

一种改进的矩匹配高光谱图像非均匀校正算法

杨赞伟^{1,2}, 郑亮亮^{1*}, 吴勇¹, 曲宏松¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所空间新技术研究部, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为进一步抑制遥感图像的非均匀噪声, 首先分析了空间遥感高光谱图像条带噪声产生的原因及噪声模型, 进而提出一种基于窗口阈值判决的改进矩匹配算法。选取相对平坦, 且条带噪声与背景对比明显的区域进行阈值估算, 并选取参考均值、标准差和条带阈值判决对条带噪声进行矩匹配处理。实验结果表明, 所提算法的峰值信噪比相对传统方法至少提高了 6.2163 dB, 均方误差最小降低了 5.9630, 结构相似度至少提高了 0.254。与传统方法相比, 采用所提方法处理后的图像变异逆系数有所提高, 图像横向梯度与标准差有所降低, 该方法还去除了图像中的条带噪声, 保留了原始图像的细节信息。

关键词 遥感; 阈值判决; 矩匹配; 条带噪声; 非均匀校正

中图分类号 TP751.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.082801

An Improved Moment Matching Algorithm for Non-Uniform Correction of Hyperspectral Images

Yang Zanwei^{1,2}, Zheng Liangliang^{1*}, Wu Yong¹, Qu Hongsong¹

¹Department of Advanced Space Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to further restrain the non-uniform noise of remote sensing images, we analyze the the causes and noise models of stripe noise in the spatial remote sensing hyperspectral image, and then propose a moment matching algorithm based on the window threshold decision. The window threshold can be estimated based on the flat region and the obviously striped region. Further, moment matching can be achieved with respect to the images containing stripe noise based on the referent mean, standard deviation, and stripe threshold determination. The experimental results denote that compared with the traditional methods, the peak signal-to-noise ratio increases by at least 6.2163 dB, the mean-square error decreases by at least 5.9630, and the structural similarity increases by at least 0.254. When compared with the traditional methods, an improved image variation inverse coefficient can be obtained using the proposed method; further, the lateral gradient and standard deviation of the image decrease, the image stripe noise is effectively removed, and the original image details are preserved.

Key words remote sensing; threshold determination; moment matching; stripe noise; non-uniformity correction

OCIS codes 100.2000; 100.3008; 100.4145

1 引言

目前, 高光谱遥感相机已广泛应用于军事预警、农业监测、海洋环境监测等领域, 高光谱相机的成像质量对其应用范围与测量精度具有重要影响。图像

传感器(CCD 或 CMOS)固有的缺陷, 如传感器像素单元对成像目标响应不一致、因工艺问题造成的像素单元大小存在误差, 以及探测器件的光学镀膜不均匀等, 造成高光谱图像中出现条带噪声^[1-2]。条带噪声的产生降低了高光谱图像的成像质量, 导致图

收稿日期: 2019-10-01; 修回日期: 2019-10-14; 录用日期: 2019-11-15

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFB0501202)、吉林省重点科技研发项目(20180201015GX)

* E-mail: adqe@163.com

像信息受到严重破坏,对后续的信息提取与目标识别造成了严重影响,因此去除条带噪声对高光谱相机的应用具有重要意义^[3]。

目前针对条带噪声的去除方法主要有三大类:基于空间域信息统计的方法、基于频谱滤波的方法和全变分以及改进的全变分算法。基于空间域信息统计的方法主要包括直方图匹配^[4]、移动窗口矩匹配^[5]及其改进算法。这类方法是利用原图中的有利信息,选取原图中不受条带噪声影响的参考图像列,利用该参考图像列对条带噪声图像进行直方图匹配或矩匹配,去噪后的图像列灰度信息接近参考图像列,导致整幅图像较为平滑,图像细节丢失严重,图像整体结构受到严重破坏^[6-7]。基于频谱滤波的方法主要包括频域与空域联合滤波^[8]和小波变换滤波^[9]等方法,但由于无法确定噪声的频率,在滤波的同时会出现图像细节丢失以及成像模糊的现象。基于全变分的各种算法是通过构造具有约束条件的能量泛函,但在算法收敛的过程中,较强的约束条件使得图像的阶梯效应较为严重^[10]。

本文基于空间域信息统计的方法,从条带噪声模型出发,根据条带噪声的特点,同时结合移动窗口矩匹配算法的优点^[11],提出一种基于判决条件的移动窗口矩匹配条带噪声去除方法。选取相对平坦、条带与背景区域对比较明显的区域,对每一列取均值,对窗口内的均值再求均值 I_{ave} ,然后设置一个阈值 I_{limit} ,位于滑动窗口中心位置的均值如果小于这个阈值,则对其进行矩匹配;在窗口内列均值如果大于 I_{ave} ,将该列对应到原始图像中的列,并求出这些列的均值和标准差,对上述均值和标准差再求平均值,得到均值、标准差的均值 I_{mean} 、 I_{var} ,将其运用到矩匹配。分别对仿真图像和实际遥感图像进行非均匀校正处理,实验结果表明:与常用的处理方法相比,本文算法的校正效果更为理想,同时保留了图像的更多细节信息。本文算法可提升图像的显示效果,为后续遥感图像的目标识别、信息提取等提供参考。

