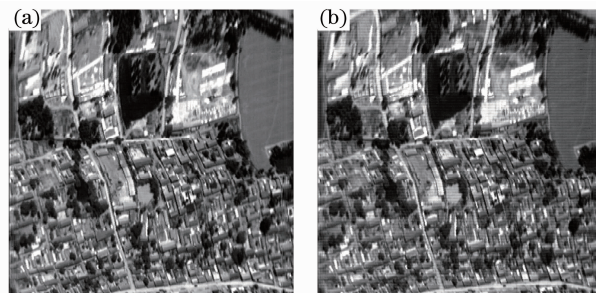


图 4 坏线去除后的图像。(a) 49 波段;(b)38 波段

Fig. 4 Images after removing bad lines. (a)band 49;  
(b)band 38

对 PHI 影像进行矩匹配滤波,实验中采用的算法应用交互式数据语言(IDL)进行编程实现。这里采用本文方法和按波段的矩匹配两种方法对影像进行滤波实验,并对结果进行比较分析。具体的滤波方案如下:

方案一:应用傅里叶低通滤波对含条带图像进行处理,得平滑后图像。

方案二:利用按波段的矩匹配方法对 38 波段进行滤波,参考波段选用 49 波段(49 波段是与 38 波段最近且图像质量较好的波段)。

方案三:利用本文提出的滤波方案,先对行均值进行平滑处理,再进行按波段的矩匹配条带滤波。

对待处理波段进行行均值平滑滤波,这里待处理波段和参考波段分别为 38 和 49 波段;具体步骤可分为以下几步:1)按(6)式调整含噪声波段各像素灰度值,削弱行间灰度差异;2)若去条带效果不明显,继续执行前面两个步骤,直到满意为止。

按照方案进行实验,得到图 5 实验结果。通过峰值信噪比(PSNR)的计算,及客观目视评价。结

果表明,传统的低通滤波方法峰值信噪比值为 41.44,该方法在去除条带噪声的同时也去除了图像中的某些细节,使图像变模糊,降低了图像质量。按波段的矩匹配方法峰值信噪比值为 40.51,该方法仍存在较明显的条带,且图像中间部分出现暗区,灰

度分布发生变化,说明在滤波的同时又加入了新的噪声。本文提出的行均值滤波方法峰值信噪比值为 46.53,图像条带现象得到明显的改善,取得了良好的视觉效果。

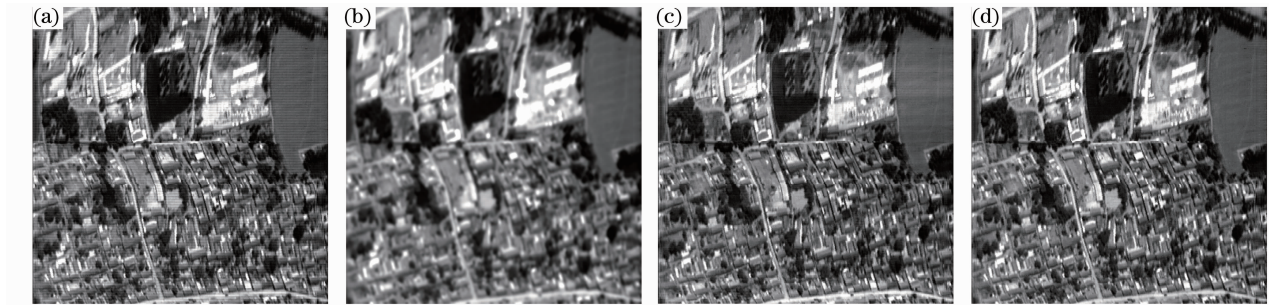


图 5 38 波段去条带实验结果。(a) 待处理图像;(b) 傅里叶低通滤波结果;  
(c) 按波段的矩匹配滤波结果;(d) 本文方法滤波结果

Fig. 5 Destriping results of band 38. (a) image to deal with; (b) result of Fourier low-pass filtering; (c) result of moment matching by bands; (d) result of the new filtering method

图 6 为应用本文条带滤波方法削噪前后 38 波段数值之差图像,此结果为原图像中的条带噪声。

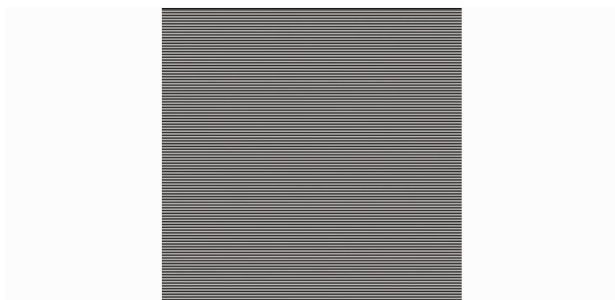


图 6 38 波段滤波前后灰度差图像

Fig. 6 Gray level difference image between filtering and unfiltering in band 38

图 7 表明,未经几何纠正的 PHI 影像,用文中改进的滤波方法去条带后的图像的均值与原图像的均值虽有变化,但整体波形走向、变化趋势与原图像一致,且曲线光滑,图像质量明显提高。而用按波段的矩匹配法去条带后,图像的行均值变化很大,与原图像行均值的变化趋势完全不同,图像失真严重。

