

基于全变分的航空图像条带噪声消除方法

周达标^{1,2,3} 李刚^{1,3} 王德江^{1,3} 贾平^{1,3}

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中科院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033
² 中国科学院大学, 北京 100049
³ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 条带噪声会影响推扫式航空相机成像质量, 去除条带噪声是提高后续数据分析精度的关键环节。分析了航空图像条带噪声的主要来源和模型, 提出了一种基于全变分的抑制条带噪声方法。根据相对平坦区域估计每个像素的增益和偏置值, 利用全变分模型, 采用梯度下降法迭代求解进行图像重构。实验结果表明, 仿真图像峰值信噪比从 31 dB 提高到 40 dB, 实际航拍图像辐射质量提升因子提高到 9 dB。与传统方法相比, 该方法处理的图像变异逆系数和辐射质量提升因子有所提高, 有效去除图像中的条带噪声, 保留原图像的细节信息。

关键词 遥感; 条带噪声; 非均匀性矫正; 全变分

中图分类号 TP751.1 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201434.1128003

Method of Destriping Stripe Noise of Aerial Images Based on Total Variation

Zhou Dabiao^{1,2,3} Li Gang^{1,3} Wang Dejiang^{1,3} Jia Ping^{1,3}

¹ Key laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Stripe noise perturbs image qualities of push-broom-type aerial camera, thus eliminating stripe noise is of vital importance to improve the precision of posterior data analysis. The main sources and the model of stripe noise in aerial images are analyzed and a new destriping stripe noise algorithm based on total variation is proposed. The gain and offset of each pixel are estimated based on quasi-homogeneous regions. The total variation algorithm is utilized and the image is reconstructed by the gradient descent method iteratively. The qualitative analysis results demonstrate that the peak signal-to-noise ratio of the simulated image is improved from 31 dB to 40 dB and the improvement factor of radiometric quality of the real aerial image is improved to 9 dB. Compared with traditional methods, the proposed algorithm can achieve higher inverse coefficient of variation and improvement factors of radiometric quality. Stripe noise can be effectively removed with detailed information of the original image reserved.

Key words remote sensing; stripe noise; non-uniformity correction; total variation

OCIS codes 280.4788; 250.0040; 040.1520; 110.2960; 100.3190

收稿日期: 2014-05-07; **收到修改稿日期:** 2014-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(61308099)

作者简介: 周达标(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事图像处理和模式识别方面的研究。

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

导师简介: 贾平(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学动态成像控制和图像处理技术等方面的研究。

E-mail: jiap@ciomp.ac.cn

1 引 言

条带噪声普遍存在于机载、星载成像系统中。条带噪声主要是由电荷耦合器件(CCD)像元之间的响应非均匀性造成的,使原始数据在垂直于扫描方向上出现灰度值频繁抖动。条带噪声影响图像视觉质量,降低后续数据分析精度,甚至导致不可预测的错误。因此,去除条带噪声是航空图像预处理中的重要步骤。

去除条带噪声的方法主要可以分为两类:基于标定的方法和基于图像灰度特征统计的方法。基于标定的方法主要包括实验室标定^[1]和在轨标定,这类方法具有较高的精度,但由于 CCD 器件随时间老化,所以需要重复标定。基于图像灰度特征统计的方法主要包括滤波法、匹配法^[2-3]和变分法^[4]等。滤波法主要适用于周期性条带噪声,但容易丢失图像高频信息,导致图像模糊,产生振铃效应;直方图匹配和矩匹配方法要求各传感器具有相同的灰度统计特性,当图像尺寸较小或地物分布不均匀时,去噪效果不佳。变分方法通过最小化能量函数,在平滑噪声的同时能够保持图像边缘,去噪效果较好。以上每种方法都能去除部分条带噪声,但都不可避免地损失图像细节,造成图像模糊。如何完全去除条带噪声并保留原始图像的细节是研究的难点。

从条带噪声模型出发,根据条带噪声的特点,提出了一种基于全变分的条带噪声去除方法。选取相对平坦、纹理较少的区域为参考区域,并估计每个像元的矫正参数。在全变分的框架下,利用梯度下降法使能量函数最小化,通过迭代得到去噪后的图像。对仿真图像和实际航拍图像进行去噪处理,实验结果表明,与传统方法相比,本文去噪效果更为理想。