2 条带噪声模型分析

空间高光谱遥感相机基于数字域 TDI 模式工作,将 CMOS 高帧频下采集到的目标与像元逐行移位曝光图像,在数字寄存器中进行逐行错位叠加来抵消像移影响,使得图像信号经过多次累加而增大,从而提高成像的灵敏度和信噪比,增强相机对目标的感知能力。但 CMOS 由于其固有的缺陷,容易受到噪声的影响,特别是条带噪声对图像质量影响

最大^[12-13]。

一般情况下,将条带噪声图像模型定义为 $f(x, y)$,条带噪声一般被定性为加性条带噪声^[14],因此可以将受条带噪声影响的图像模型表示为 $f(x, y) = u(x, y) + n(x, y)$,其中, $f(x, y)$ 为高光谱相机成像得到的实际带噪图像, $u(x, y)$ 为不带噪声的理想图像, $n(x, y)$ 为条带噪声模型^[15]。为获得理想图像 $u(x, y)$,必须精确去除条带噪声 $n(x, y)$,同时不破坏理想图像的灰度数据结构。最好的方法是在定位条带噪声位置的同时,保留非条带位置的像素值信息,结合条带定位以及窗口矩匹配算法,有效去除条带噪声,同时保留有用的细节信息。

3 改进算法设计

3.1 现有矩匹配算法设计

传统矩匹配算法利用一列图像信息对整幅图像进行矩匹配,改变了图像列方向标准差与均值的特性,使整幅图像产生畸变,导致灰度与细节丢失严重。针对以上问题,文献^[6]提出了移动窗口矩匹配算法。该算法利用窗口内所有列均值与标准差的均值,对中心窗口进行矩匹配,以去除条带噪声,其原理为

$$N_j = G_j \times N_{ori-j} + B_j, \quad (1)$$

式中: N_{ori-j} 、 N_j 分别为原始和校正图像的第 j 列; G_j 、 B_j 分别为第 j 列图像的增益和偏移值。

分别对(1)式求均值和标准差,化简后可得

$$f_{std}(N_j) = G_j \times f_{std}(N_{ori-j}), \quad (2)$$

$$f_{mean}(N_j) = G_j \times f_{mean}(N_{ori-j}) + B_j, \quad (3)$$

式中: f_{mean} 、 f_{std} 分别为对列单元求均值和标准差; $f_{mean}(N_{ori-j})$ 和 $f_{std}(N_{ori-j})$ 分别为原始图像列均值和标准差; $f_{mean}(N_j)$ 和 $f_{std}(N_j)$ 分别为窗口滤波后对应图像列的均值和标准差。联立(2)式和(3)式,可推导出

$$G_j = \frac{f_{std}(N_j)}{f_{std}(N_{ori-j})}, \quad (4)$$

$$B_j = f_{mean}(N_j) - \frac{f_{std}(N_j)}{f_{std}(N_{ori-j})} \times f_{mean}(N_{ori-j}). \quad (5)$$

联立(4)式和(5)式,即可得到窗口矩匹配算法的校正方程。

3.2 算法改进设计

移动窗口矩匹配算法需要对所有列进行矩匹配,通常存在条带噪声抑制不彻底、图像细节容易丢失、图像结构容易遭到破坏等问题,需要进一步优化

完善,因此本文提出一种改进的基于阈值判决的矩匹配算法。

首先从含条带噪声的图像中截取条带噪声与背景图像对比较明显的 R (实验时一般取 10) 行图像,然后求列向均值,得到一行采样列均值数据 I_{im} 。窗口大小 N 的实验数值设置为 15,滑动窗口遍历 I_{im} 。固定窗口位置,得到 N 个列均值数据,窗口中心位置假设为 W_{mid} ,对这 N 个数据求均值得到 N_{ave} ,即

$$N_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{j \in \Omega} I_{im}(j), \quad (6)$$

式中: $\Omega = \{W_{mid} - (N-1)/2, W_{mid} + (N+1)/2\}$ 。

再对窗口内大于 N_{ave} 的数据求均值,得到 N_{Ave} ,

$$N_{Ave} = f_{mean} \left(\sum_{j \in \Omega_1} I_{im}(j) \right), \quad (7)$$

式中: $\Omega_1 = \{I_{im}(j) > N_{ave}\}$ 。以此均值为依据,设置判决阈值 I_{limit} :

$$I_{limit} = k \times N_{ave} - N_{Ave} \circ \quad (8)$$

根据实验验证,(8)式中的 k 可以取 $[2, 2.1]$,一般设置为 2。如果

$$I_{im}(W_{mid}) < I_{limit}, \quad (9)$$

则该列被判为噪声图像,因此对该条带图像进行窗口矩匹配,参考均值 I_{mean} 为 Ω_1 内原始图像 $f(x, y)$ 对应区域的均值,而不是整个窗口内 $f(x, y)$ 对应位置的均值:

$$I_{mean} = f_{mean} \left(\sum_{j \in \Omega_1} f(i, j) \right), \quad (10)$$

这样做的目的是防止条带噪声降低矩匹配后条带位置的灰度值。参考标准差 I_{var} 同样为 Ω_1 内 $f(x, y)$ 对应列的标准差均值:

$$I_{var} = f_{std} \left(\sum_{j \in \Omega_1} f_{std}(f(i, j)) \right), \quad (11)$$

