

文章编号: 1001 - 9014(2008)03 - 0214 - 05

基于方向滤波器消除遥感图像 孤立条带噪声的方法

石光明¹, 王晓甜¹, 张犁¹, 刘哲²

(1. 西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071; 2 西北工业大学 理学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 条带噪声是影响遥感图像质量的重要因素之一。在分析遥感 CCD 图像孤立条带噪声产生原因和噪声模型的基础上, 提出了基于二维方向滤波器抑制条带噪声的新方法。该方法利用了窄带方向滤波器良好的图像纹理方向的频率选择特性, 将条带噪声与图像其它信息分离到不同的方向滤波器子带内, 并在水平信息子带内采用均值补偿方法去除条带噪声。实验结果证明它不仅能有效去除 CCD 图像中的随机孤立条带噪声, 还能保持原始图像的辐射入射幅度, 保留细节信息, 较传统的方法相比, 性能有较大的提高。

关键词: 遥感图像; 条带噪声; 方向滤波器; 均值补偿

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A

REMOVAL OF RANDOM STRIPE NOISES IN REMOTE SENSING IMAGE BY DIRECTIONAL FILTER

SHI Guang-Ming¹, WANG Xiao-Tian¹, ZHANG Li¹, LIU Zhe²

(1. School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Stripe noise is one of the most important factors which influence the qualities of remote sensing digital images. A new destriping method based on 2-D directional filtering was proposed based on the analysis of the main causes and characteristics of the stripe noises in remote sensing images. The directional filter can isolate the directional information of the stripe noise from the noised image, so it is easy to uniform the gray value of the image along column by mean equalization. The results prove that this method can effectively remove the stripe noise while keep the detailed information of the original image.

Key words: remote sensing digital image; stripe noise; directional filter; mean equalization

引言

条带噪声是普遍存在于星载、机载多传感器和单传感器光谱仪成像中的噪声现象, 它是卫星在传感器光、电器件扫描地物的成像过程中, 由于传感器的响应不均匀造成的原始数据在一定方向上出现的灰度值连续偏高或偏低。卫星发射前定标期间需要对各探测器进行绝对定标和大气校正^[1], 期望在实际入射亮度相同的情况下, 各探测器能获得相同的输出幅度。但是, 硬件辐射校正不能有效彻底地消除条带噪声的影响。条带噪声和普通的斑点噪声混杂在一起, 掩盖了图像真正的辐射信息, 使图像的

质量降低, 给图像判读带来困难, 严重影响遥感数据的应用效果。

以沿轨扫描 CCD 相机为例, 常见的条带噪声分为两类: 一类是由于多传感器的工艺差异、仪器及元件的老化和内部校准系统的微小误差等导致各个探测单元的转换传递函数不同, 从而造成传感器的电子装置性能及对电磁辐射响应的差异, 这种条带噪声与扫描方向相同且呈周期分布, 称为周期条带。另一类是由于传感器内部每一个 CCD 像元在光谱响应区内的响应函数不一致, 数据系统内定标的一些轻微的错误, 或传感器对信号响应的变化等几个主要原因造成的。这类条带仍与扫描方向相同, 但随

收稿日期: 2007 - 12 - 05, 修回日期: 2008 - 04 - 28

Received date: 2007 - 12 - 05, revised date: 2008 - 04 - 28

基金项目: 国家自然科学基金 (60672125 和 60776795), 国防预研基金和教育部长江学者和创新团队支持计划 (RT0645)

作者简介: 石光明 (1965-), 男, 江西南昌人, 教授, IEEE 会员, 主要研究方向: 智能信号与信息处理。

机、孤立的出现,称为孤立条带。针对传感器之间的周期条带许多学者已经进行了研究和探讨^[2-8],如 Hom, Kautsky^[2]提出的图像灰度值特征匹配方法和 Wegener^[3]改进的直方图匹配法;由 Gadallah^[4]等提出,刘正军^[8]改进的矩匹配法。以上的方法都是在默认条带噪声周期性分布和忽略点噪声影响的前提下进行的。而在实际情况中,传感器内部的 CCD 产生的孤立条带噪声不具有周期性,没有呈缓慢变化的明暗交替特征,不能用常规的方法来消除。同时,斑点噪声的影响必然对去除条带的处理结果带来误差。从条带噪声的方向特性出发,本文提出基于方向滤波器消除条带噪声的方法。

