

引用格式: WENG Jian-wen, YUAN Yin-lin, KANG Qing, *et al.* Calibration Method of Smear in the Sun Glint Region of Directional Polarization Camera Remote Sensing Images[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(2): 0228002

翁建文,袁银麟,康晴,等.多角度偏振成像仪遥感图像太阳耀斑区的拖尾校正方法[J].光子学报,2020,**49**(2):0228002

多角度偏振成像仪遥感图像太阳耀斑区的拖尾校正方法

翁建文^{1,2},袁银麟¹,康晴¹,涂碧海^{1,2},夏茂鹏¹,黄冬^{1,2},洪津¹,郑小兵¹

(1 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室,合肥 230031)

(2 中国科学技术大学,合肥 230026)

摘要:为了有效校正星载偏振相机成像时太阳耀斑区产生的拖尾,以高分五号卫星多角度偏振成像仪为例,结合多角度偏振成像仪在轨成像特点,理论分析了图像获取过程中拖尾产生的机理.建立了光斑区不含饱和像元情况下能够有效对漏光拖尾进行校正的矩阵法与暗行法校正模型,以及光斑区全像元饱和的情况下结合矩阵法与暗行法估计光斑区饱和和像元强度的遗留拖尾校正模型,该算法充分考虑了强光饱和条件下太阳耀斑区产生的漏光拖尾与遗留拖尾.利用实验室积分球光源成像光斑模拟在轨运行时遥感图像太阳耀斑开展拖尾校正方法可行性验证实验.实验结果表明,该方法不仅能有效去除图像中的拖尾噪声,提高图像质量,而且能够对光斑饱和和像元强度进行有效估计.最后,分析多角度偏振成像仪在轨成像图中耀斑区拖尾对其辐亮度测量精度的影响,分析结果表明,拖尾校正前后,灰度方差由 202.69×10^6 下降至 2.32×10^6 ,平均梯度由 5.08×10^{-1} 下降至 2.26×10^{-1} .

关键词:偏振相机;太阳耀斑;漏光拖尾;遗留拖尾;饱和;测量精度

中图分类号: TP79

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204902.0228002

Calibration Method of Smear in the Sun Glint Region of Directional Polarization Camera Remote Sensing Images

WENG Jian-wen^{1,2}, YUAN Yin-lin¹, KANG Qing¹, TU Bi-hai^{1,2}, XIA Mao-peng¹,
HUANG Dong^{1,2}, HONG Jin¹, ZHENG Xiao-bing¹

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

(2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to effectively correct smears in the sun glint produced by spaceborne polarization camera imaging, this paper takes the GF-5 satellite directional polarization camera as an example and combines with imaging characteristics of directional polarization camera on orbit to theoretically analyze the generating mechanism of smears in the process of image acquisition. It sets up a matrix method calibration model and a dark line method calibration model both of which can effectively correct the light leakage smear under the circumstances of without any saturated pixel in the flare region. And it sets up a legacy smear calibration model based on a combination of the matrix method and dark line method under

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 41605021,41805019),安徽省自然科学基金(No. 1708085QF131)

第一作者:翁建文(1990-),男,博士研究生,主要研究方向为光学传感器数据处理技术、软件技术. Email: wjw1990@mail.ustc.edu.cn

导师:郑小兵(1969-),男,研究员,博士,主要研究方向为光辐射精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学. Email: xbzhen@aiofm.ac.cn

通讯作者:袁银麟(1983-),男,副研究员,博士,主要研究方向为先进辐射定标光源技术及偏振定标. Email: ylyuan@aiofm.ac.cn

收稿日期:2019-09-24; **录用日期:**2019-12-02

<http://www.photon.ac.cn>

the circumstances of full pixel saturation in the flare region to estimate saturated pixel intensity in the flare region. This algorithm fully considers the leakage smear and legacy smear produced in the sun glint under the circumstances of intense light saturation. The feasibility of this smear correction method is verified by using spots of integrating sphere light source imaging in the laboratory to simulate solar flares in remote sensing images of directional polarization camera when it works on orbit. The experimental results show that this method can not only effectively remove smear noise in images and improve image quality but also effectively estimate spot saturation pixel intensity. In the end, this paper analyzes the influence of the flare region smear in directional polarization camera on-orbit images on radiance measurement accuracy of directional polarization camera. Analysis results show that gray variance can be decreased from 202.69×10^6 to 2.32×10^6 , and average gradient can be decreased from 5.08×10^{-1} to 2.26×10^{-1} after the smear correction.