然后进行矩匹配,

$$f_{im}(W_{mid}) = \frac{I_{var}}{f_{std}(W_{mid})} (f(W_{mid}) - f_{mean}(W_{mid})) + I_{mean}, \quad (12)$$

式中: $f(W_{mid})$ 为含条带噪声图像列; $f_{mean}(W_{mid})$ 为该列的均值; $f_{std}(W_{mid})$ 为该列的标准差; $f_{im}(W_{mid})$ 为去除条带噪声的图像列。

3.3 改进算法的流程设计

本文算法的流程设计如下:1)输入待去噪图像 $f(x, y)$; 2)初始化 $R = R_0, k = k_0$; 3)进行图像采样; 4)应用(6)~(12)式求解 $u(x, y)$ 。具体流程如图 1 所示。

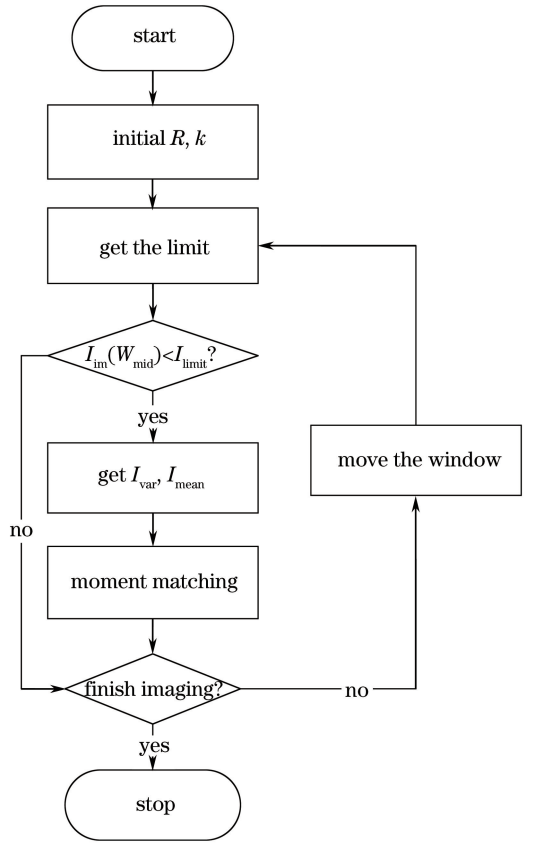


图 1 改进的矩匹配非均匀性校正算法流程图
Fig. 1 Flow chart of improved moment matching non-uniformity correction algorithm

4 实验与分析

为验证本文算法的有效性,利用仿真图像和实际高光谱遥感图像进行非均匀性校正实验,并与常用的校正方法进行对比,结合主观效果与客观数据评价,对实验结果进行验证。主观效果通过观察图像视觉效果与列均值变化曲线图进行评价,列均值曲线图的横坐标代表图像列数,纵坐标代表列均值大小。客观的有参考评价指标^[16]包括峰值信噪比 (P_{SNR})、均方误差 (M_{SE}) 和结构相似度 (S_{SIM})。 P_{SNR} 与 S_{SIM} 越大,代表图像质量越好, M_{SE} 则相反。无参考评价指标^[2]选用变异系数 (I_{CV})、横向梯度均值 (R_M) 和图像标准差 (D_{EV}),其中 I_{CV} 越大,代表图像质量越好,而 R_M 与 D_{EV} 则相反,条带噪声被去除后,图像的 D_{EV} 和 R_M 会降低。

均方误差 (M_{SE}) 的定义为

$$M_{SE} = f_{mean} \left(\sum_{(i,j) \in f} (f_{cal}(i, j) - u(i, j))^2 \right), \quad (13)$$

式中: $f_{cal}(i, j)$ 为处理后的图像; $u(i, j)$ 为理想的不带噪声图像。

峰值信噪比(P_{SNR})的定义为

$$P_{SNR} = 10 \times \lg\left(\frac{255 \times 255}{M_{SE}}\right). \quad (14)$$

结构相似度(S_{SIM})的定义为

$$S_{SIM}(x, y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (15)$$

式中: x, y 分别为参考图像(无噪声理想图像)和待测图像; $\mu_x, \mu_y, \sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_{xy}$ 分别为 x, y 的均值、标准差和协方差; C_1 和 C_2 均为正常数,防止分母为0。