## 5 结 论

采用傅里叶低通滤波、按波段的矩匹配法和文中改进的方法对未经几何纠正的 PHI 图像数据进行条带滤波。实验结果表明,傅里叶低通滤波在去条带的同时也损失了图像中的一些细节,降低了图像的利用价值;按波段的矩匹配法改变了图像的行均值分布,图像失真严重,且参考图像的质量和相关性的高低直接影响着去除条带的效果;本文采用的

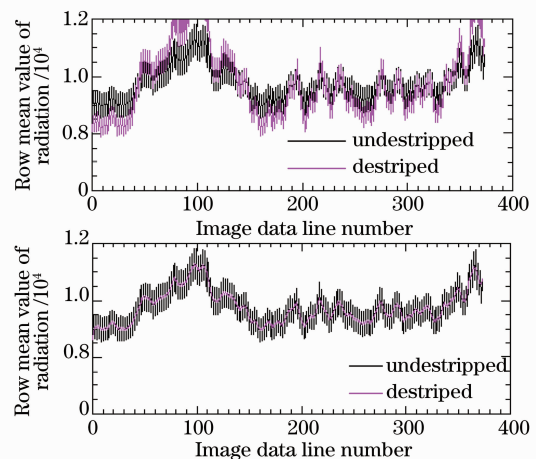


图 7 条带噪声去除前后图像行均值的变化。

(a)波段的矩匹配法;(b)改进的方法

Fig. 7 Variations of row mean value destriping noise.

(a) moment matching method by bands; (b) the improved method

改进的矩匹配方法,在几何纠正前,针对 PHI 影像条带噪声的高频特性,进行噪声滤波,取得了较好的效果,保持了行均值曲线的一致性,图像质量大大改善。

本文采用的改进条带滤波方法虽然能够较好地削弱影像中条带噪声的影响,但仍残留轻微细小条带,而且条带噪声频率的确定还停留在人工干预阶段。下一步可以研究如何结合其它平滑滤波方法进行条带处理,以及能够自动获取条带噪声频率的方法。

## 参 考 文 献

- 1 J. W. Boardman, F. A. Kruse. Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data [C]. *Proc. Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing (D)*, Environmental Research Institute of Michigan, 1994, 407~418
- 2 R. E. Roger, J. F. Arnold. Reliably estimating the noise in AVIRIS hyperspectral images[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1996, **17**(10): 1951~1962
- 3 Chen Qiulin, Xue Yongqi. Estimation of signal-noise-ratio from data acquire with OMIS[J]. *J. Remote Sensing*, 2000, **4**(4): 284~289  
陈秋林, 薛永祺. OMIS 成像光谱数据信噪比估算[J]. *遥感学报*, 2000, **4**(4): 284~289
- 4 V. R. Algazi, G. E. Ford. Radiometric equalization of nonperiodic striping in satellite data[J]. *Comput. Graph. Image Process.*, 1981, **16**: 287~295
- 5 B. K. P. Horn, R. J. Woodham. Destriping landsat MSS images by histogram modification[J]. *Comput. Graph. & Image Process.*, 1979, **10**: 69~83
- 6 J. Kautsky, N. K. Nichols, D. L. B. Jupp. Smoothed histogram modification for image processing[J]. *Comput. Vis. & Image Process.*, 1984, **26**: 271~291
- 7 F. L. Gadallah, F. Csillag. Destriping multisensor imagery with moment matching[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 2000, **21**(12): 2505~2511
- 8 Liu Zhengjun, Wang Changyao, Wang Cheng. Destriping image spectrometer data by an improved moment matching method[J]. *J. Remote Sensing*, 2002, **6**(4): 279~284  
刘正军, 王长耀, 王 成. 成像光谱仪图像条带噪声去除的改进矩匹配方法[J]. *遥感学报*, 2002, **6**(4): 279~284
- 9 Chen Jinsong, Shao Yun, Zhu Boqin. Remote sensing retrieval of evapotranspiration over the scale of drainage basin[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, **18**(5): 313~316  
陈劲松, 邵 芸, 朱博勤. 一种改进的矩匹配方法在 CMODIS 数据条带去除中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2003, **18**(5): 313~316
- 10 Li Na, Zhao Huijie, Jia Guorui *et al.*. Anomaly detection of hyperspectral images based on the expansion of mathematical morphology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1480~1484  
李 娜, 赵惠洁, 贾国瑞 等. 基于可扩展数学形态学的高光谱影像异常检测[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1480~1484
- 11 Zhang Qiang, Guo Baolong. Alogorithm of remote sensing images based on non-sampling contourlet transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 74~80  
张 强, 郭宝龙. 基于非采样 contourlet 变换的遥感图像融合算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 74~80
- 12 He Lin, Pan Quan, Zhao Yongqiang. A detecion for samll targets of hyperspectral images based on single-likelihood test[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2154~2162  
贺 霖, 潘 泉, 赵永强. 一种基于单丝然检验的高光谱图像小目标检测器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2154~2162