Key words: Polarization camera; Sun glint; Light leakage smear; Legacy smear; Saturation; Measurement accuracy

OCIS Codes: 280.4788; 280.4991; 120.0280; 130.6010

0 引言

星载偏振相机一般采用具有体积小、质量轻、功耗低、灵敏度高、光谱响应宽、动态范围大以及机械强度高优良性能的电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)作为其对地观测的图像传感器,按电荷转移方式可将 CCD 分为帧转移型、行间转移型和帧行间转移型三类^[1-2]. 高分五号卫星多角度偏振成像仪(Directional Polarization Camera, DPC)采用的帧转移型面阵 CCD 传感器具有灵敏度高、光谱响应宽等优点,但其光电成像系统中的 CCD 器件易受到强光干扰^[3],拖尾是 CCD 受到强光干扰而形成的噪声之一. DPC 在轨运行时,在一定的观测条件下传感器接收太阳光在海面的镜面反射信息时,由于反射信息强度远大于海水等目标辐射强度,在成像图中形成了非常亮的光斑,一般将此光斑称为太阳耀斑^[4]. DPC 的 CCD 受太阳耀斑的影响会产生太阳耀斑区拖尾, DPC 在轨运行成像图中拖尾主要出现在太阳耀斑区,在太阳耀斑区中弱目标处拖尾甚至高达实际响应的 58% 左右,导致 DPC 无法完成对弱目标的探测,严重影响了 DPC 的辐亮度探测精度,因而分析 DPC 拖尾产生机理,开展拖尾校正方法研究和校正效果的定量化评价工作,对提高 DPC 的辐亮度探测精度具有重要意义.

综合目前的研究可知^[5-11],帧转移型 CCD 成像图中主要存在漏光拖尾,漏光拖尾^[5]是由于高亮度的拍摄对象在 CCD 非积分时间(转移时间)产生的漏光电荷与 CCD 转移的信号电荷混合在一起产生的.针对漏光拖尾,国内外的研究者进行了大量的理论及实验研究,并提出了一系列校正模型.如 POWELL K、TABEL S 等^[6-7]提出了四种 CCD 工作模式下的漏光拖尾校正矩阵表示理论形式,但矩阵法只适用于图像所有像元均未出现饱和的情况,当图像出现饱和时,图像灰度值并不能表征实际信号,因此矩阵法会出现校正不完全情况.孙瑾秋、姚睿等^[8-9]提出了星图中基于小波变换的漏光拖尾校正方法,但基于背景估计等数字图像处理算法只适用于对平稳变化背景中的漏光拖尾校正,并不适用于含复杂地物的对地成像载荷成像图中漏光拖尾的校正.针对含饱和像元情况下的漏光拖尾, HAN Y S 等^[10]提出了通过下传光学暗行的方式来校正漏光拖尾; HAGOLLE O 等^[11]提出采用 POLDER 的不饱和通道(443P)来外推其他饱和通道饱和像元灰度值的方法来校正漏光拖尾.但 DPC 成像光斑出现过饱和时,采用光学暗行校正漏光拖尾后会遗留单侧拖尾且 DPC 在轨成像时太阳耀斑处所有成像通道均出现饱和,因此需要研究一种新的方法来恢复太阳耀斑处饱和和像元真实灰度值进行遗留单侧拖尾的校正.大部分研究者对这种单侧拖尾研究停留在对其产生机理、产生现象及特性介绍上,鲜有对其校正方法进行研究的报道.张震等^[5]提出了一种新的电荷转移损失率模型来解释拖尾的单侧、有限长特点;周孟莲等^[12]对全饱和单侧拖尾特性进行分析;KNOX K T 等^[13]指出了遗留拖尾大小与饱和像元丢失信号值成正比,并提出了单饱和像元对后续像元影响的误差模型,但此校正方法无法校正 DPC 的遗留单侧拖尾,因此 KNOX K T 的校正方法并不适用于 DPC.

本文结合高分五号卫星多角度偏振成像仪的工作机理及多光谱通道特点,分析了 DPC 成像特点和拖尾产生机理,结合实际 DPC 拖尾校正需求,建立了光斑区不含饱和像元情况下能够有效对漏光拖尾进行校正的矩阵法与暗行法校正模型,以及光斑区全像元饱和情况下基于结合矩阵法与暗行法估计光斑区饱和和像元强度的遗留拖尾校正模型.利用积分球光源的成像光斑模拟 DPC 在轨运行时的遥感图像太阳耀斑,开展

拖尾校正方法可行性验证实验.最后,利用在轨成像真实耀斑图像分析拖尾对 DPC 辐亮度测量精度的影响,验证拖尾校正方法的可行性.