图像标准差(D_{EV})的定义为

$$M = f_{mean}(f), \quad (16)$$

$$D_{EV} = f_{mean}\left(\sum_k (f_k - M)^2\right), \quad (17)$$

式中: f 为待评价图像; M 为图像灰度值均值。

变异系数(I_{CV})的定义为

$$I_{CV} = \frac{R_m}{R_s}, \quad (18)$$

式中: R_m, R_s 分别为待测图像的均值和标准差。

横向梯度均值(R_M)的定义为

$$R_M = f_{mean}(f_x), \quad (19)$$

式中: f_x 为待测图像横向导数。

4.1 仿真分析

图2所示为原始图像和被条带噪声污染的仿真图像,尺寸均为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。噪声图像是由原始图像加入列向随机灰度值为 $[20, 40]$ 条带噪声得到的。分别使用低通滤波巴特沃思滤波(BW)算法、移动窗口矩匹配(WMM)算法^[6]、改进的低通低秩滤波(DSLFRI)算法^[17]、直方图匹配(HM)算法和本文算法处理图2所示的噪声图像,结果如图3所示。

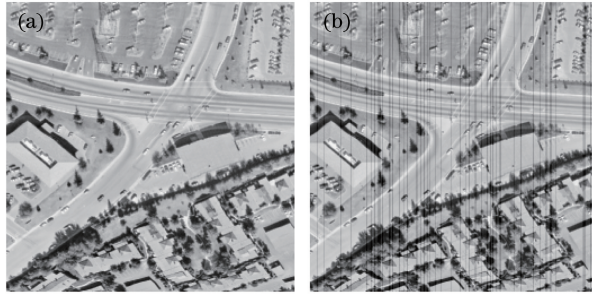


图2 仿真图像。(a)原始图像;(b)含条带噪声图像

Fig. 2 Simulated images. (a) Original image; (b) image with stripe noise

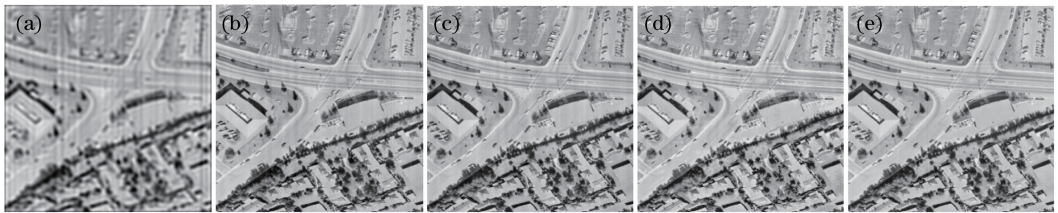


图3 不同算法对图2(b)所示仿真图像的校正效果。(a) BW;(b) WMM;(c) DSLFRI;(d) HM;(e)本文算法

Fig. 3 Destriped results of simulated image in Fig. 2(b) by different methods. (a) BW; (b) WMM; (c) DSLFRI; (d) HM; (e) proposed method

从图3可以看出,条带噪声均得到了一定的抑制。BW算法由于存在低通滤波固有的缺陷,虽然可以去除一部分条带噪声,但是噪声仍有残留并且图像细节丢失严重;WMM算法由于对所有列进行矩匹配以及取均值,在一定程度上破坏了图像灰度信息;DSLFR算法在所有列的噪声条带方向存在分量,因此非条带列会损失灰度值;HM算法严重依赖于所选的参考列,导致图像结构信息遭到破坏;本文算法校正后视觉效果最好。对比表1中的客观评

价指标可以看出,本文算法在峰值信噪比方面相对其他方法分别提高了10.5092 dB、6.2163 dB、6.3353 dB和9.7728 dB;均方误差分别降低了19.1824、5.9630、6.1807和15.8987;结构相似度明显高于其他算法,达到了0.9903。从图4和图5所示的列均值曲线可以看出,本文算法的列均值曲线更接近理想图像,同时不会丢失图像细节。表2为不同噪声条件下的仿真图像的客观指标对比,在仿真图像中加入不同的条带灰度噪声,随机条带噪声或

周期条带噪声 $[a, b]$ 表征灰度值范围为 a 到 b 内的随机值。从表2可以看出,针对不同的条带噪声,本文算法均取得了较好的校正效果。因此,本文方法

不依赖于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,图像效果和客观评价指标均优于已有的常用校正方法。

表1 对图2(b)所示仿真图像的客观指标对比

Table 1 Comparison of assessment criteria for simulated image in Fig. 2(b)

Method	BW	WMM	DSLFR1	HM	Proposed method
M_{SE}	21.0550	7.8356	8.0533	17.7713	1.8726
P_{SNR}/dB	34.8972	39.1901	39.0711	35.6336	45.4064
S_{SIM}	0.5744	0.9631	0.9649	0.7336	0.9903