2 线阵 CCD 条带噪声模型分析

推扫式航空相机使用线阵 CCD 探测器成像,产生的条带噪声沿扫描方向分布^[5],噪声大小受 CCD 像元特性和入射幅度的共同影响。对于具体的某一个推扫式航空相机,条带噪声位置相对稳定,噪声大小也有一定规律。在理想状态下,可以假设 CCD 像元的辐射响应函数为线性函数,且具有平移不变性^[6]。将相机扫描方向定义为列向,垂直于列向定义为行向,CCD 的辐射响应函数表示为

$$I(r, c) = k(c)u(r, c) + b(c), \quad (1)$$

式中 $I(r, c)$ 为图像第 r 行、第 c 列的像素灰度值, $u(r, c)$ 表示 CCD 探测器接收的辐射能量幅度, $k(c)$

和 $b(c)$ 分别为增益值和偏置值。

在实际情况下,图像还受暗电流噪声、散粒噪声和电路读出噪声等随机噪声的影响,这类噪声可以被认为是加性噪声。即

$$I(r, c) = k(c)u(r, c) + b(c) + n(r, c), \quad (2)$$

式中 $n(r, c)$ 为服从高斯分布的随机噪声。虽然采用小波软阈值、均值滤波^[7]等算法可以抑制随机噪声,但并不能完全消除随机噪声。可见,由于 $k(c)$ 和 $b(c)$ 的取值不同,以及 $n(r, c)$ 的影响,导致相同的入射幅度输入产生不同的灰度值输出 I_j 。如果能将 I_j 归一化为同一值 I ,则可以实现辐射响应的非均匀性校正,使条带噪声得到有效的去除。

在信噪比较高的区域,忽略随机噪声 $n(r, c)$ 的影响,则(2)式可以转化为

$$u(r, c) = \frac{1}{k(c)}I(r, c) - \frac{b(c)}{k(c)}, \quad (3)$$

因此,去条带噪声问题转化为 $k(c)$ 和 $b(c)$ 的估计问题。只要估计出信噪比较高区域 $k(c)$ 和 $b(c)$ 的值,便可以矫正图像第 c 列像素值,将条带噪声去除。

3 去噪算法设计

根据第 2 节的分析,提出了基于全变分的条带噪声去除方法。以相对平坦的区域作为参考区域,估计出 $k(c)$ 和 $b(c)$ 的值,再通过全变分方法迭代求解,得到去噪图像。

3.1 矫正参数估计

在(3)式中,为了计算出 $k(c)$ 和 $b(c)$ 的值,需要估计出每列像素中至少两个像素的真值 u_1 和 u_2 。由于图像存在列方向的噪声,故图像对列的偏导数 $|\partial I(r, c)/\partial c|$ 远大于图像对行的偏导数 $|\partial I(r, c)/\partial r|$, 即

$$\left| \frac{\partial I(r, c)}{\partial r} \right| \ll \left| \frac{\partial I(r, c)}{\partial c} \right|, \quad (4)$$

(1)式中,对行求一阶偏导数,有

$$\frac{\partial I(r, c)}{\partial r} = k(c) \frac{\partial u(r, c)}{\partial r}. \quad (5)$$

在图像相对平坦区域,纹理不丰富,信噪比较高, $\partial I(r, c)/\partial r$ 的值多为零。对于某型号航空相机实际航拍的图像,从中截取尺寸为 512 pixel×512 pixel 的子图像,如图 1(a)所示。图像垂直方向偏导数(零值为灰色,非零值为白色)如图 1(b)所示。从图 1 中可以看出,每列存在一定数量偏导数为零的像素点。为了提高计算速度,在偏导数为零的像素点中,选取灰度值最大和最小的两个点作为参考点,估计出这