1 DPC 成像特点和拖尾产生机理

DPC 采用帧转移型面阵 CCD 传感器, CCD 探测阵列上成像区像元数为 544×512 , 其中暗行像元数为 20×512 . DPC 具有 15 个数据采集通道, 其中 9 个通道为偏振测量通道(490 nm、670 nm、865 nm 三个波段, 每个波段具有 0° 、 60° 及 120° 三个偏振解析角度通道), 5 个非偏振测量通道(443 nm、565 nm、763 nm、765 nm 及 910 nm 五个波段), 以及 1 个用于采集暗电流的暗电流通道, DPC 成像系统结构示意图如图 1 所示. DPC 在轨运行时, 基于 $\pm 50^\circ$ 宽视场观测和卫星飞行, 可以实现连续对单个



图 1 DPC 成像系统结构示意图
Fig.1 Structure diagram of DPC imaging system

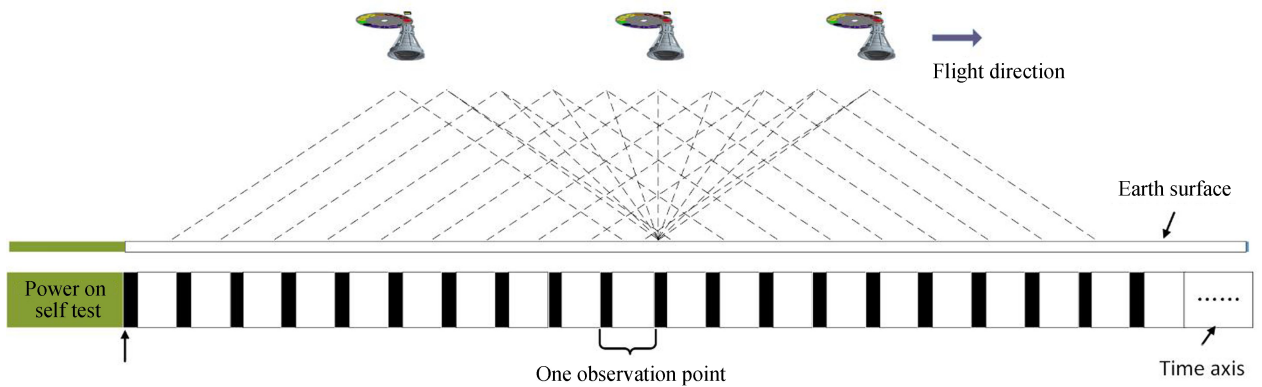
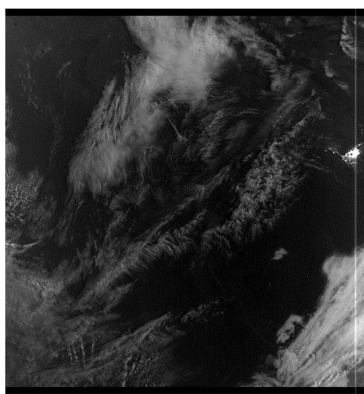
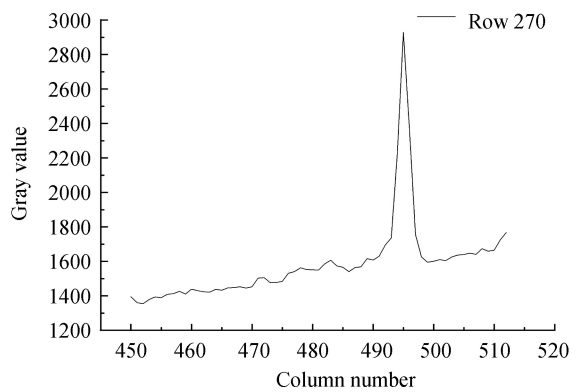