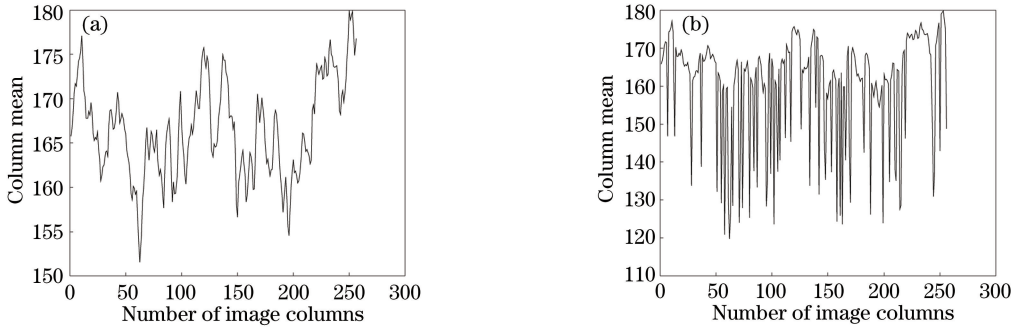


图4 仿真图像的列向灰度均值。(a)原始图像;(b)含条带噪声图像

Fig. 4 Gray mean values of simulated image in column. (a)Original image; (b) image with stripe noise

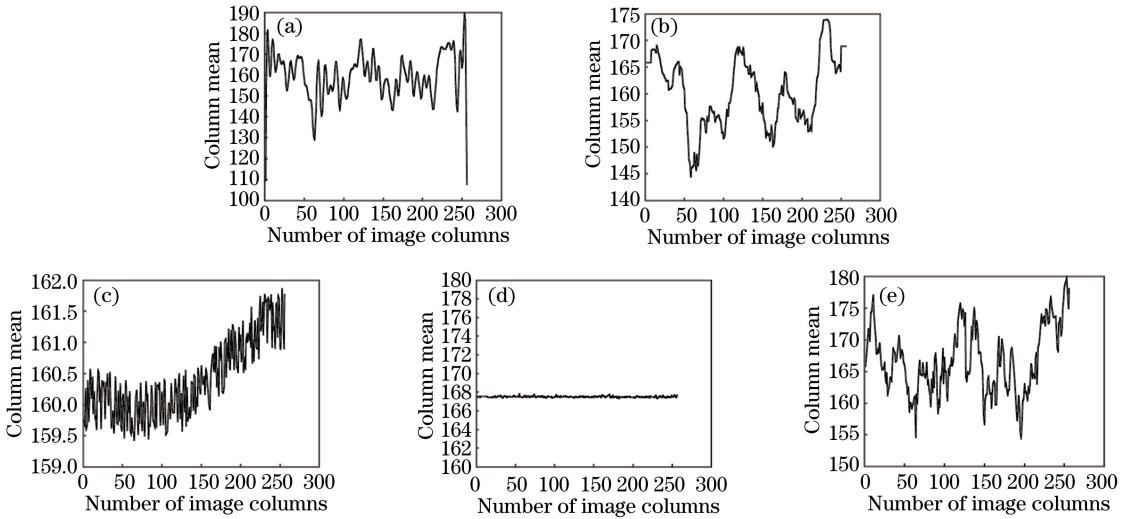


图5 不同方法对仿真图像校正后的列向灰度均值。(a) BW;(b) WMM;(c) DSLFR1;(d) HM;(e)本文算法

Fig. 5 Gray mean values of destriped results in column by different methods. (a) BW; (b) WMM;

(c) DSLFR1; (d) HM; (e) proposed method

4.2 实际高光谱遥感图像校正

为验证本文方法校正效果的稳健性,选择了两种不同场景的高光谱遥感图像进行非均匀性校正,图6和图7分别是某高光谱卫星的谱段25和谱段27的图像的校正效果。

从图6和图7可以看出,对于某高光谱遥感相机采集到的不同谱段的图像,BW算法的校正效果最差,畸变严重、细节丢失严重;WMM算法和

DSLFR1算法的校正效果均较为理想,但是WMM算法获得的图像中仍有条带噪声残留,而DSLFR1算法获得的图像损失了亮度和图像细节;HM算法破坏了图像灰度曲线的整体走向;本文算法在去除条带噪声的同时能够保持图像亮度与图像细节。从图8和图9所示的列均值曲线可以看出,HM算法与DSLFR1算法过分追求所有列在条带方向投影的去除,损失了图像信息;而BW算法的

表 2 不同噪声条件下仿真图像客观指标对比

Table 2 Comparison of objective indexes for simulated images with different noises

