

# 推扫式遥感相机图像条带噪声去除方法

郭玲玲<sup>1,2</sup> 吴泽鹏<sup>1,2</sup> 张立国<sup>1</sup> 张星祥<sup>1</sup> 任建岳<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 推扫式遥感相机图像中存在微弱的条带噪声, 干扰数据分析精度和后续图像处理。在分析其噪声特性后, 提出了一种去除条带噪声的方法。以相对平坦区作为参考图像, 获取垂轨边缘信息并进行图像形态学处理, 从而获得各像元的校正参数来对图像进行补偿。实验表明, 可以将遥感图像峰值信噪比由 32 dB 提升到 48 dB; 相较于目前已有的去条带噪声方法, 该方法处理的图像畸变较小, 变异逆系数及信噪比提升幅度较大, 在有效去除条带噪声的同时保留了原图像灰度信息, 提高了图像质量。

**关键词** 光学遥感; 条带噪声; 像素校正; 图像形态学处理

中图分类号 TP751.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0828001

## Destriping of Remote Sensing Images with Applications to Push-Broom-Type Cameras

Guo Lingling<sup>1,2</sup> Wu Zepeng<sup>1,2</sup> Zhang Liguo<sup>1</sup> Zhang Xingxiang<sup>1</sup> Ren Jianyue<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Stripe noise is common to most push-broom-type imagers and it perturbs both image quality analysis and the posterior processing. Based on the analysis of the the characteristics of the stripe noise, a new destriping method is proposed. By taking a quasi-homogeneous region as a reference, ideal data of the striped area can be estimated and be used to compute correction parameters. The cross-track edge information is extracted and processed using morphological techniques. Experiments carried out on real remote sensing data demonstrate that the proposed method can bring peak signal-to-noise ratio from 32 dB up to 48 dB. Compared to the existing typical algorithms, this destriping method can achieve lower image distortion, higher inverse coefficient of variation and peak signal-to-noise ratio. By reducing stripe noise and reserving useful details, the image quality is improved effectively.

**Key words** optical remote sensing; stripe noise; intensity correction; morphological image processing

**OCIS codes** 280.4788; 100.1830; 100.3190; 100.1455

## 1 引言

条带噪声是航天遥感图像中一种普遍存在的噪声, 其主要是由成像过程中电荷耦合器件 (CCD) 像元之间的响应非均匀性导致的。目前的相机通过发射前辐射定标和在轨辐射定标<sup>[1,2]</sup>, 能够将条带噪

声抑制在较小范围里, 但还是不能彻底消除条带噪声。残留的微弱条带噪声不仅干扰成像质量, 而且还会给后续图像处理带来不便, 所以条带噪声的去除是遥感图像预处理中的关键一步。

条带噪声的特征与扫描成像方式有关: 摆扫式

收稿日期: 2012-12-20; 收到修改稿日期: 2013-01-09

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(201000526)资助课题。

作者简介: 郭玲玲(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事空间光学遥感图像反卷积复原方面的研究。

E-mail: guolingl@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 任建岳(1952—), 男, 博士, 研究员, 主要从事空间光学及光机电系统等方面的研究。

E-mail: renjy@ciomp.ac.cn

相机中条带噪声垂直于扫描方向,对应探测像元数成周期性分布;而推扫式遥感相机中带噪声沿扫描方向分布,不具有周期性。

国内外去除条带噪声主要采用两类方法:基于滤波的方法和基于图像灰度特征统计的方法。滤波方法主要用来去除周期性或高频条带噪声,常用的有空间-频率域滤波<sup>[3,4]</sup>和基于小波域的滤波<sup>[5]</sup>。滤波方法可适用于小尺寸图像,但因难于选择频率成分,故易损失有用的图像细节信息。而统计方法是建立在各个传感器具有相同统计特性这一假设上的,该类方法主要有直方图匹配、矩匹配以及它们的改进方法<sup>[6]</sup>,一般情况下矩匹配可以获得比直方图匹配更佳的效果<sup>[7]</sup>。最近 Bouali 等<sup>[8]</sup>用一种更实际的变分关系代替了相同统计特性的假设,提出一种优化去噪方法。去噪方法在去除条带噪声的同时,也会造成不同程度的灰度畸变,如何完全去除条带噪声而不干扰有用信号仍未见报道。