两个像素的真值 u_1 和 u_2 , 就可以得到每列 $k(c)$ 和 $b(c)$ 的值。由于像素四邻域与像素本身相关性最大, 因此选择四邻域均值作为像素的真值。即

$$k(c) = (I_1 - I_2)/(u_1 - u_2), \quad (6)$$

$$b(c) = (u_1 I_2 - u_2 I_1)/(u_1 - u_2), \quad (7)$$

式中 I_1 和 I_2 分别为这两个像素的观测值。

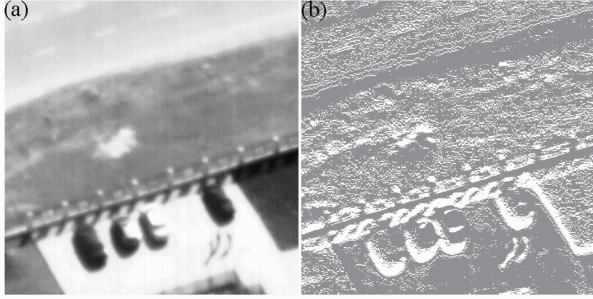


图1 实际航拍图像。(a)原始图像;(b)图像竖直方向偏导数

Fig. 1 Real aerial image. (a) Original image; (b) partial derivatives in vertical direction

3.2 全变分去除随机噪声

在非平滑区域, 由于(2)式中高斯噪声 $n(r, c)$ 的影响, 不能根据(2)式由 $k(c)$ 和 $b(c)$ 的值直接得到 $I(r, c)$ 。(2)式是典型的病态问题, 可以利用全变分(TV)框架求得最优解^[8-9]。构造的能量函数 $E(u)$ 可以表示为

$$E(u) = \frac{\lambda}{2} \int_{\Omega} \|ku + b - I\|^2 + TV(u), \quad (8)$$

式中右端第一项是保真项, 要求去噪后图像尽量与原图像相似, 能够保留图像的细节, 体现对原始图像的依赖性。 $TV(u)$ 是约束项, 要求去噪后图像具有分段光滑性。 λ 是权衡约束项和保真项的权系数。其中 $TV(u)$ 项为

$$TV(u) = \int_{\Omega} \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial c}\right)^2} drdc. \quad (9)$$

通过最小化(8)式中的能量函数, 能够在保留原图像细节的基础上, 使去噪后图像尽量平滑。于是问题转化为求解

$$\hat{u} = \operatorname{argmin} E(u). \quad (10)$$

由变分法可知, 当满足(11)式的 Euler-Lagrange 方程时, 泛函(8)式取得最小值。即

$$\nabla_u E = -\nabla \cdot \left(\frac{\nabla u}{|\nabla u|} \right) + \lambda k(ku + b - I), \quad (11)$$

式中 $\nabla_u E$ 表示泛函 $E(u)$ 对 u 的梯度。采用多种数值方法都可以求解(11)式中的方程, 如牛顿法、共轭梯度法和梯度下降法等。利用梯度下降法, 写成离散时间迭代形式有

$$\hat{u}^{k+1} = \hat{u}^k + \Delta t \left[\nabla \cdot \left(\frac{\nabla \hat{u}^k}{|\nabla \hat{u}^k|} \right) - \lambda k(k\hat{u}^k + b - I) \right], \quad (12)$$

式中 Δt 为时间步长, k 是迭代次数, 迭代初始值 \hat{u}^0 取观测图像 I 。对相邻两次迭代得到的图像作差, 当其二范数小于预先设定的阈值 T 时, 迭代停止。

为了避免 $|\nabla \hat{u}|$ 为零导致(12)式出现无穷大的情况, 在 $|\nabla \hat{u}|$ 中引入微小量 ϵ , 即

$$|\nabla \hat{u}| = \sqrt{\left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial c}\right)^2 + \epsilon^2}, \quad (13)$$

可以证明当 ϵ 足够小时, (12)式收敛到问题的原始解。在迭代过程中, 对称延拓图像的边界像素, 并使用中心差分算子近似一阶偏导数, 从而保证不会出现像素的移位。即

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial r} = [u(r+1, c) - u(r-1, c)]/2 \\ \frac{\partial u}{\partial c} = [u(r, c+1) - u(r, c-1)]/2 \end{cases}, \quad (14)$$

