

基于自适应单向变分的高光谱图像去条带方法

刘亚梅

长春工业大学机电工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 条带噪声影响高光谱图像(HSIs)的质量,降低后续数据分析算法的精度和稳健性。分析了 HSIs 中条带噪声的特点,即条带噪声具有方向性和各谱段噪声具有不同强度,提出了一种基于自适应单向变分的条带噪声去除方法。在单向变分模型的基础上,引入含有耦合项的能量函数,并利用梯度下降法迭代求得最优解。实验结果表明,实际 HSIs 平均等效视数从 26.49 提高到 85.61,平均辐射质量提升因子提高到 9.34 dB。与传统方法相比,该方法能够根据不同谱段噪声强度自适应调整正则参数的大小,有效地去除各谱段中的条带噪声,避免细节信息丢失,图像质量得到了改善。

关键词 图像处理; 条带噪声; 单向变分; 高光谱图像

中图分类号 TP751.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.091002

Hyperspectral Image Destriping Based on Adaptive Unidirectional Variation

Liu Yamei

School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract Stripe noise disturbs the quality of hyperspectral images (HSIs), and decreases the precision and robustness of the downstream data analysis. After analyzing the characteristics of stripe noise of HSIs, that is, stripe noise is directional and noise intensities vary in each band, a new destriping method based on the adaptive unidirectional variation is proposed. On the basis of the unidirectional variation model, an energy function with a coupling term is constructed, which is then optimized iteratively with the gradient descent method. Experimental results demonstrate that the mean equivalent number of looks of real HSIs improves from 26.49 to 85.61, and the mean improvement factor of radiometric quality increases to 9.34 dB. Compared with the conventional methods, the proposed method can adapt to the spectrally varying stripe noise intensities, and is capable of removing stripe noise without loss of detail information and improving the image quality.

Key words image processing; stripe noise; unidirectional variation; hyperspectral image

OCIS codes 100.3190; 280.4788; 250.0400; 110.2960

1 引言

高光谱图像(HSIs)常受条带噪声的影响。条带噪声由像元之间辐射响应的非均匀性导致,严重影响图像视觉质量,降低后续的图像识别、图像分类和边缘信息提取等算法的精度和稳健性。因此,有必要研究能有效去除条带噪声的算法^[1-2]。

辐射定标法能够有效地校正辐射响应非均匀性,但辐射响应的增益和偏置会随时间产生漂移,因此需要重复标定,实施过程麻烦^[3]。而去条带噪声算法不需要复杂的实施条件,主要分以下三类:1)滤波法,包括空间域滤波和变换域滤波^[4]。空间域滤波法实施简单,但图像细节信息丢失严重;变换域滤波法,包括基于小波变换的滤波器^[5]和基于傅里叶变换的滤波器,在处理非周期条带噪声时效果不佳。2)匹配法,包括矩匹配法和直方图匹配法,这类方法是基于每列像元统计一致性的假设。对于小尺寸图像,由于样本数量过少,不满足统计一致的特性,去噪效果下降明显。3)变分法^[6-7],这类方法通过优化能量函数,得到去噪图像的最优

收稿日期: 2016-04-25; **收到修改稿日期:** 2016-05-17; **网络出版日期:** 2016-08-26

作者简介: 刘亚梅(1970—),女,硕士,高级实验师,主要从事光机电系统方面的研究。E-mail: liuyamei1970@126.com

解,去噪效果较好。模型中正则参数的选择对去噪效果有重要影响。而高光谱图像中有数百个波段,每个波段的条带噪声强度各不相同,如果人工选取每个波段的正则参数,将耗费大量的时间。

为了同时去除高光谱图像各谱段不同强度的条带噪声,本文提出一种基于自适应单向变分(UV)的条带噪声去除方法。该方法在单向变分模型的基础上,将不同谱段不同强度的噪声耦合在能量函数中;利用梯度下降法优化能量函数,得到去噪后的图像。本文方法可以根据各谱段噪声信息的不同,自适应地调整正则参数的大小。

2 去条带噪声算法

2.1 单向变分模型

高光谱图像受条带噪声影响的降质模型为

$$\mathbf{g} = \mathbf{u} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{u} = \{\mathbf{u}_i\}_{i=1}^B$ 是不含噪声的高光谱图像,共含有 B 个谱段,第 i 个谱段的图像为 $\mathbf{u}_i \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 。 $\mathbf{g} = \{\mathbf{g}_i\}_{i=1}^B$ 是含条带噪声的高光谱图像,第 i 个谱段的图像为 $\mathbf{g}_i \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 。 \mathbf{n} 代表条带噪声。不失一般性,假设条带噪声沿竖直方向,即 y 方向。