1 线阵 CCD 条带噪声的模型分析与处理方法

孤立条带的产生是由于在成像过程中,各 CCD 像元在光谱响应区内的响应函数不一致造成的。在理想状态下,设各 CCD 在地面光谱响应范围内为线性响应函数,且具有平移不变性。设 C_i 为第 i 个 CCD 像元,则 C_i 的光谱响应函数可以用下式表示:

$$Y_i = k_i X + b_i + n_i(X) \quad (1)$$

式中 Y_i 为 C_i 的响应值,亦即图像的象素灰度值, X 表示地表漫反射的入射幅度, k_i 为像元 i 的增益值, b_i 为其漂移值, n_i 为服从高斯分布的随机噪声。而在实际情况中硅材料本身的质量以及 CCD 的生产工艺造成的 CCD 象素响应不均匀性,使每一个 C_i 的 k_i 和 b_i 取值不同,导致各 CCD 像元对同一入射光强度 X 产生不同的响应灰度值。

含有条带噪声的 CCD 图像模型可表示如下^[6]:

$$I_j[i] = S_j[i] + R[i; S_j[i]] + N_j[i] \quad i = 1, \dots, N_c \quad (2)$$

式中, $I_j[i]$ 表示原始图像第 i 行第 j 列的象素灰度值, CCD 沿行扫描,所以 i 也表示 CCD 的第 i 个像元。 $I_j[i]$ 由三个部分组成: $S_j[i]$ 表示信号的入射幅度; $N_j[i]$ 表示点噪声; $R[i; S_j[i]]$ 表示条带噪声,其大小受当前 CCD 像元特性和入射幅度的共同影响。我们的目标就是从受条带和点噪声共同干扰的图像

中恢复出原始信号 $S_j[i]$ 。在实际应用中,对条带噪声的模型分析和去噪处理可以忽略入射信号幅度的影响,即认为条带噪声的大小只取决于当前 CCD 像元的特性。因此图像模型可以简化为:

$$I_j[i] = S_j[i] + R[i] + N_j[i] \quad i = 1, \dots, N_c \quad (3)$$

图 1 是一幅受条带噪声干扰的某 TD CCD 相机的遥拍图像。采用普通的消噪算法无法有效去除条带噪声干扰,如图 2 是采用近年来已经公认在噪声消除方面取得良好效果的小波软阈值处理结果。可见,小波软阈值去噪在一定程度上消除了点噪声的干扰,但条带噪声依然存在,严重影响着图像的可视性和可处理性。

通过对 CCD 光谱响应函数 (1) 的分析可知,如果能将 Y_i 归一化为同一值 Y ,则可以实现辐射精校正,使条带噪声得到有效去除,这就是矩匹配和均值补偿处理算法的基本思想。但是现有的条带噪声处理算法都假设图像信噪比较高,忽略斑点噪声的干扰,这样会直接造成处理结果有误差,如图 3 所示。针对这一问题,本文采用窄带方向滤波器将条带噪声所在方向的方向信息和原始图像分离,使式 (3) 中含噪图像 I 分为两个部分:

$$\begin{cases} hor(I) = R + hor(S) \\ dt(I) = dt(S) + N \end{cases} \quad (4)$$

$hor(I)$ 部分由条带噪声和图像的水平方向信息组成,称为水平信息。 $dt(I)$ 由点噪声和图像的水平方向信息的补信息组成,称为补信息。条带噪声和点噪声的干扰不再重叠,直接对 $hor(I)$ 去除条带可以达到更精确的效果。去除条带噪声的图像仍然受到随机点噪声的干扰影响,对其再采用小波软阈值处理就可以达到更好的噪声消除效果,恢复出清晰图像。