算法流程图如图2所示。

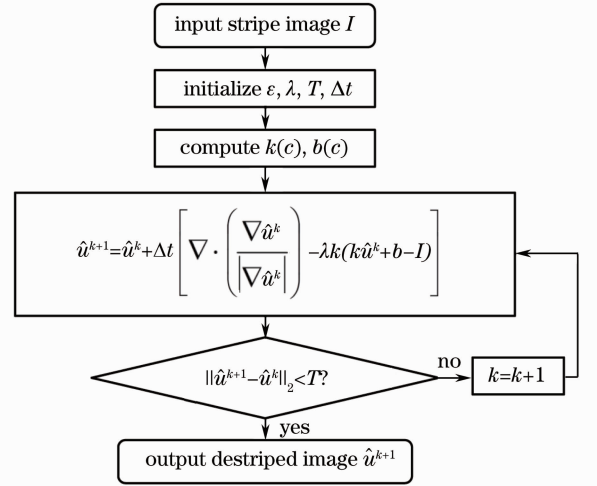


图2 去条带噪声算法流程图

Fig. 2 Flow of destriping stripe noise algorithm

4 实验与分析

为验证提出方法的有效性, 分别对仿真图像和实际航拍图像去噪, 并与典型的去噪方法对比, 结合主观和客观评价方法综合评价实验结果。主观评价方法包括图像视觉效果和列均值曲线。客观评价方法包括峰值信噪比 R_{SN} 、通用图像质量指数 I_{UIQ} ^[10]、变异逆系数 I_{CV} ^[4] 和辐射质量提升因子 I_F ^[4]。 R_{SN} 和 I_{UIQ} 是有参考评价参数, I_{CV} 和 I_F 为无参考评价参数; 评价参数越大, 代表图像质量越好。去噪效果好坏需要综合考虑以上评价参数。

峰值信噪比 R_{SN} (单位为 dB) 定义为

$$R_{SN} = 10 \lg \left(\frac{d^2 \times MN}{\|I_d - I_{ref}\|^2} \right), \quad (15)$$

式中 d 是图像动态范围, I_d 是降噪后图像, I_{ref} 是参考图像, M, N 是图像的尺寸。

通用图像质量指数 I_{UIQ} 定义为

$$I_{UIQ} = \frac{4\sigma_{I_R I_E} m_{I_R} m_{I_E}}{(\sigma_{I_R}^2 + \sigma_{I_E}^2)(m_{I_R}^2 + m_{I_E}^2)}, \quad (16)$$

式中 m_{I_R}, m_{I_E} 和 $\sigma_{I_R}^2, \sigma_{I_E}^2$ 分别是参考图像和去噪图像的均值和方差, $\sigma_{I_R I_E}^2$ 是图像的协方差。

变异逆系数 I_{CV} 定义为近似各向同性区域上的均值 R_m 和标准差 R_s 之比

$$I_{CV} = \frac{R_m}{R_s}. \quad (17)$$

辐射质量提升因子 I_F (单位为 dB) 定义为

$$I_F = 10 \lg \left(\frac{\sum_j (m_{I_R}[j] - m_I[j-1])^2}{\sum_j (m_{I_E}[j] - m_I[j-1])^2} \right), \quad (18)$$

式中 $m_{I_R}[j], m_{I_E}[j]$ 和 $m_I[j]$ 分别是含噪图像、去

噪图像和经高斯低通滤波去噪图像第 j 列的均值。

4.1 仿真实验分析

图 3 为原始图像和被条带噪声污染的仿真图像, 尺寸是 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 。噪声图像是由原始图像加入列方向的条带噪声和均值为零、标准差为 0.05 的高斯白噪声得到的。图 4 分别为使用改进的矩匹配法^[2]、基于单向变分优化法^[4]、改进的滤波法 (SKR)^[11] 和本文方法去噪后的图像。由于改进的矩匹配法不能去除随机噪声, 为了实验对比的公平性, 在矩匹配法去条带噪声之后, 再级联消除随机噪声效果较好的总变分法去噪。