与高斯噪声不同,条带噪声最重要的特性是方向特性,而方向特性主要体现在图像偏导数的不同。对于 EO-1 卫星获得的第 184 波段图像,其 x 方向偏导数 $\nabla_x \mathbf{u}_i$ 和 y 方向的偏导数 $\nabla_y \mathbf{u}_i$ 如图 1 所示。

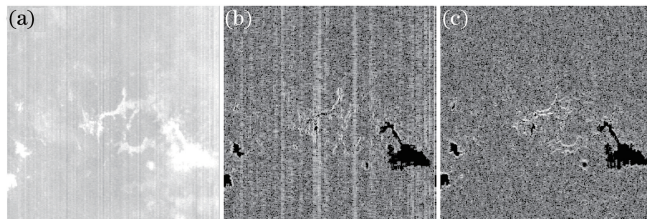


图 1 实际高光谱图像第 184 波段及其偏导数。(a) 原始图像;(b) 水平方向偏导数;(c) 竖直方向偏导数

Fig. 1 Band 184 of real hyperspectral image and its partial derivative. (a) Original image;

(b) partial derivative in horizontal direction; (c) partial derivative in vertical direction

从图 1 中可以看到,第 184 波段的原始图像受到较严重的条带噪声影响,图像质量下降明显。由于条带噪声沿竖直方向,所以条带效应只存在于水平方向偏导数 $\nabla_x \mathbf{u}_i$ 中,而竖直方向偏导数 $\nabla_y \mathbf{u}_i$ 不受影响。根据条带噪声的方向特性,Bouali 等^[6]提出了单向变分模型。该模型在变分法的框架下构造能量函数,保留原始图像竖直方向偏导数,减小水平方向的偏导数,通过最小化能量函数得到去噪图像。构造的能量函数为

$$\min_{\mathbf{u}_i} \|\nabla_y (\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)\|_1 + \tau \|\nabla_x \mathbf{u}_i\|_1, \quad (2)$$

式中 $\|\cdot\|_1$ 代表向量一范数算子。第一项是保真项,即保持原始图像竖直方向偏导数;第二项是正则项,惩罚水平方向的偏导数。 τ 是正则参数,其取值至关重要; τ 值越大,对水平方向偏导数惩罚越大,噪声去除越彻底,细节保留能力越弱;相反, τ 值越小,对水平方向偏导数惩罚越小,噪声残留越多,细节保持能力越强。接着,通过最优化的方法最小化(2)式中的能量函数,可以得到去噪后图像的最优解。

而高光谱图像含有数百个谱段,每个谱段的条带噪声强度不同。对于 EO-1 卫星获得的高光谱图像,截取第 182、184 和 195~198 共 6 个波段的 256×256 子块,如图 2 所示。从图中可以看出,第 182 和 184 波段条带噪声强度大,而其他波段噪声强度小。因此,有必要研究波段自适应去除条带噪声算法。

2.2 谱段自适应单向变分算法

将(2)式中的单一波段单向变分模型推广到高光谱单向变分模型,一个基本的想法是将所有波段的能量函数相加,即

$$\min_{\mathbf{u}} \sum_{i=1}^B [\|\nabla_y (\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)\|_1 + \tau \|\nabla_x \mathbf{u}_i\|_1], \quad (3)$$

对于图像 \mathbf{u}_i ,求(3)式的欧拉-拉格朗日方程,有

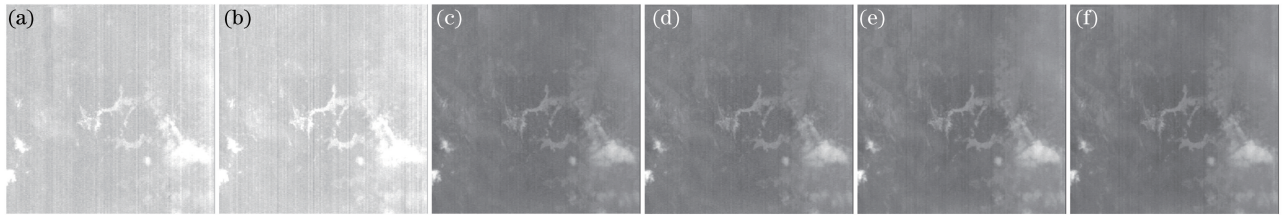


图2 实际高光谱图像的代表性波段。(a) 波段 182; (b) 波段 184; (c) 波段 195; (d) 波段 196; (e) 波段 197; (f) 波段 198