图 2 DPC 的多角度观测原理示意图
Fig.2 The multi-angle observation principle diagram of DPC



(a) Sun glint region smear



(b) Gray value of row 270

图 3 DPC 陆地工作模式下通道 15 成像图
Fig.3 The channel 15 image under DPC land working mode

目标区域进行 9 个方向以上的在轨多角度观测, 生成的像元每个至少包含 126 个观测矢量(14 个成像通道 \times 9 个观测角度)^[14], DPC 的多角度观测原理示意图如图 2 所示. DPC 在轨运行时观测视场处于太阳耀斑观测边缘视场指向角内时, 成像图中将出现导致像元饱和的太阳耀斑^[15], 太阳耀斑区将产生明显的拖尾噪声. 图 3 所示为 DPC 于 2018 年 6 月 26 日在陆地工作模式下采集的第 716 轨第 13 圈通道 15 的成像图. 图 3(a) 显示了太阳耀斑区上下形成的垂直拖尾, 这是因为在电荷转移过程中, CCD 不断曝光, 导致太阳耀斑上下出

现垂直拖尾;图 3(b)显示了太阳耀斑区下方 270 行、450~512 列拖尾所在区域的像元响应灰度值曲线,显示的是拖尾的水平截面,由图 3(b)可知拖尾造成输出灰度值大于实际值,结合 DPC 处于太阳耀斑观测边缘视场指向角外对此区域拍摄的不含太阳耀斑成像图,确定图 3(b)所处区域像元响应灰度值具有平稳变化特性,采用适用于平稳变化背景中的拖尾校正的基于背景估计的数字图像处理算法^[8-9],核算得到拖尾附加电荷达到了实际响应的 58%左右,若不进行校正将导致成像遥感数据的不准确和遥感图像的失真.

CCD 成像曝光后感光区积累的电荷一次一行向存储区转移,图 4 为帧转移型 CCD 图像传感器将感光区电荷移入存储区过程中产生漏光拖尾的示意图.图 4 中由于感光区电荷移入存储区的过程中感光区仍处于曝光状态不断积累电荷,感光区内强光照射区上方区域①像元转移过程中经过强光照射区并移入强光照射区下方区域②时附加电荷形成光斑上方拖尾.与此同时强光照射区上方区域①像元继续曝光并向存储区方向进行转移,经过强光照射区时附加电荷在下一帧积分成像并进行电荷转移时,与强光照射区下方区域②像元一起移入存储区,形成光斑下方拖尾,因此在连续采集成像时从第二帧图像开始均会在光斑上下两侧产生贯穿光斑的整列漏光拖尾^[8,16].

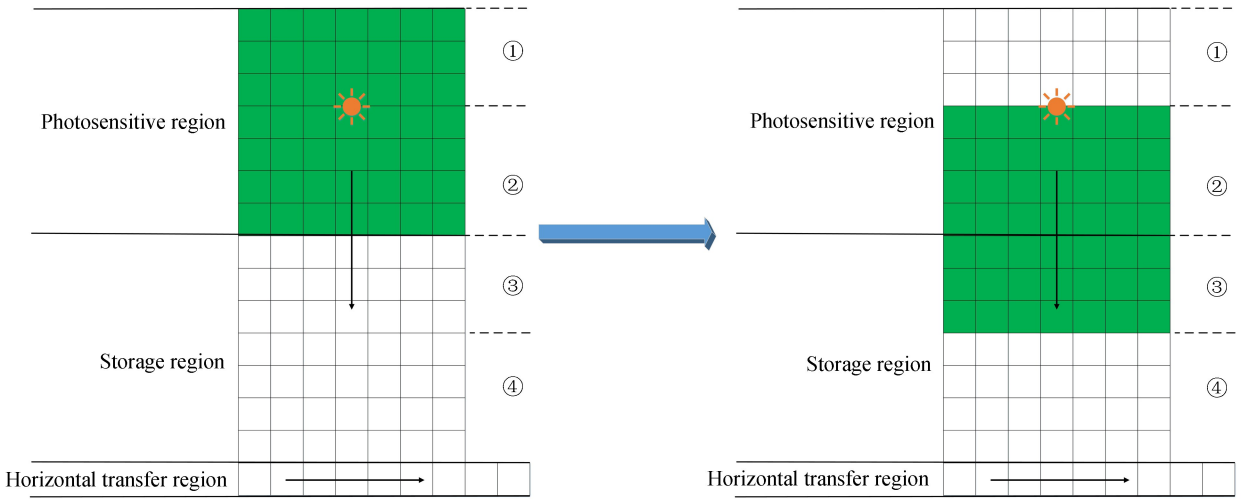


图 4 帧转移型 CCD 图像传感器产生漏光拖尾示意图

Fig.4 Frame transfer CCD image sensor generates light leakage smear diagram

电荷转移效率(Charge Transfer Efficiency, CTE)是 CCD 最重要的参数之一,是指信号电荷在 CCD 转移沟道内转移时,转移一次电荷的过程中成功转移的电荷与转移前总电荷的比值^[17].对于 DPC 来说,成像图中未出现饱和时,大部分信号电荷包能够完整无损并及时从一个势阱转移到另一个势阱中去.当成像图中出