本文针对推扫式遥感相机图像中的条带噪声特性,提出了一种基于参考区域的去噪方法。从捕获的遥感图像中,选择与感兴趣区域共用 CCD 通道、纹理较少的区域作为参考区域。通过对参考区域提取边界信息并进行形态学处理,得到 CCD 阵列各像元的校正参数对感兴趣区域的图像进行补偿。该方法不依赖图像的统计信息,故对小尺寸图像同样适用;校正参数较精确,可以有效去除幅度微弱的条带噪声,而且对图像造成的灰度畸变小。

## 2 条带噪声分析及建模

将沿轨方向定义为行向,垂轨方向定义为列向,那么在忽略随机点噪声  $n(r,c)$  的影响时,CCD 的响应可以近似为仿射变换函数<sup>[4]</sup>:

$$y(r,c) = g(c)x(r,c) + o(c), \quad (1)$$

式中  $y(r,c)$  为相机获得的第  $r$  行,第  $c$  列的数据, $x(r,c)$  为响应一致情况下的理想数据, $g(c)$  与  $o(c)$  分别为增益值和偏置值。图 1 为一推扫式遥感相机获得的原始图像,有效的辐射定标技术使得在原始图像中人眼几乎观察不到条带噪声。但是,条带噪声并没有彻底消除。图 2 为图 1 中第 81~152 行、第 441~512 行图像数据灰度动态范围拉伸后显示的效果。

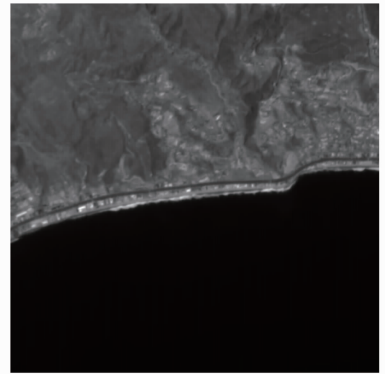


图 1 推扫式遥感相机图像中 512 pixel×512 pixel 大小的截图

Fig. 1 Subimage of 512 pixel×512 pixel extracted from image of a satellite-based push-broom-type remote sensing camera

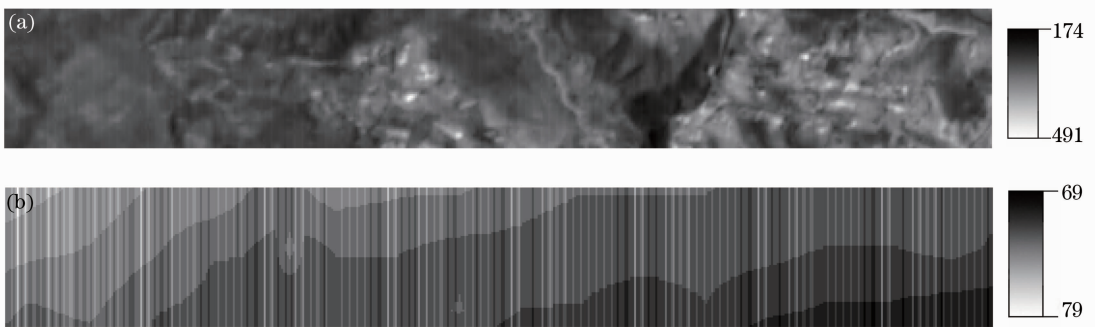


图 2 图 1 中局部灰度拉伸显示的结果。(a)纹理丰富区域和(b)相对平坦区域的灰度拉伸显示结果

Fig. 2 Local contrast-stretched subimages of Fig. 1. (a) Region containing abundant texture and (b) a quasi-homogeneous region

从局部拉伸显示后的图像中可以较明显看到条带噪声的存在,尤其是原先平坦、纹理少的区域。虽然这些噪声在原图像中几乎分辨不出,但是,这些微弱的条带噪声会干扰成像质量分析,如调制传递函数(MTF)指标计算,并且为后续图像处理带来不

便。图 3(b)为对图 3(a)直接进行复原的结果,图 3(a)中无明显的条带,但由于复原过程中条带噪声被放大,图 3(b)中有较明显的条带。尽管条带噪声较弱,但在遥感图像预处理中对其去除不可或缺。