Destripe noise	Index	BW	WMM	DSLFR1	HM	Proposed method
Random noise in [10,40]	M_{SE}	20.1356	6.1987	7.0727	35.2071	1.9322
	P_{SNR}	35.0912	40.2078	39.6349	32.6645	45.2703
	S_{SIM}	0.5827	0.9672	0.9658	0.7369	0.9873
Random noise in [20,40]	M_{SE}	21.0550	7.8356	8.0533	17.7713	1.8726
	P_{SNR}	34.8972	39.1901	39.0711	35.6336	45.4064
	S_{SIM}	0.5744	0.9631	0.9649	0.7336	0.9903
Random noise in [30,40]	M_{SE}	22.7440	10.9156	11.0126	29.5307	1.7772
	P_{SNR}	34.5621	37.7503	37.7119	33.4281	45.6335
	S_{SIM}	0.5589	0.9612	0.9636	0.6554	0.9890
Periodic noise in [10,40]	M_{SE}	19.7578	4.6047	6.0389	13.6609	1.7803
	P_{SNR}	35.1734	41.4963	40.3212	36.7760	45.6259
	S_{SIM}	0.5786	0.9700	0.9653	0.7994	0.9918
Periodic noise in [20,40]	M_{SE}	20.1146	5.1281	6.4104	14.7842	1.7127
	P_{SNR}	35.0957	41.0313	40.0619	36.4328	45.7941
	S_{SIM}	0.5667	0.9681	0.9654	0.7667	0.9921
Periodic noise in [30,40]	M_{SE}	20.2325	5.3042	6.5791	15.3984	1.6796
	P_{SNR}	35.0703	40.8846	39.9491	36.2561	45.8788
	S_{SIM}	0.5605	0.9679	0.9650	0.7492	0.9924

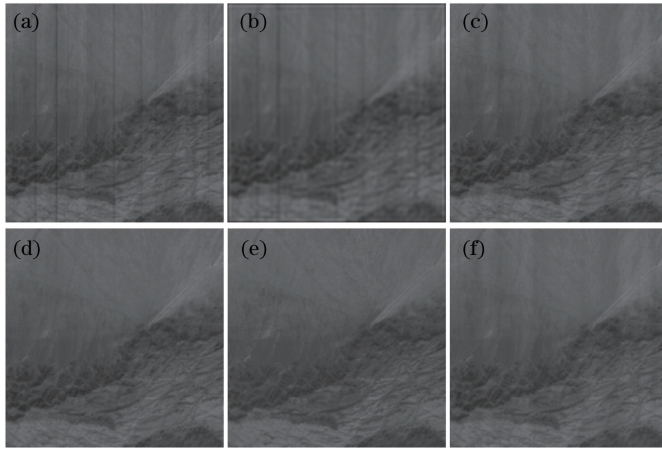


图 6 不同方法对谱段 25 高光谱图像的校正效果。(a)原始图像;(b) BW;(c) WMM;(d) DSLFR1;(e) HM;(f)本文算法
Fig. 6 Destriped results of hyperspectral image of band 25 by different methods. (a) Original image; (b)BW; (c) WMM; (d) DSLFR1; (e) HM; (f) proposed method

列均值曲线较接近原始图像,但校正效果不理想;WMM 算法的列均值趋向较为平滑,同时有条带噪声残留;本文算法的列均值曲线在去除条带噪声的同时保留了图像细节。从表 3 和表 4 可以看出,本文算法的 I_{CV} 均高于其他算法, D_{EV} 和 R_M 均低于其他

算法(其中 BW 算法损失了大量的图像细节,严重破坏了图像信息,导致 R_M 过低,因此对于条带噪声的去除效果最差,有明显的条带噪声残留)。综上所述,利用本文方法可实现对高光谱遥感图像非均匀噪声的良好校正,同时保留了图像的更多细节信息。

表 3 谱段 25 高光谱图像的客观指标对比

Table 3 Comparison of objective indexes for hyperspectral image of band 25

Method	Original image	BW	WMM	DSLFR1	HM	Proposed method
I_{CV}	6.9814	6.8634	7.0689	7.1678	7.3671	7.6435
D_{EC}	160.0580	163.9211	156.0881	151.8557	141.0393	136.6519
R_M	2.7792	0.8047	2.6096	2.6059	2.6577	2.4399

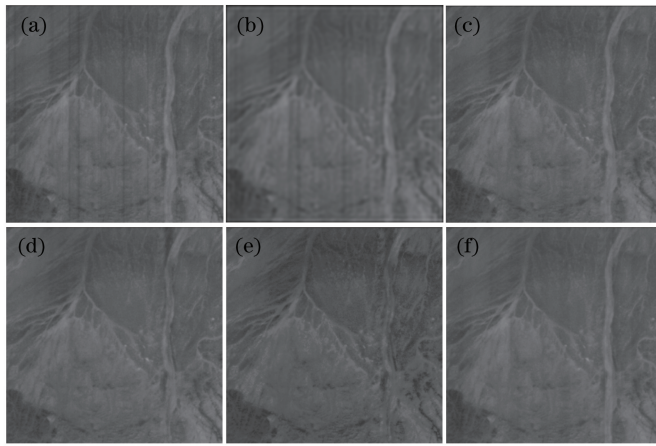


图 7 不同方法对谱段 27 高光谱图像的校正效果。(a)原始图像;(b) BW;(c) WMM;(d) DSLFRI;(e) HM;(f)本文算法
 Fig. 7 Desriped results of hyperspectral image of band 27 by different methods. (a) Original image; (b) BW; (c) WMM; (d) DSLFRI; (e) HM; (f) proposed method