2 窄带方向滤波器

由二维傅立叶分析可知,图像的纹理方向与图像的主频谱线方向是正交关系。本文的待处理图像



图 1 原始 CCD 图像
Fig. 1 Original CCD image



图 2 小波对图 1 去噪结果的果图像
Fig. 2 Denoise by wavelet



图 3 直接对原始图像去条带
Fig. 3 Result of direct destriping

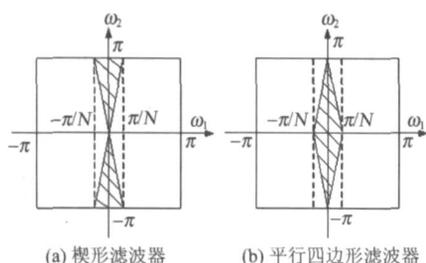


图4 方向滤波器的谱支撑域 (a)楔形滤波器(b)平行四边形滤波器

Fig. 4 Frequency support of the directional filter (a) wedge filter (b) parallelogram filter

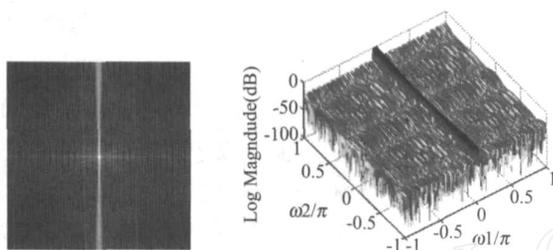


图5 原始 CCD 图像(图 1)的功率谱

Fig. 5 Spectrum of the original CCD image (fig. 1)

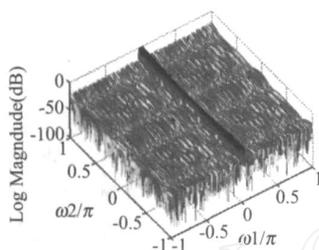


图6 竖直方向窄带楔形滤波器频谱

Fig. 6 Spectrum of the vertical narrow bandwidth filter

(图 1)水平方向信息的功率谱分布如图 5.

可以看出水平方向分量对应于傅立叶频谱图的竖直方向楔形区域. 因此,使用一个竖直方向具有楔形(或近似楔形)支撑域的方向滤波器(图 4(a)),对图像进行滤波,就可以依据该方向滤波器的输出提取图像中的水平方向信息.

设计 2-D 滤波器的方法主要有频率采样法、2-D 窗函数法、加权最小二乘 (Weighted Least Square, WLS)法以及 McClellan 频率变换法等. 采用这些方法设计的滤波器性能受滤波器长度限制,往往不能设计具有较好频率选择性的 2-D 滤波器. 本文采用文献 [7] 给出的方法对 1-D 原型滤波器进行 2-D 下采样实现了具有平行四边形支撑域的 2-D 原型滤波器(图 4(b)),该滤波器不受滤波器长度的限制且具有良好频率选择性. 其中, N 为正整数, N 的大小决定了所设计的楔形滤波器的支撑域宽窄和采样矩阵 \mathbf{M} 的值 ($\mathbf{M} = \begin{pmatrix} N & -N \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$).

本文设计中取 $N = 30$, 1-D 低通线性相位原型滤波器 $p(n)$ 的长度为 $L = 299$, 阻带衰减 $A_s = -28.7$ dB, 平行四边形原型滤波器的长度为 9×299 . 图 4(a)所示的窄带楔形滤波器是我们期望得

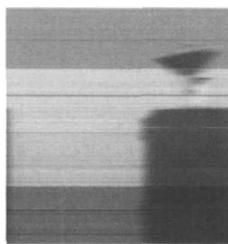


图7 CCD 图像的水平方向信息

Fig. 7 Horizontal information of the CCD image (fig 1)

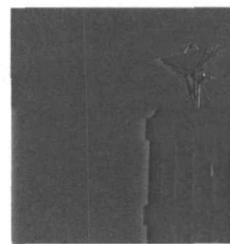


图8 水平方向补信息

Fig. 8 Complement of the horizontal information

到的方向滤波器,它可以由 (b)沿 ω_2 方向调制得到. 图 6是采用这种方法设计的楔形窄带方向滤波器频谱图.