图 3 仿真图像。(a)原始图像;(b)含条带噪声图像

Fig. 3 Simulated images. (a) Original image;
(b) image with stripe noise



图 4 不同方法对仿真图像去噪结果。(a)改进的矩匹配和总变分去噪结果;(b)单向变分去噪结果;

(c)改进的 SKR 滤波去噪结果;(d)提出方法的去噪结果

Fig. 4 Destriped results of simulated image by different methods. (a) Image destriped with improved moment matching and total variation; (b) image destriped with unidirectional variation; (c) image destriped with improved SKR filter; (d) destriped with the proposed method

从图 4 中的去噪结果可以看出, 条带噪声均得到了一定程度的抑制。由于级联了改进的矩匹配法和总变分法, 在利用改进的矩匹配法去条带噪声时, 受到图像中的随机噪声影响, 去噪后图像仍有较明显的条带噪声存在。单向变分法去条带噪声效果较好, 但对随机噪声去噪效果不佳。改进的 SKR 滤波方法可以自动设置算法中的所有参数, 去噪效果较好, 但计算过程繁琐复杂, 在 Intel Core i3-2120 3.3 GHz 的计算机 Matlab 软件平台上, 运行时间高达 11.20 min; 而且去噪图像过于平滑, 造成图像模

糊, 细节信息丢失。本文算法去噪视觉效果最好。对比表 1 中的去噪客观评价指标可以看出, 提出的算法将峰值信噪比 R_{SN} 从 30.80 dB 提高到 39.84 dB, 辐射质量提升因子 I_F 提高到 10.48 dB, 通用图像质量指数 I_{UIQ} 和变异逆系数 I_{CV} 均有所提高。

提出的方法不依赖各像元灰度统计信息一致的假设, 而且能够同时去除图像的条带噪声和随机噪声, 图像效果和客观评价指标均优于已有的去噪方法。

表 1 仿真图像客观指标对比表

Table 1 Comparison of assessment criteria for simulated images

Method	Striped	Improved moment	Unidirectional variation	Improved SKR	Proposed
R_{SN}	30.80	33.58	33.84	34.56	39.84
I_{UIQ}	0.99951	0.99961	0.99942	0.99958	0.99995
I_{CV}	13.65	23.34	49.29	68.56	82.23
I_F	0	5.29	5.59	7.72	10.48

4.2 实际航拍图像去噪

为验证提出的方法去噪效果的稳健性,对两种不同场景的航拍图像去噪。图 1 中的城市场景航拍图像包含汽车、栅栏等区域,图 5 中的野外场景航拍图像包含山丘、草地和道路等区域。去噪结果分别如图 6 和图 7 所示。

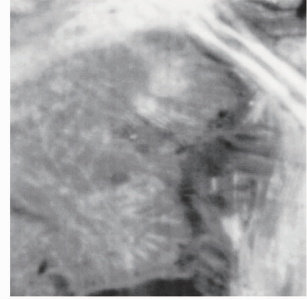


图 5 野外场景航拍图像

Fig. 5 Aerial image in wild areas

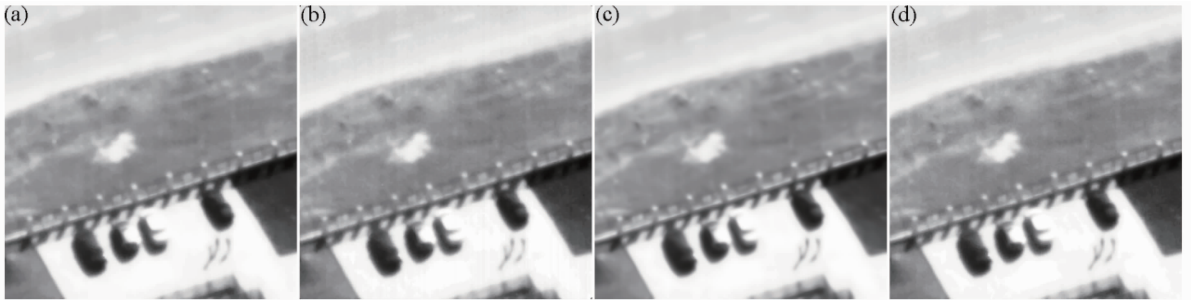


图 6 城市场景航拍图像去噪效果对比。(a)改进的矩匹配和总变分去噪结果;(b)单向变分去噪结果;(c)改进的 SKR 滤波去噪结果;(d)提出的方法的去噪结果

Fig. 6 Comparison of destriped aerial image in urban areas. (a) Image destriped with improved moment matching and total variation; (b) image destriped with unidirectional variation; (c) image destriped with improved SKR filter; (d) image destriped with the proposed method