Fig. 2 Representative bands in real hyperspectral images. (a) Band 182; (b) band 184; (c) band 195; (d) band 196; (e) band 197; (f) band 198

$$\nabla_y \left[\frac{\nabla_y(\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)}{|\nabla_y(\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)|} \right] + \tau \nabla_x \left(\frac{\nabla_x \mathbf{u}_i}{|\nabla_x \mathbf{u}_i|} \right) = 0, \quad (4)$$

式中只含有第 i 个谱段的图像,无其他谱段的图像。即对每一个谱段,正则参数 τ 是一致的,因此这种方法未实现根据谱段自适应去除条带噪声的功能。导致此结果的原因是,简单地将各谱段能量函数相加,未将各谱段图像有效耦合在一起,在对(3)式求关于 \mathbf{u}_i 的偏导数过程中,其他波段的信息被滤除。因此,为了实现谱段自适应的功能,引入耦合项 $\mathbf{R}(\mathbf{u})$,得到新的能量函数,即

$$\min_{\mathbf{u}} \sum_{i=1}^B \|\nabla_y(\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)\|_1 + \tau \|\mathbf{R}(\mathbf{u})\|_1, \quad (5)$$

式中

$$\mathbf{R}(\mathbf{u}) = \sqrt{\sum_{i=1}^B (\nabla_x \mathbf{u}_i)^2}. \quad (6)$$

同样地,对于图像 \mathbf{u}_i ,求(5)式的欧拉-拉格朗日方程,有

$$\nabla_y \left[\frac{\nabla_y(\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)}{|\nabla_y(\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)|} \right] + \tau \nabla_x \left[\frac{\nabla_x \mathbf{u}_i}{\mathbf{R}(\mathbf{u})} \right] = 0. \quad (7)$$

为了方便将(4)式和(7)式比较,将(7)式改写为如下形式:

$$\nabla_y \left[\frac{\nabla_y(\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)}{|\nabla_y(\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)|} \right] + \tau \nabla_x \left[\frac{|\nabla_x \mathbf{u}_i|}{\mathbf{R}(\mathbf{u})} \cdot \frac{\nabla_x \mathbf{u}_i}{|\nabla_x \mathbf{u}_i|} \right] = 0, \quad (8)$$

相比于(4)式,(8)式的正则系数更新为 $\tau |\nabla_x \mathbf{u}_i| / \mathbf{R}(\mathbf{u})$,对于给定的高光谱图像, $\mathbf{R}(\mathbf{u})$ 是常数。因此 $\tau |\nabla_x \mathbf{u}_i| / \mathbf{R}(\mathbf{u})$ 只随 $|\nabla_x \mathbf{u}_i|$ 变化:对于条带噪声强度大的波段, $|\nabla_x \mathbf{u}_i|$ 值大,等价于正则参数 τ 的值大,能够彻底去除条带噪声;对于条带噪声强度小的波段, $|\nabla_x \mathbf{u}_i|$ 值小,等价于正则参数 τ 的值小,能够有效地保留图像细节信息。因此,通过耦合项 $\mathbf{R}(\mathbf{u})$ 的引入,可以实现谱段自适应去噪功能。

至此,根据高光谱图像中条带噪声的特点,构造出了能量函数,如(5)式所示。该能量函数有三个特点:1)保持竖直方向的偏导数不变,即保真项 $\|\nabla_y(\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)\|_1$;2)惩罚水平方向的偏导数,即正则项 $\|\mathbf{R}(\mathbf{u})\|_1$;3)正则因子 τ 能够随谱段自适应变化。该能量函数没有解析解,需要通过最优化的方法求得其最优解。常用的最优化方法有分裂式 Bregman 方法、交替优化法、高斯-赛德尔方法和梯度下降法等^[8-10]。本文采用梯度下降法优化求解。

2.3 优化方法

利用梯度下降法优化(5)式中的能量函数。根据(7)式中的欧拉-拉格朗日方程,迭代公式为

$$\mathbf{u}_i^{k+1} = \mathbf{u}_i^k + \Delta t \left\{ \nabla_y \left[\frac{\nabla_y(\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)}{|\nabla_y(\mathbf{u}_i - \mathbf{g}_i)|} \right] + \tau \nabla_x \left[\frac{\nabla_x \mathbf{u}_i}{\mathbf{R}(\mathbf{u})} \right] \right\}, \quad (9)$$