使用方向滤波器对 CCD 图像进行滤波得到式 (4)所示的两个子带. 水平信息子带 hor (图 7)和补信息子带 dt (图 8).

3 均值补偿处理

从图 7、8可以看出,方向滤波器将图像的水平方向信息和其他信息分离,使条带噪声和点噪声处于不同的子带中,从而排除了它们在处理过程中的相互干扰. 对图 7 沿列进行灰度归一化处理可以更精确地去除条带噪声.

由式 (4)可知,信号的水平方向信息 $hor(S)$ 为

$$hor(S) = hor(I) - R \quad (5)$$

由 CCD 条带噪声模型的介绍式 (3)中可知每一行各象素受到条带噪声影响的幅度相同. 因此只要确定出每一行受到的条带噪声干扰幅度 $R[i]$,就可以从含噪图像中恢复出清晰图像.

由 CCD 条带噪声模型的介绍可知不考虑点噪声的情况下,若每个 CCD 像元 C_i 的响应一致,则在相同的成像条件下,任一 C_i 的成像灰度值相同. 因此在 $hor(I)$ 中选取灰度值均匀分布的一列 $hor(I)_{col}$ 作为校正基准列,以该列的均值 m_{col} 作为基准均值,则该列象素灰度值可表示为:

$$hor(I)_{col}[i] = m_{col} + R[i] \quad (6)$$

由式 (6)可以很容易地求出该列上每个象素与基准均值的差即对应行受到的条带噪声干扰大小 $R[i]$. 进行均值补偿可以消除信号水平信息受到的条带噪声干扰:

$$hor(S)[i] = hor(I)[i] - (hor(I)_{col}[i] - m_{col}) \quad (7)$$

对 $hor(I)$ 进行均值补偿处理得到的结果为图 9,可以看出沿列方向的灰度分布不均匀已经被消除. 图 10为均值补偿处理后的水平方向信息(图 9)和补

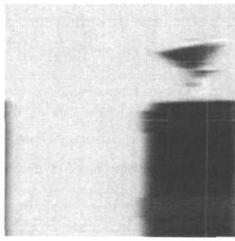


图9 对图7进行均值补偿处理的结果
Fig. 9 Mean equalization of the horizontal information



图10 图8和图9重构的对原始图像的去条带
Fig. 10 Destriping result of original image. Fig. 10 is reconstructed from fig. 8 and fig. 9



图11 小波软阈值平滑处理图10的结果
Fig. 11 Smooth the destriping result fig. 10 by wavelet

信息(图8)重构出的去条带图像。

由于对图8所示的水平方向补信息并未进行处理,从图10所示的对原始CCD图像(图1)去条带结果中可以看出去除了条带噪声的图像仍受到点噪声的影响。再对其进行小波软阈值处理就可以去除点噪声,得到清晰图像如图11所示。

4 结果评价

本文采用的去条带结果评价标准包括图像均值保留、方差减小和平滑指数^[9] FI($FI = \mu_x / \sigma_x$)的提高。对原始CCD图像和经本文处理得到的两个结果进行了统计,并与传统算法矩匹配进行比较,统计结果如表1所示。图12(a)~(c)分别显示了原始CCD图像(图1)、去条带结果(图10)和用小波对去条带结果进行平滑处理结果(图11)的基准列象素灰度值的剖面线图。

5 结论

本文提出了一种结合方向滤波器和空域均值补偿的方法来去除遥感CCD图像中的非周期性条带噪声。从处理的结果图像和评价参数中可以看出,与其它已有的方法相比,该方法能够很有效地消除混有斑点噪声的CCD条带噪声,在保持图像原始辐射幅度和图像纹理细节信息的同时降低了方差,提高了平滑指数。从基准列的剖面线图可以看出,受到条