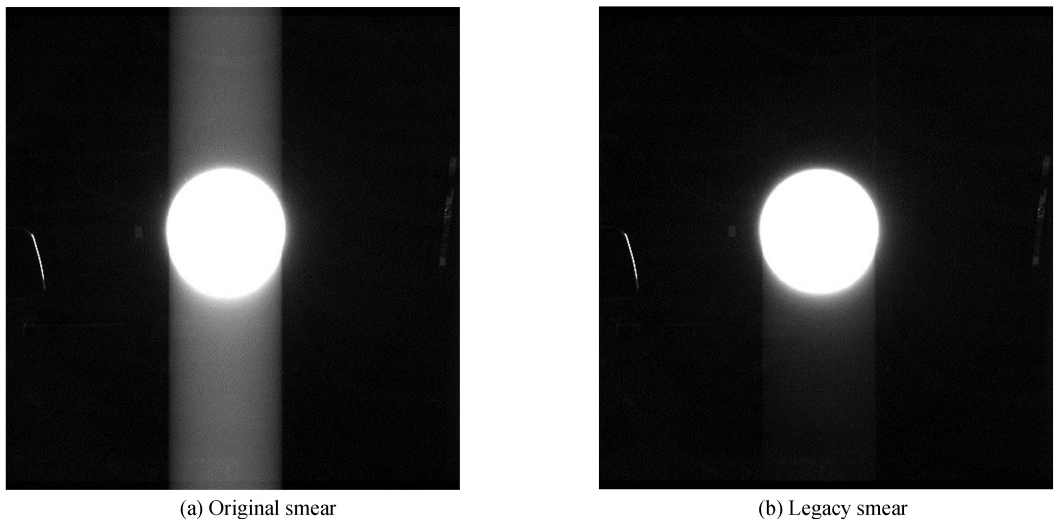


图 5 积分球内开 64 灯时 DPC 对积分球成像图

Fig.5 DPC image of integrating sphere when 64 lights are turned on in integrating sphere

现饱和像元,电荷包从前一势阱转移到相邻势阱时,因 CCD 电荷转移能力有限、电荷转移效率降低等原因,导致部分电荷无法从当前像元转移到相邻的像元中去,从而对后续转移电荷造成影响形成转移损失拖尾,且转移损失拖尾大小与饱和像元损失信号值成正比^[18]。

将 DPC 工作模式设置为海洋工作模式并对准大口径积分球出光口,依次增加积分球内开灯数,当开灯数足够多(64 灯)时,成像图中出现了除漏光拖尾以外的其他类型拖尾现象例如遗留拖尾,如图 5 所示。图 5(a)为积分球内开 64 灯时 DPC 对积分球成像采集输出的原始成像图,图 5(b)为移除图 5(a)中漏光拖尾后仅含有遗留拖尾的成像图。遗留拖尾仅存在于光斑一侧,它的单侧特性区别于漏光拖尾。

2 DPC 拖尾校正

根据 DPC 成像特点及 DPC 太阳耀斑区遥感图像的拖尾产生机理,设计了 DPC 遥感图像的拖尾校正方法研究技术路线,如图 6 所示。由图 6 可知,首先判断图像是否含有饱和像元,若不含饱和像元,则图像中只含漏光拖尾,直接使用漏光拖尾矩阵法进行校正。当图像中含饱和像元时,漏光拖尾的校正以图像的各列为最小处理单元,进行漏光拖尾校正时,先判断图像各列是否含有饱和像元,若不含饱和像元则采用矩阵法校正当前列的漏光拖尾;若含饱和像元则采用暗行法校正当前列的漏光拖尾。其次,联立矩阵法与暗行法校正模型恢复光斑区饱和像元的真实灰度响应值,并与基于标准通道的饱和像元外推法恢复结果进行对比,验证方法的可行性。最后,利用恢复光斑区饱和像元后的图像进行遗留拖尾的校正,最终得到校正拖尾后的遥感图像。