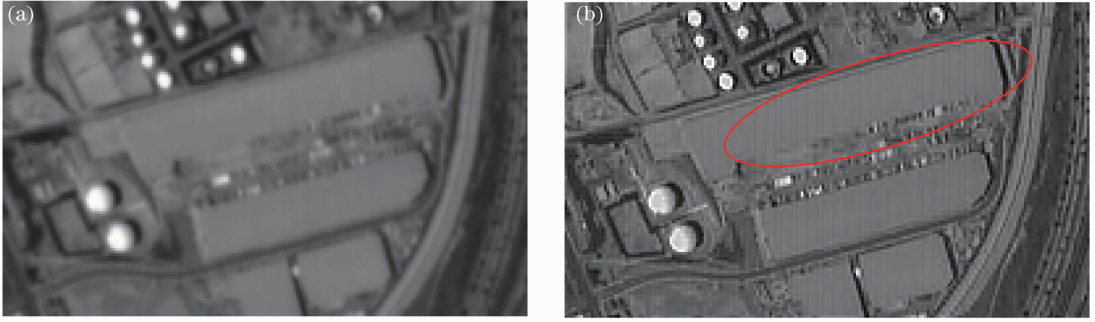


图3 微弱条带噪声对图像复原的影响。(a)原始图像；(b)复原图像

Fig. 3 Influence of slight stripe noise on image restoration. (a) Raw image; (b) restored image

需要处理的条带噪声具有如下特点:1)条带噪声共有的特性——方向性;2)沿列方向随机分布,不具有周期性,不适用空间-频率域滤波方法去除;3)噪声幅度微小,故需要较精确的校正参数。

### 3 微弱条带噪声去除方法

对于非周期条带噪声,基于图像灰度统计特性的处理方法对小尺寸图像处理效果较差;基于单向变分的优化方法涉及矩阵的迭代求解最小值问题,运行效率和稳定性不佳。针对已有方法存在的不足,本文提出一种稳定有效的条带噪声去除方法,通过相对平坦区域的图像获得较精确的参数  $g(c)$  与  $o(c)$  对感兴趣区域图像进行补偿,不依赖图像的灰度统计信息。

#### 3.1 参考区域选择

由于条带噪声集中在沿轨方向(竖直方向),故可对图像求水平边缘:

$$E_r(r, c) = \frac{\partial y}{\partial r}, \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式有

$$E_r(r, c) = g(c) \cdot \frac{\partial x}{\partial r}. \quad (3)$$

相对平坦的区域纹理不丰富,故其  $E_r(r, c)$  的值多等于0。图4为图2(b)的水平边缘  $E_r(r, c)$  构成的图像,由图4可以看出,原图像的水平边缘将图像分割成若干小区域,每个小区域内部灰度值一致。由此可以在原图中对应区域内统计其均值或众数,作为该区域的  $x(r, c)$  的值,待估算出所有  $x(r, c)$  后,对每一固定的  $c$ ,利用该列所有的  $y(r, c)$  与  $x(r, c)$ ,可以求出  $g(c)$  与  $o(c)$ 。

由于随机点噪声的存在以及滤除了竖直边缘,图4所示的边缘不能够直接作为灰度一致小区域的分割界限,其边缘线存在不闭合位置。直接引用该信息会导致灰度本不一致的区域连通在一起,故需

要先对  $E_r(r, c)$  构成的图像进行连接处理。

#### 3.2 形态学处理

图4所示的边缘信息中,除了边缘位置外,边缘处的  $E_r(r, c)$  值也是很重要的信息。由于图2(b)所示的海洋区域是相对平坦的,故图4中几乎所有边缘处的  $E_r(r, c)$  值等于1或-1,即原始图像中边缘两边区域灰度差异只有1(图像总灰度等级为1024)。在连接处理中,将对应不同非零  $E_r(r, c)$  值的边缘线分开考虑,则每次处理的都是一幅二值图像。由于点噪声的存在,  $E_r(r, c)$  值会出现孤立的非连续点(如图4中有一个值为-2的孤立点),该类点属于无效点,应予以剔除。实际应用中的成像系统,通过噪声抑制处理后最终图像中加性随机点噪声分布稀疏<sup>[9,10]</sup>,在图4所示的水平边缘图像中,对该类孤立点可以有效分辨并剔除。设所有  $E_r(r, c)$  中,有效非零元素值分别为  $e_i (i = 1, \dots, m)$ , 则不考虑噪声时,有