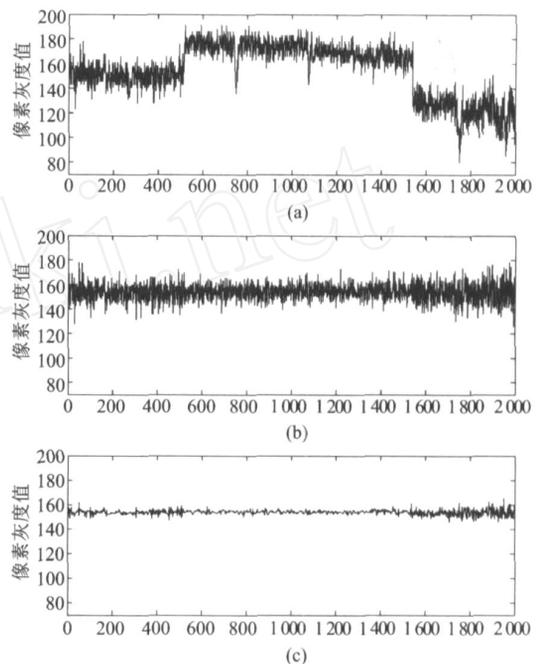


图12 基准列象素灰度值剖面线图(a)原始CCD图像(图1)(b)去条带结果图像(图10)(c)小波平滑结果图像(图11)

Fig 12 Section plane of the gray value of the basic column (a) original CCD image (b) destriped image (fig 10) (c) wavelet denoised image (fig 11)

带噪声干扰的图像处理后灰度分布均匀,消除了条带的影响。

REFERENCES

[1] PENG Guang-Xiong, HE Yu-Hua, LI Jing, et al. Study on CBERS-2's CCD image cross calibration and atmospheric correction [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (彭光雄,何宇华,李京,等.中巴地球资源02星CCD图像交叉定标与大气校正研究.红外与毫米波学报), 2007, 26(1): 22—26

[2] Kautsky J, Nichols N K, Jupp D L B. Smoothed histogram modification for image processing [J]. *J. Comput Vis & Image Process*, 1984, 26: 271—291.

[3] Wegener M. Destriping multiple sensor imagery by improved histogram matching [J]. *J. Int J Remote Sensing*, 1999, 11

表1 统计结果显示

Table 1 Statistic result

	CCD图像 (fig 1)	矩匹配	本文方法去条带 (fig 10)	平滑去条带图像 (fig 11)
FI	3.5	4.3	4.3	4.5
均值	136.0	135.8	136.0	136.0
图像方差	1487.9	1012.5	967.4	922.9
基准列方差	462.2	101.7	46.1	3.2
基准列均值	154.1	153.9	154.1	154.0
列方差均值	1016.9	542.4	496.4	451.9

- (5): 859—875.
- [4] Gadallah F L, Csillag F. Destriping multisensor imagery with moment matching[J]. *J. Int J Remote Sensing*, 2000, **21**(12): 2505—2511.
- [5] FENGLin, LU Shuang, ZHAO Kai-Sheng, et al. Method of nonuniformity correction for RFPA with nonlinear response[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (冯林, 刘爽, 赵凯生等. 考虑红外焦平面期间非线性响应的一种非均匀性校正方法. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(3): 221—224.
- [6] Giovanni Corsini, Marco Diani, Thomas Walzel. Striping removal in MOSB data[J]. *J. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, **38**: 1439—1446.
- [7] Chen T, Vaidyanathan P P. Multidimensional multirate filters and filter banks derived from one-dimensional filters [J]. *J. IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, **41**: 1749—1765.
- [8] Liu Zheng-Jun, Wang Chang-Yao, Wang Cheng. Destriping imaging spectrometer data by an improved moment matching method[J]. *J. Journal of Remote Sensing* (刘正军, 王长耀, 王成. 成像光谱仪条带噪声去除的改进矩匹配方法. *遥感学报*), 2002, **6**(4): 280—284.
- [9] Shi Xiao-Ming, Wang Xiao-Qin, Ling Fei-Long, et al. The application of multichannel filtering for ASAR data[C]. *C. Conference of Image and Graphics* (史晓明, 汪小钦, 凌飞龙, 等. 基于多通道滤波算法的 ASAR 数据滤波研究. *中国图象图形学术会议论文集*), 2005, 738 - 742.