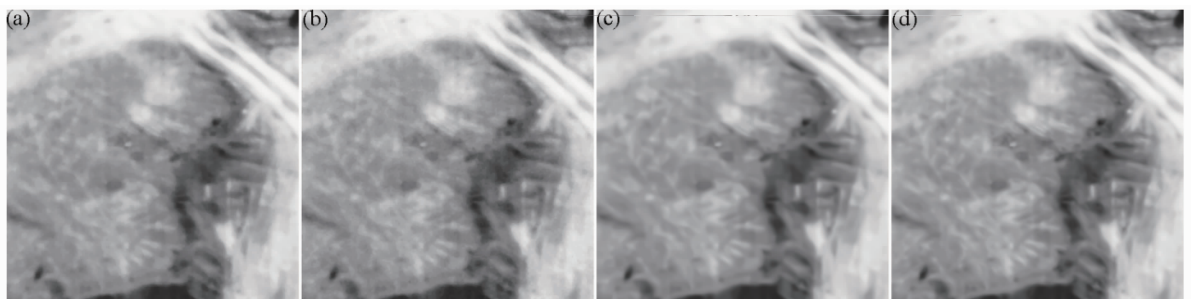


图 7 野外场景航拍图像去噪效果对比。(a)改进的矩匹配和总变分去噪结果;(b)单向变分去噪结果;(c)改进的 SKR 滤波去噪结果;(d)提出的方法的去噪结果

Fig. 7 Comparison of destriped aerial image in wild areas. (a) Image destriped with improved moment matching and total variation; (b) image destriped with unidirectional variation; (c) image destriped with improved SKR filter; (d) image destriped with the proposed method

对于城市场景的航拍图像,从图 6 中可以看出,使用提出的算法和 SKR 滤波算法去噪后的图像视觉效果较好,去噪后图像无明显失真,但使用改进的

SKR 滤波方法去噪后图像过于平滑,含汽车区域边缘信息丢失严重。

对于野外场景的航拍图像,从图 7 可以看出,改

进的 SKR 滤波方法过度平滑了草地区域,而提出的方法在保留细节信息的同时,有效地抑制了条带噪声。

图 8 是图 1 中原始航拍图像、图 6 中使用 SKR 滤波算法和提出的方法去噪后图像的列均值曲线对比图。从图 8 中可以看出,原始图像列均值曲线上下震荡,存在毛刺现象。去噪后图像均值曲线光滑、变化缓慢,整体波形走向、变化趋势与原图像一致。

表 2 实际航拍图像客观指标对比表

Table 2 Comparison of assessment criteria for real aerial images

Image	Method	Striped	Improved moment	Unidirectional variation	Improved SKR	Proposed
Image 1	I_{CV}	60.48	483.46	181.63	424.01	495.14
	I_F	0	7.62	6.48	7.65	9.12
Image 5	I_{CV}	267.75	400.95	365.11	416.81	653.28
	I_F	0	6.84	3.10	7.59	9.24

但相比于提出的算法,图 8(b)中椭圆标注部分均值曲线过于平坦,细节信息丢失严重。

表 2 是已有算法和本文算法的去噪客观评价指标对比。使用本算法处理后的图像辐射质量提升因子 I_F 提高 9 dB 以上,变异逆系数 I_{CV} 高于已有算法。可见,对不同场景的实际航拍图像,使用本文方法都能够有效去除条带噪声。

40 dB,将实际航拍图像辐射质量提升因子提高到 9 dB。定性分析去噪视觉效果和列均值曲线,定量分析客观评价指标,结果证明提出的方法均优于传统方法。提出的方法能有效去除条带噪声,保留原图像的细节信息,图像质量得到改善。