$$\mathbf{E}_r = \sum_{i=1}^m e_i \cdot (\mathbf{E}_r == e_i), \quad (4)$$

式中  $\mathbf{E}_r$  表示由  $E_r(r, c)$  构成的矩阵,“==”表示关系判断符,  $(\mathbf{E}_r == e_i)$  的结果为二值矩阵,若  $E_r(r, c) = e_i$ , 则矩阵中  $(r, c)$  位置处值为1,否则为0。对每个二值矩阵进行如下的形态学处理:1)使用一个  $5 \text{ pixel} \times 3 \text{ pixel}$  的结构元素膨胀;2)将物体细化到最低限度没有断点的线。最后将处理后的二值矩阵按照对应的系数相加,得到闭合的边界信息矩阵。图5为对图4进行形态学处理后的结果,对比图4可以发现原先断点被桥接上了。

将图5所示的非零值作为边界,对每个区域统计其众数作为该区域的  $x(r, c)$  的值,得到响应一致时理想数据的估计值如图6所示。

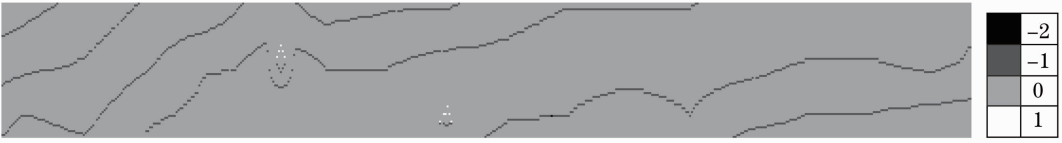


图 4 相对平坦区域的水平边缘

Fig. 4 Horizontal edge of a quasi-homogeneous area



图 5 水平边缘连接处理后矩阵

Fig. 5 Bridged horizontal edge matrix



图 6 响应一致时理想数据的估计值

Fig. 6 Estimated result of the perfect data in consistent response

### 3.3 参数计算

由(3)式计算  $g(c)$ , 为了使结果尽可能准确, 利用尽可能多行的数据。考虑到点噪声的影响, 需要滤除  $\frac{\partial x}{\partial r} = 0$  而  $\frac{\partial y}{\partial r} \neq 0$  的点。对于其余有效点, 定义

$$g(c) = \begin{cases} 1, & \left(\frac{\partial y}{\partial r} = \frac{\partial x}{\partial r} = 0\right) \\ \frac{\partial y}{\partial r} / \frac{\partial x}{\partial r}, & \left(\frac{\partial x}{\partial r} \neq 0\right) \end{cases} \quad (5)$$

最后对每一列结果取均值作为该列的  $g(c)$  值。在得到了  $g(c)$  的基础上, 利用(1)式即可求出  $o(c)$  值。由图 2(b) 及图 6 所示数据计算所得参数如图 7 所示。

## 4 实验与分析

为了验证本文方法的有效性, 分别对仿真数据和实际遥感数据进行处理, 并将其与 3.1 节提及的现有条带噪声去除方法进行对比。为了客观分析去噪效果, 使用图像畸变量  $f_{ID}$ 、变异逆系数  $f_{ICV}$  及峰值信噪比  $f_{PSNR}$ <sup>[8]</sup> 作为评价指标。设  $Q_0$ 、 $Q_1$  分别为含噪图像及去噪图像沿列方向的功率谱均值, 图像畸变量的定义为

$$f_{ID} = \frac{\sum Q_0}{\sum Q_1}. \quad (6)$$

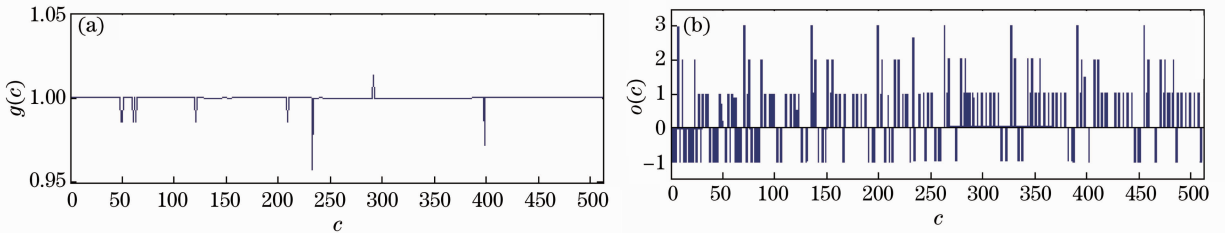


图 7 增益值  $g(c)$  与偏置值  $o(c)$  计算结果

Fig. 7 Computed result of gain  $g(c)$  and offset  $o(c)$

变异逆系数定义为近似各向同性区域上的均值  $\mu$  与标准差  $\sigma$  之比:

$$f_{ICV} = \frac{\mu}{\sigma}. \quad (7)$$

对  $R$  pixel  $\times$   $C$  pixel 大小的去噪后图像  $X_d$ , 峰值信噪比(单位为 dB)定义为

$$f_{PSNR} = 10 \lg \left( \frac{R_d^2 RC}{\|X_d - X_r\|^2} \right), \quad (8)$$

式中  $X_r$  为基准图像,  $R_d$  为动态范围(仿真数据为 255, 实验所用遥感数据为 1023)。使用客观指标分析时, 必须综合考虑以上所有指标, 不能由单独某个指标确定去噪效果好坏。



#### 4.1 仿真结果及讨论

图8为被噪声污染的图像,其左边条带噪声较微弱,右边条带噪声较严重。图9为使用改进的矩匹配法<sup>[7]</sup>、方向滤波器法<sup>[4]</sup>、基于单向变分的优化方法<sup>[8]</sup>及本文方法进行去噪处理后的图像。

由图9中可见,严重的条带噪声在处理中均得

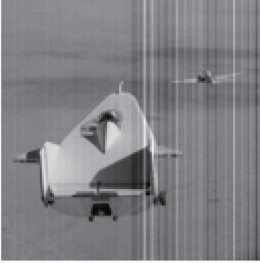


图8 128 pixel×128 pixel 的图像

Fig. 8 Striped image of size 128 pixel×128 pixel

到较大程度的抑制,改进的矩匹配法与方向滤波器法在去噪过程中均使用了地物分布均匀的假设,而仿真图像明显不满足该假设,故而处理后的图像中带状效应明显;基于单向变分的优化方法与本文方法去噪效果较好,而前者在优化求解过程中,每次循环中需寻找 128 pixel×128 pixel 大小的矩阵使得约束泛函局部最小,收敛速度及收敛结果与给定的初值有很大关系,不合适的初值可能导致更严重的图像信息丢失。由表1所列各方法的去噪客观指标可知,本文方法的处理效果略优于基于单向变分的优化方法。