(上接 209页)

REFERENCES

- [1] SHAO Yong-Ni, HE Yong. Method for predicting acidity of bayberry juice by using vis/near infrared spectra [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (邵咏妮, 何勇. 可见近红外光谱预测杨梅汁酸度的方法研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(6): 478—480.
- [2] JWU Di, FENG Lei, ZHANG Chuan-Qing, et al. Early detection of gray mold (cinerea) on eggplant leaves based on vis/near infrared spectra [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴迪, 冯雷, 张传清, 等. 基于可见近红外光谱技术的茄子叶片灰霉病早期检测研究. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(4): 269—273.
- [3] Luybaert J, Massart D L, Vander Heyden Y. Near-infrared spectroscopy applications in pharmaceutical analysis [J]. *Talanta*, **72**(2007): 865—883.
- [4] QU Hai-Bin, YANG Hai-Lei, CHENG Yi-Yu. Fast and nondestructive discrimination of Donkeyhide Glue by near-infrared spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (瞿海斌, 杨海雷, 程翼宇. 近红外漫反射光谱法快速无损鉴别阿胶真伪. *光谱学与光谱分析*), 2006, **26**(1): 60—62.
- [5] XIE H P, JIANG J H, CHEN Z Q. Chemometric classification of traditional Chinese medicines by their geographical origins using near-infrared reflectance spectra [J]. *Analytical Sciences*, 2006, **22**: 1111—1116.
- [6] Woo YA, Kim H J, Ze KR. Near-infrared spectroscopy for the non-destructive and fast determination of geographical origin of *Angelicae gigantis radix* [J]. *J. Phram. Biomed*, 2005, **36**: 955—959.
- [7] LU Guo-Lin, CHEN Guo-Guang, XANG Bin-Ren, et al. Study on quantitative analysis of Yuanhu Zhitongsan pulvis using near infrared spectrometry [J]. *The Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy* (刘国林, 陈国广, 相秉仁, 等. 近红外光谱技术在元胡止痛散定量分析中的初步应用研究. *中国现代应用药学杂志*), 2000, **17**(5): 383—385.
- [8] LU Xue-Song, CHENG Yi-Yu. Fuzzy neural network classifier for fast evaluating the quality of Chinese traditional medicine products using near infrared spectroscopy [J]. *ACTA CHIMICA SINICA* (刘雪松, 程翼宇. 用于中药药品质量快速检测的近红外光谱模糊神经元分类方法. *化学学报*), 2005, **63**(24): 2216—2220.
- [9] SONG Li-Li, FAN Bin-Yi, XU Xiao-Jie, et al. Determination of ursolic acid of Liuwei Dihuang wan simulation samples by NIR [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica* (宋丽丽, 范丙义, 徐晓杰, 等. 近红外光谱法用于六味地黄丸模拟样品中熊果酸的含量测定. *中国中药杂志*), 2006, **31**(19): 1590—1593.
- [10] YU Ke, HU Chu-Chu, CHENG Yi-Yu. A novel method for fast determination of three active components in Compound Danshen Dropping Pills by near infrared spectroscopy [J]. *Chin Pharm. J.* (虞科, 胡楚楚, 程翼宇. 近红外光谱法测定复方丹参滴丸中的3种有效成分. *中国药学杂志*), 2006, **41**(3): 226—229.
- [11] Whitfield R G, Gerger M E, Sharp R L. Near-infrared spectrum qualification via mahalanobis distance determination [J]. *Appl Spectrosc* 1987, **41**(7): 1204—1213.
- [12] McCarthy W J. *TQ Analyst User's Guide* [M]. Madison: WI Thermo Nicolet Corp, 2000.