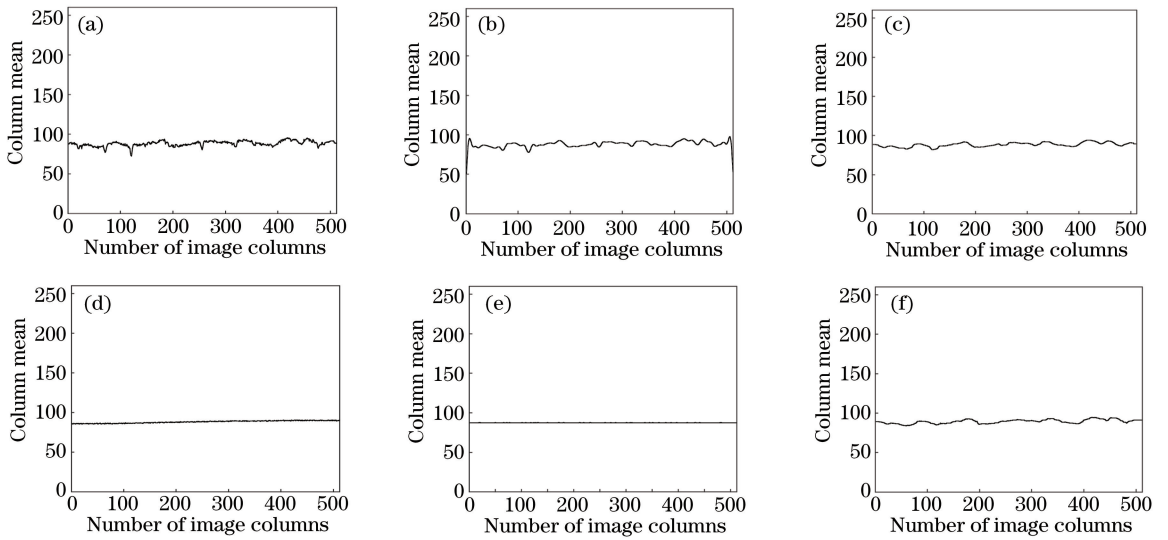


图 8 谱段 25 高光谱图像列均值灰度。(a)原始图像;(b) BW;(c) WMM;(d) DSLFRI;(e) HM;(f)本文算法
 Fig. 8 Gray mean scale of desriped results of hyperspectral image of band 25 by different methods. (a) Original image; (b) BW; (c) WMM; (d) DSLFRI; (e) HM; (f) proposed method

表 4 谱段 27 高光谱图像的客观指标对比

Table 4 Comparison of objective indexes for hyperspectral image of band 27

Method	Original image	BW	WMM	DSLFRI	HM	Proposed method
I_{CV}	8.7764	8.4786	8.9338	8.5883	8.6529	9.7724
D_{EC}	116.2303	123.5045	112.1258	97.3851	100.0544	94.8759
R_M	2.9238	0.9346	2.7818	2.7676	3.2459	2.5334

5 结 论

在分析高光谱遥感相机图像条带噪声来源和模型的基础上,提出一种基于阈值判决的窗口矩匹配改进算法。选取相对平坦以及条带噪声与背景对比明显的区域来估算阈值,并选取参考均值、标准差和条带阈值判决对条带噪声进行矩匹配处理。根据

仿真图像分析结果,本文算法的峰值信噪比相对其他方法至少提高了 6.2163 dB,均方误差最少降低了 5.9630,结构相似度至少提高了 0.254。在处理实际遥感图像时,本文算法的变异系数也是最大的,图像标准差与横向梯度都最小。因此,通过定性分析校正后图像的视觉效果和列均值曲线,定量分析各客观评价指标,发现本文方法优于其他常用校正方法,