仿真实验表明,本文方法不依赖地物分布的统计信息,可稳定地去除条带噪声,图像畸变量小。实际大视场遥感图像中存在大面积的海洋、湖泊等较平坦区域,有利于该方法的实施。

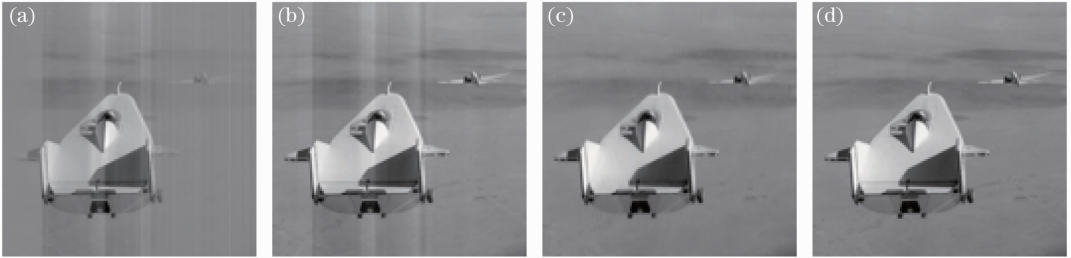


图9 不同方法的去噪结果

Fig. 9 Simulation results using different destriping methods

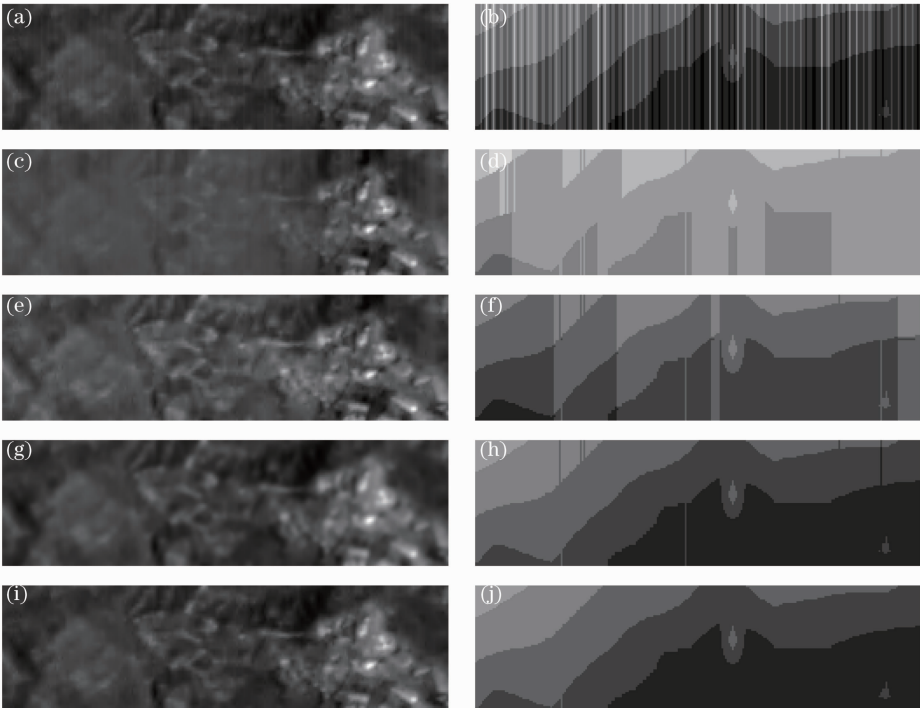


图10 不同方法对实际遥感图像的去噪结果

Fig. 10 Destriped results of real remote sensing images using different methods

表 1 客观指标对比表

Table 1 Comparison of evaluation indexes for simulated data

Method	Striped	Modified moment	Directional filter	Unidirectional variation	Proposed
Image	Fig. 8	Fig. 9(a)	Fig. 9(b)	Fig. 9(c)	Fig. 9(d)
$f_{ID}$	—	1.0073	0.9983	0.9960	0.9936
$f_{ICV}$	10.24	58.34	85.11	102.31	109.35
$f_{PSNR}$	26.33	28.79	27.89	48.01	54.25

#### 4.2 实际遥感数据去噪处理

对图 1 中被微弱条带噪声污染的推扫式遥感相机图像,使用现有算法及本文方法进行去噪处理。为了直观辨析去噪效果,分别将其中纹理丰富区域[图 10(a),(c),(e),(g),(i)]与相对平坦区域[图 10(b),(d),(f),(h),(j)]灰度拉伸显示,其中图 10(a),(b)为原始被条带噪声污染图像,图 10(c)~(j)分别为使用改进矩匹配法、方向滤波器法、基于单向变分的优化方法及本文方法去噪结果。

图 11 为图 10(a),(c),(e),(g),(i)均值曲线(只显示了第 1~90 列)。图 11 表明,原遥感图像[图 10(a),(b)]均值存在小幅度的频繁抖动,而在图 10(c)~(j)中,该抖动得到不同程度抑制,但是改进的矩匹配法与方向滤波器法均对图像灰度造成了较大的畸变。表 2 为去条带噪声处理后的客观指标统计结果。对于微弱条带噪声,直观去噪效果较好的为基于单向变分的优化方法及本文提出的方法,

而本文方法处理后的图像畸变量  $f_{ID}$  较小,且可将变异逆系数  $f_{ICV}$  由 62.44 提升至 147.92,峰值信噪比  $f_{PSNR}$  由 32.03 dB 提升至 48.06 dB,提升幅度略大于基于单向变分的优化方法。故而使用本文方法处理条带噪声可以获得更高质量的图像。