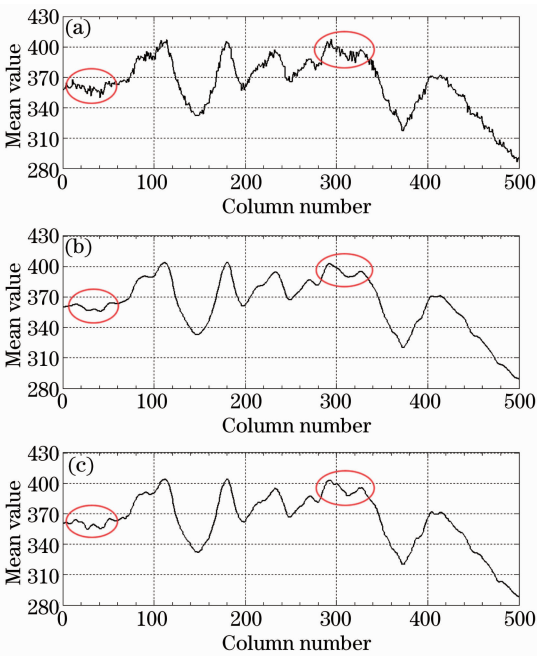


图 8 列均值曲线对比。(a)原始图像;(b)改进的 SKR 滤波去噪图像;(c)提出的方法的去噪图像

Fig. 8 Comparison of mean column profiles. (a) Original image; (b) image destriped with improved SKR filter; (c) image destriped with the proposed method

5 结 论

在分析航空相机图像条带噪声的来源和模型的基础上,提出了一种基于全变分的条带噪声去除方法。选取相对平坦的区域为参考区域,估计每个像元的增益和偏置值;在全变分的框架下,利用梯度下降法得到最优的去噪图像。实验结果表明,提出的方法可以将仿真图像峰值信噪比从 31 dB 提高到

参 考 文 献

- Xiu Jihong, Huang Pu, Li Jun, *et al.*. Non-uniformity correction of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0711003.
修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机成像非均匀性校正[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0711003.
- 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.
- Zhu Shanyou, Zhang Guixin, Gong Cailan, *et al.*. Non-uniformity correction method based on standard deviation value compensation after moment matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1211002.
祝善友, 张桂欣, 巩彩兰, 等. 基于方差补偿矩匹配的红外图像非均匀性校正方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1211002.
- 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.
- Guo Lingling, Wu Zepeng, Zhang Liguu, *et al.*. Algorithm for eliminating stripe noise in infrared image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0828001.
郭玲玲, 吴泽鹏, 张立国, 等. 推扫式遥感相机图像条带噪声去除方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0828001.
- Sui Xiubao, Chen Qian, Gu Guohua. Algorithm for eliminating stripe noise in infrared image [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, 31(2): 106-112.
隋修宝, 陈钱, 顾国华. 红外图像条纹噪声消除方法[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(2): 106-112.
- Zhang Yu, Zhang Liguu, Zhang Xingxiang. Real-time elimination of Smear noise for large interline transfer area CCD camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9):

2388—2394.

张宇, 张立国, 张星祥. 行间转移大面阵 CCD 相机的 Smear 噪声实时去除[J]. 光学精密工程, 2013, 21(9): 2388—2394.

8 L I Rudin, S Osher, E Fatemi. Nonlinear total variation based noise removal algorithms [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1992, 60(1-4): 259—268.

9 Zhang Yan, Wang Yuanyuan, Li Wei, *et al.*. Reconstruction of photoacoustic image based on total variation [J]. *Optics and*

Precision Engineering, 2012, 20(1): 204—212.

张砚, 汪源源, 李伟, 等. 基于全变分重建光声图像[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 204—212.

10 Z Wang, A C Bovik. A universal image quality index [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, 9(3): 81—84.

11 X Zhu, P Milanfar. Automatic parameter selection for denoising algorithms using a no-reference measure of image content [J]. *IEEE Trans Image Processing*, 2010, 19(12): 3116—3132.

栏目编辑: 张浩佳