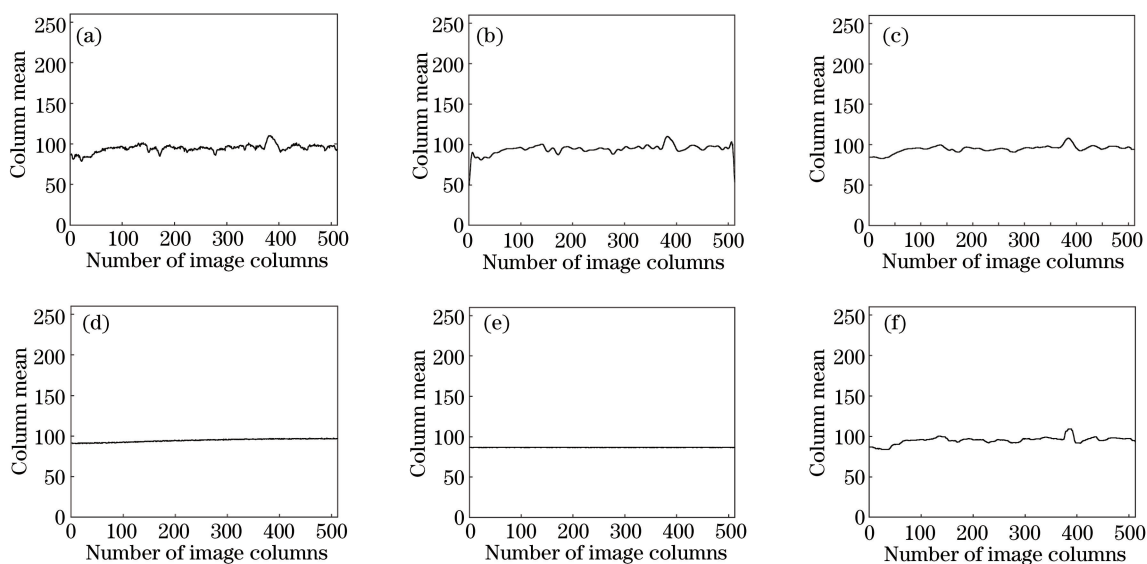


图9 谱段27高光谱图像列均值灰度。(a)原始图像;(b)BW;(c)WMM;(d)DSLFRI;(e)HM;(f)本文算法
Fig. 9 Gray mean values of destriped results of hyperspectral image of band 27 by different methods.

(a) Original image; (b) BW; (c) WMM; (d) DSLFRI; (e) HM; (f) proposed method

可有效去除条带噪声,同时保留原始图像的细节信息。本文算法可提高图像质量,提升图像的显示效果,并能够为后续遥感图像的目标识别、信息提取等提供参考,并推广应用到遥感图像的预处理环节中。

参 考 文 献

- [1] Huo L J, He B, Zhou D B. A destriping method with multi-scale variational model for remote sensing images[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 198-207.
霍丽君, 何斌, 周达标. 遥感图像条带噪声的多尺度变分模型去除[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 198-207.
- [2] Liu Y M. Hyperspectral image destriping based on adaptive unidirectional variation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 091002.
刘亚梅. 基于自适应单向变分的高光谱图像去条带方法[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 091002.
- [3] Zhou D B, Li G, Wang D J, et al. Method of destriping stripe noise of aerial images based on total variation[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1128003.
周达标, 李刚, 王德江, 等. 基于全变分的航空图像条带噪声消除方法[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1128003.
- [4] Rakwatin P, Takeuchi W, Yasuoka Y. Stripe noise reduction in MODIS data by combining histogram matching with facet filter[J]. IEEE Transactions on

Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(6): 1844-1856.

- [5] Gadallah F L, Csillag F, Smith E J M. Destriping multisensor imagery with moment matching [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(12): 2505-2511.
- [6] Zhang X, Tang S L. Destriping remote sensing imagery by wavelet moment matching algorithm [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(2): 305-312.
张霞, 汤森林. 一种去除遥感图像条带噪声的小波矩匹配方法[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(2): 305-312.
- [7] Li W L, Li K, Peng D, et al. Analysis and removal of stripe noise in AGRI remote sensing images [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1228004.
李文力, 李凯, 彭迪, 等. AGRI 遥感图像条带噪声分析与去除研究[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1228004.
- [8] Chen J S, Shao Y, Guo H D, et al. Destriping CMODIS data by power filtering [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(9): 2119-2124.
- [9] Infante S O. Wavelet analysis for the elimination of striping noise in satellite images [J]. Optical Engineering, 2001, 40(7): 1309-1314.
- [10] Bouali M, Ladjal S. Toward optimal destriping of MODIS data using a unidirectional variational model [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(8): 2924-2935.

- [11] Zheng F B, Zhi J J, Gao H L, et al. Improved destriping algorithm of hyperspectral images [J]. *Computer Science*, 2010, 37(5): 265-267.
郑逢斌, 支晶晶, 高海亮, 等. 一种高光谱图像条带噪声去除改进算法 [J]. *计算机科学*, 2010, 37(5): 265-267.
- [12] Nie K M, Xu J T, Gao Z Y. A 128-stage CMOS TDI image sensor with on-chip digital accumulator [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(5): 1319-1324.
- [13] Guo L L, Wu Z P, Zhang L G, et al. Destriping of remote sensing images with applications to push-broom-type cameras [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.
- [14] Dong J H, Hu Q Q, Sun D S. Techniques of depressing image noise in laser imaging tracking system [J]. *Chinese Journal of 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.
- [15] Chang Y, Yan L X, Wu T, et al. Remote sensing image stripe noise removal: from image decomposition perspective [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 7018-7031.
- [16] Zhang S W, Xiang W, Xu B S, et al. Stripe noise removal for infrared images using guided filter [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10157: 101572R.
- [17] Ju H H, Liu Z G, Jiang J J, et al. Removal of hyperspectral stripe noise using low-pass filtered residual images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1228002.
鞠荟荟, 刘志刚, 姜江军, 等. 基于低通滤波残差图的高光谱条带噪声去除 [J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1228002.