式中 Δt 是时间步长, k 是迭代次数,迭代初始值取 $\mathbf{u}_i^0 = \mathbf{g}_i$ 。迭代停止条件是归一化均方误差(NMSE)小于 ϵ 。其定义为

$$N_{\text{MSE}} = \frac{\|\mathbf{u}_i^{k+1} - \mathbf{u}_i^k\|_2^2}{\|\mathbf{u}_i^{k+1}\|_2^2}, \quad (10)$$

式中 $\|\cdot\|_2$ 是向量二范数算子。本文中 ϵ 取 10^{-4} 。优化算法流程图如图3所示。

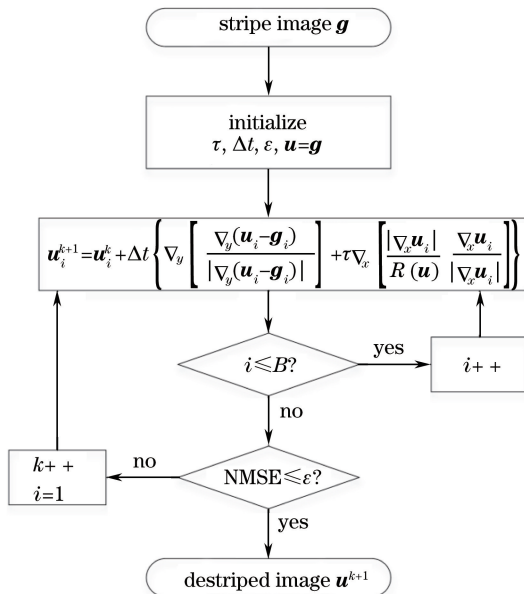


图3 优化算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the optimized algorithm

随着迭代次数的增加,噪声被逐渐去除,并收敛至不含条带噪声的图像 u_i^{k+1} 。值得注意的是, u_i^{k+1} 不是最小值点,而是极小值点,即局部最优解。在去除图像条带噪声等图像恢复的问题中,局部最优解即能够满足应用要求。

3 实验结果和分析

为了验证本文方法的有效性,对 EO-1 卫星获得的高光谱数据去噪,并与低通滤波法、小波滤波法^[4]、空间-谱段自适应全变分法^[11]和单向变分法^[6]作对比。为保证对比实验的公平性,对于给定的实验数据,每种对比方法中的参数保持固定,即每种算法的参数是全局一致的。

选取的实验数据是第 171~180、182、184 和 195~200 波段,共 18 个波段,即 $g \in \mathbf{R}^{256 \times 256 \times 18}$ 。除了主观视觉效果定性评价外,还采用等效视数(E_{NL})^[12]和辐射质量提升因子(I_F)^[13]进行定量评价。 M_{ENL} 和 M_{IF} 分别代表所有波段的等效视数和辐射质量提升因子均值。指标的值越大,代表图像质量越好。

为方便说明,将波段重新编号为 1~18。各波段水平方向偏导数 $\nabla_x u_i$ 的一范数,即 $\|\nabla_x u_i\|_1$,如图 4 所示。

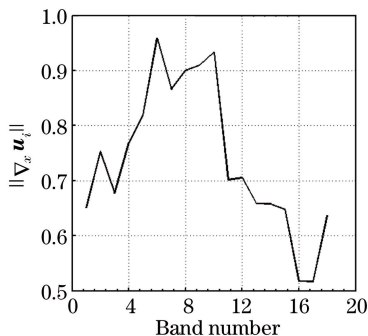


图4 不同波段下条带噪声强度

Fig. 4 Stripe noise intensities in different bands

结合实际图像和图 4 可以看出,条带噪声较强的波段, $\|\nabla_x u_i\|_1$ 值较大;相反,条带噪声较小的波段, $\|\nabla_x u_i\|_1$ 值较小。据此可以自适应调整正则因子。图 5 和图 6 分别是第 184 波段和第 198 波段的去噪结果。

从图 5 和图 6 中可以看出,第 184 波段条带噪声严重,第 198 波段条带噪声轻微。低通滤波法实现最简单,但该方法没能利用条带噪声的方向特性,导致图 4(b)和图 5(b)中仍残留较多的条带噪声;此外,该方法