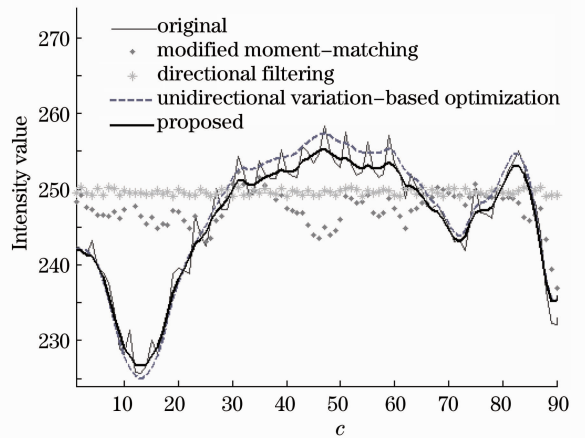


图 11 行均值曲线

Fig. 11 Mean line profiles

表 2 实际遥感图像去条带噪声结果指标对比表

Table 2 Comparison of destriping evaluation indexes for real remote sensing data

Method	Striped	Modified moment	Directional filter	Unidirectional variation	Proposed
Image	Fig. 10(a)	Fig. 10(c)	Fig. 10(e)	Fig. 10(g)	Fig. 10(i)
$f_{ID}$	—	1.0140	1.0034	0.9976	0.9942
$f_{ICV}$	62.44	116.31	126.76	128.47	147.92
$f_{PSNR}$	32.03	30.98	33.37	43.11	48.06

## 5 结 论

通过分析推扫式遥感相机图像的条带噪声特性,提出了一种去条带噪声方法。以遥感图像中与感兴趣区域共用 CCD 通道,但较平坦、纹理少的区域为基础,提取垂轨方向边缘信息并进行形态学处理,计算得到 CCD 阵列各像元的校正参数用于对原图像补偿。实验结果表明,该方法可以将遥感图像峰值信噪比由 32 dB 提升到 48 dB;无论直观效果还是客观评价指标都优于现有的几种典型去噪算法,有效去除遥感图像中微弱条带噪声的同时较大程度保留了图像灰度信息,提高了图像质量。

## 参 考 文 献

- Zhai Wenchao, Li Jianjun, Zheng Xiaobing *et al.*. Research on method of calibration sun channels of sun radiometers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0412004
- 翟文超, 李健军, 郑小兵 等. 太阳辐射计直射通道实验室定标方法研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0412004
- Xu Weiwei, Zhang Liming, Yang Benyong *et al.*. On-orbit radiometric calibration based on gray-scale tarps [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0212007
- 许伟伟, 张黎明, 杨本永 等. 基于多灰阶靶标的在轨辐射定标方法研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0212007
- Jinsong Chen, Yun Shao, Huadong Guo *et al.*. Destriping CMODIS data by power filtering [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(9): 2119~2124
- Shi Guangming, Wang Xiaotian, Zhang Li *et al.*. Removal of random stripe noises in remote sensing image by directional filter [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2008, **27**(3): 214~218

- 石光明, 王晓甜, 张 犁等. 基于方向滤波器消除遥感图像孤立条带噪声的方法[J]. 红外与毫米波学报, 2008, **27**(3): 214~218
- 5 J. Torres, S. O. Infante. Wavelet analysis for the elimination of striping noise in satellite images [J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(7): 1309~1314
- 6 P. Rakwatin, W. Takeuchi, Y. Yasuoka. Stripe noise reduction in MODIS data by combining histogram matching with facet filter [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(6): 1844~1856
- 7 Han Ling, Dong Lianfeng, Zhang Min *et al.*. Destriping hyperspectral image based on an improved moment matching method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3333~3338
- 韩 玲, 董连凤, 张 敏等. 基于改进的矩匹配方法高光谱影像条带噪声滤波技术[J]. 光学学报, 2009, **29**(12): 3333~3338
- 8 M. Bouali, S. Ladjal. Toward optimal destriping of MODIS data using a unidirectional variational model [J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2011, **49**(8): 2924~2935
- 9 Fu Qiang, Xiangli Bin, Jing Juanjuan. System signal-to-noise ratio analysis based on imaging chain model in multispectral remote sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0211001
- 付 强, 相里斌, 景娟娟. 基于多光谱遥感成像链模型的系统信噪比分析[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0211001
- 10 Dong Jihui, Hu Qiquan, Sun Dongsong. Techniques of depressing image noise in laser imaging tracking system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0109002
- 董吉辉, 胡企铨, 孙东松. 空间激光成像跟踪系统中的图像噪声抑制技术[J]. 中国激光, 2011, **38**(1): 0109002

栏目编辑: 李文喆