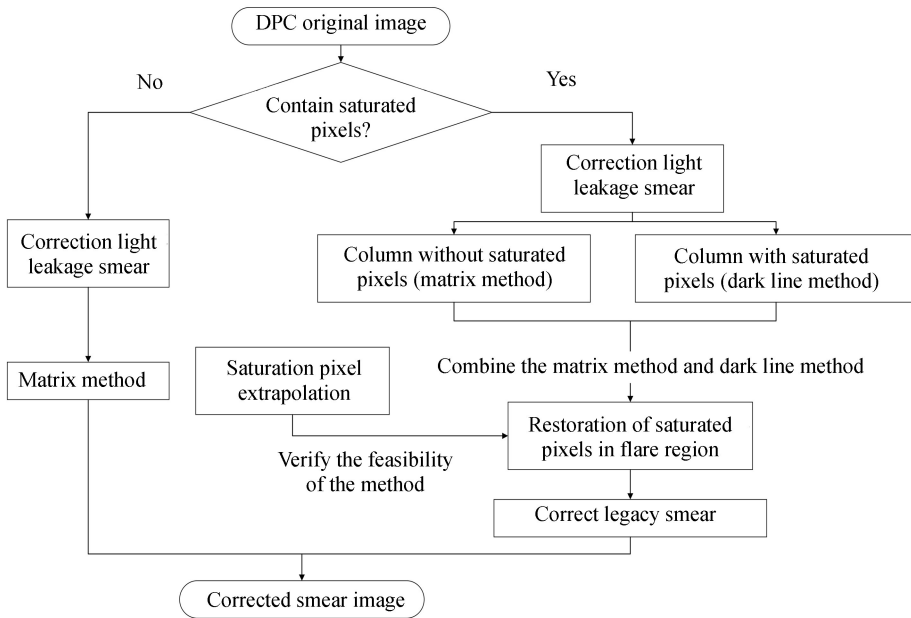


图 6 DPC 遥感图像的拖尾校正方法研究技术路线

Fig.6 Research on the smear correction method of DPC remote sensing image

2.1 漏光拖尾校正模型

2.1.1 矩阵法校正模型

当成像图中不含饱和像元时,光斑区的拖尾只含有曝光结束后继续帧转移曝光而形成的漏光拖尾。针对未饱和情况下的漏光拖尾,目前使用最多的是采用矩阵法对其进行校正。针对成像后是否对 CCD 遗留电荷进行清道,有两种类型矩阵校正算法,第一种为不考虑前一帧遗留电荷影响,只考虑当前帧附加电荷,采用此算法代表性的星载偏振相机为法国 POLDER^[11],其校正矩阵如式(1)所示。

$$\begin{pmatrix} Y'_{1,j} \\ Y'_{2,j} \\ Y'_{3,j} \\ \vdots \\ Y'_{M,j} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \delta & \delta & \cdots & \delta \\ 0 & 1 & \delta & \cdots & \delta \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & \delta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y_{1,j} \\ Y_{2,j} \\ Y_{3,j} \\ \vdots \\ Y_{M,j} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $Y'_{i,j}$ 为附加漏光拖尾后的像元响应灰度值, $Y_{i,j}$ 为不含漏光拖尾的像元响应灰度值, δ 为行移动时间因子且 $\delta = t_{\text{shift}} / t_{\text{integration}}$, $t_{\text{integration}}$ 为积分时间, t_{shift} 为行转移时间, i 为图像行序号, j 为图像列序号, M 为图像总行数.

由式(1)可得

$$\begin{pmatrix} Y_{1,j} \\ Y_{2,j} \\ Y_{3,j} \\ \vdots \\ Y_{M,j} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & F(1) & F(2) & \cdots & F(M-1) \\ 0 & 1 & F(1) & \cdots & F(M-2) \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & F(M-3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y'_{1,j} \\ Y'_{2,j} \\ Y'_{3,j} \\ \vdots \\ Y'_{M,j} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中

$$F(x) = (-1)^x f(1)\delta^x + (-1)(x-1)f(2)\delta^{(x-1)} + \cdots + (-1)(x-l)f(l+1)\delta^{(x-l)} + \cdots + (-1)^2 f(2)\delta^2 + (-1)^1 f(1)\delta^1 \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{H(x)}{G(x)} \quad (4)$$

$$H(x) = \begin{cases} 1 & x=1 \\ H(x-1)(M-x) & x=2,3,\dots,n \end{cases} \quad (5)$$

$$G(x) = \begin{cases} 1 & x=1,2 \\ G(x-1)(x-1) & x=3,\dots,n \end{cases} \quad (6)$$

由式(2)~(6)可知,漏光拖尾校正矩阵只与 CCD 的成像行有关,因此在成像行确定的情况下才能确定漏光拖尾校正矩阵,再将其作为配置文件存储,后期处理时只需读取校正矩阵参数即可,但这种校正方法只适用于 DPC 第一次成像时漏光拖尾校正.