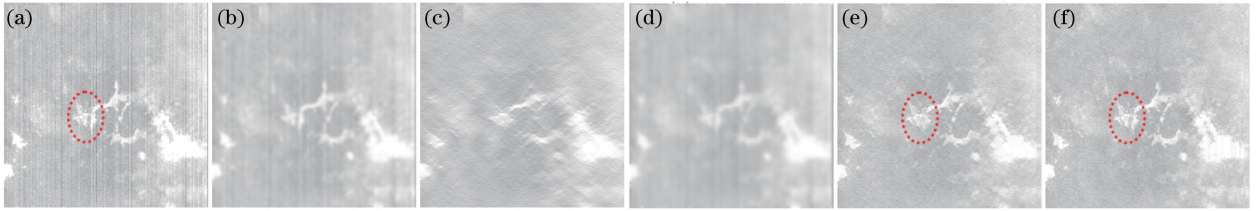


图5 高光谱图像第184波段去噪结果。(a) 原始图像；(b) 低通滤波法；(c) 小波滤波法；
(d) 全变分法；(e) 单向变分法；(f) 本文方法

Fig. 5 Denoising results of band 184 of hyperspectral images. (a) Original image; (b) low pass filter; (c) wavelet filter; (d) total variation; (e) UV method; (f) proposed method

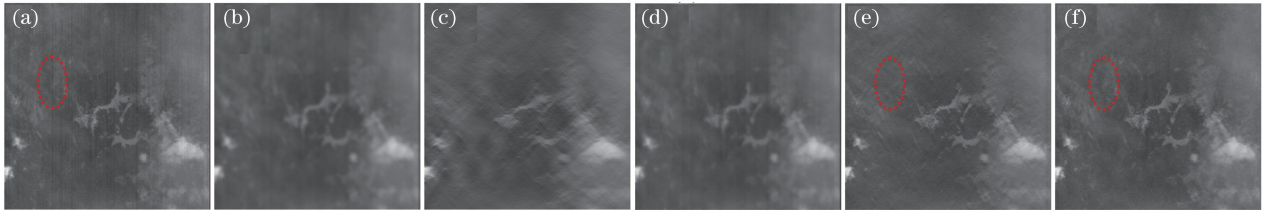


图6 高光谱图像第198波段去噪结果。(a) 原始图像；(b) 低通滤波法；(c) 小波滤波法；
(d) 全变分法；(e) 单向变分法；(f) 本文方法

Fig. 6 Denoising results of band 198 of hyperspectral images. (a) Original image; (b) low pass filter; (c) wavelet filter; (d) total variation; (e) UV method; (f) proposed method

细节信息损失严重,去噪后图像模糊。小波滤波法将图像小波变换后的水平高频系数置零,该方法可以彻底地去掉条带噪声,但水平方向的细节被一起去掉,导致原始图像细节信息丢失严重。空间-谱段自适应全变分法能根据空间信息和谱段信息的不同,自适应调整正则参数,但该方法本质上是各向同性的,未能利用条带噪声各向异性的性质,导致垂直方向细节信息损失严重。对于第198波段中轻微的条带噪声,该方法去噪效果较好,如图6(d)所示。对于单向变分法,该算法去噪效果较好,但算法中正则参数是全局一致的,不能根据谱段信息进行自适应调整。对于第198波段中轻微的条带噪声,正则参数偏大,导致图像纹理信息损失严重,如图6(e)所示,红色椭圆的标注部分被平滑了,细节信息丢失。此外,图5(e)中的图像也存在模糊的现象。

相比之下,本文算法充分考虑了条带噪声的方向特性,并利用了高光谱图像各谱段条带噪声强度不同的特点,自适应地调节正则因子,去噪效果最好。

除了主观评价去噪后图像质量外,定量计算各波段 E_{NL} 和 I_F 值,如图7所示。

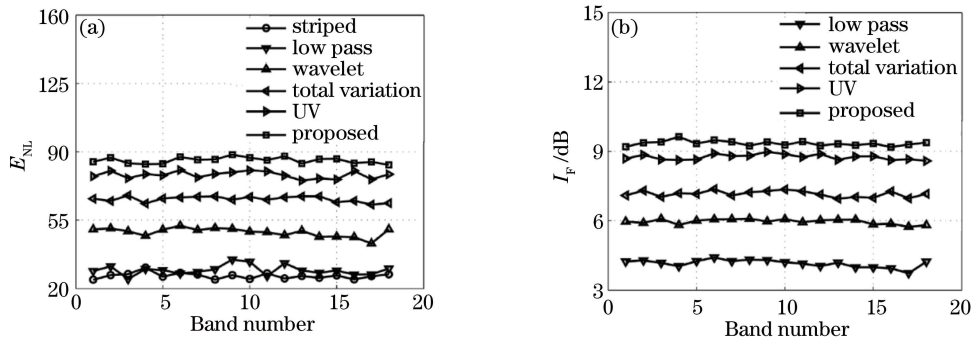


图7 定量评价指标随波段变化图。(a) E_{NL} ; (b) I_F

Fig. 7 Quantitative evaluation in different bands. (a) E_{NL} ; (b) I_F

从图7中可以看出, E_{NL} 和 I_F 曲线与图4中偏导数 $\|\nabla_x u_i\|_1$ 曲线趋势基本一致。使用本文方法去噪后的图像评价指标优于对比方法,这一点与图5、图6中图像质量是一致的。所有波段 E_{NL} 和 I_F 均值如表1所示。可以看出,无论是主观视觉质量,还是客观评价指标,本文算法均优于已有算法。

表1 高光谱图像客观评价指标对比表

Table 1 Comparison of evaluation indexes for hyperspectral images

Method	Striped	Low pass	Wavelet	Total variation	UV	Proposed
M_{ENL}	26.49	29.43	48.83	65.76	78.16	85.61
M_{IF}/dB	—	4.15	5.96	7.16	8.75	9.34

4 结 论

高光谱图像常包含条带噪声。针对高光谱图像条带噪声具有方向性,以及各谱段条带噪声强度不同的特点,将单向变分模型从单一谱段扩展到多谱段,并引入了耦合项,使正则参数能够随各谱段噪声强度而变化。具体地,构造含有保真项、正则项和耦合项的能量函数,并利用梯度下降法进行迭代求解,得到去噪后图像。实验结果表明,本文算法主观和客观评价指标均优于已有算法。此方法的优点在于能够自适应去除各个谱段不同强度的条带噪声,同时保留图像的细节,改善图像质量。

参 考 文 献

- Zhang Baohua, Liu He. Infrared image denoising algorithm based on sub-band component threshold estimation [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0809002.
张宝华, 刘 鹤. 采用子带分量阈值估计的红外图像去噪方法 [J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0809002.
- Guo Lingling, Wu Zepeng, Zhang Liguang, *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.
- Jian Xianzhong, Lu Ruizhi, Guo Qiang. Modified locally adaptive non-uniformity correction algorithm for single infrared image [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(12): 1344-1348.
简献忠, 陆睿智, 郭 强. 改进的单幅红外图像局部自适应非均匀校正 [J]. 激光与红外, 2014, 44(12): 1344-1348.
- Chen J, Lin H, Shao Y, *et al.* Oblique striping removal in remote sensing imagery based on wavelet transform [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(8): 1717-1723.
- Li Dongming, Gai Mengye, Li Chaoran, *et al.* Research on adaptive optics image denoising algorithm based on the wavelet-based contourlet transform [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 111001.
李东明, 盖梦野, 李超然, 等. 基于小波域的 Contourlet 变换法的自适应光学图像去噪算法研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 111001.
- 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.
- Zhou G, Fang H, Yan L, *et al.* Removal of stripe noise with spatially adaptive unidirectional total variation [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(12): 2756-2762.
- Wu Zepeng, Jia Hongguang, Xuan Ming, *et al.* Nonuniformity correction algorithm for infrared focal plane arrays based on extended total variation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0304001.
吴泽鹏, 贾宏光, 宣 明, 等. 基于扩展全变分的红外焦平面阵列非均匀性校正方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0304001.
- Zhao Wenda, Zhao Jian, Zhao Fan, *et al.* Variable infrared image enhancement of bimodal Gaussian function specification [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0309002.
赵文达, 赵 建, 赵 凡, 等. 双峰高斯函数规定化的变分红外图像增强 [J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0309002.
- Qiao Naosheng, Zhang Fen, Li Xiaoqin. Defect image preprocessing of printed circuit board [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 021003.
乔闹生, 张 奋, 黎小琴. 印刷电路板光板缺陷图像预处理研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 021003.
- Yuan Q, Zhang L, Shen H. Hyperspectral image denoising employing a spectral-spatial adaptive total variation model [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(10): 3660-3677.
- Zhou Dabiao, Li Gang, Wang Dejiang, *et al.* Method of destriping stripe noise of aerial images based on total variation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 31(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, 31(11): 1128003.
- Corsini G, Diani M, Walzel T. Striping removal in MOS-B data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(3): 1439-1446.