对于 DPC 第一次成像或前一次成像时未遗留附加电荷的情况,可通过式(2)来校正漏光拖尾的影响.但当 DPC 在轨连续采集成像时,当前成像采集数据附加电荷不仅与当前帧有关,还与前一帧有关,考虑前一帧遗留电荷影响并适用于 DPC 在轨连续采集成像的漏光拖尾校正矩阵^[6]为

$$\begin{pmatrix} Y'_{1,j} \\ Y'_{2,j} \\ Y'_{3,j} \\ \vdots \\ Y'_{M,j} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \delta & \delta & \cdots & \delta \\ \delta & 1 & \delta & \cdots & \delta \\ \delta & \delta & 1 & \cdots & \delta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta & \delta & \delta & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y_{1,j} \\ Y_{2,j} \\ Y_{3,j} \\ \vdots \\ Y_{M,j} \end{pmatrix} \quad (7)$$

对式(7)矩阵求逆得到漏光拖尾校正后的像元灰度响应值,如式(8)所示

$$\begin{pmatrix} Y_{1,j} \\ Y_{2,j} \\ Y_{3,j} \\ \vdots \\ Y_{M,j} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \delta_2 & \cdots & \delta_2 \\ \delta_2 & \delta_1 & \delta_2 & \cdots & \delta_2 \\ \delta_2 & \delta_2 & \delta_1 & \cdots & \delta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_2 & \delta_2 & \delta_2 & \cdots & \delta_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y'_{1,j} \\ Y'_{2,j} \\ Y'_{3,j} \\ \vdots \\ Y'_{M,j} \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中

$$\delta_1 = \frac{1}{1-\delta} \times \left(1 + \frac{\delta}{\delta(1-M)-1} \right) \quad (9)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{1-\delta} \times \frac{\delta}{\delta(1-M)-1} \quad (10)$$

2.1.2 暗行法校正模型

如图 7 所示,将 DPC 的成像 CCD 感光区上下各预留 10 行像元作为暗行,暗行在 CCD 曝光时不受光照,CCD 曝光时暗行的像元信号是完全不存在的^[19],而在电荷转移输出经过成像区曝光时会产生像元信号,此时暗行中像元信号大小能够反映漏光拖尾信号大小,暗行法校正公式如式(11)所示.

$$Y'_{i,j} - Y'_{i1,j} = (1-\delta)Y_{i,j} \approx Y_{i,j} \quad (11)$$

式中, $Y'_{i,j}$ 为实际采集输出信号值, $Y_{i,j}$ 为校正漏光拖尾后的信号值, i_1 为暗行序号.

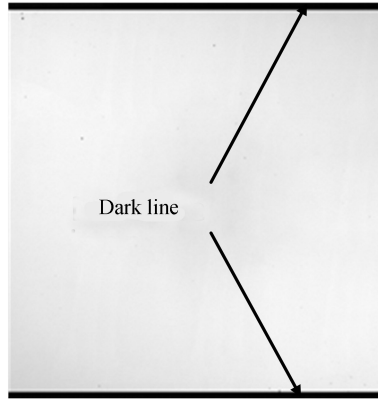


图7 DPC 成像区暗行
Fig.7 Dark line in DPC imaging area

2.2 遗留拖尾校正模型

当入射光足够强时,采集到的像元响应灰度值将小于其真实值,此时即使校正漏光拖尾,成像图中光斑一侧还有未得到校正的遗留拖尾,如图 5(b)所示.提取图 5(b)光斑下方第 211 列像元灰度值曲线如图 8(a)所示,由图 8(a)可知,遗留拖尾大小跟当前像元与饱和像元距离成反比.设未饱和像元与饱和像元间隔行数为 L ,则

$$D_N(L) \propto \frac{1}{L} \quad (12)$$

式中, $D_N(L)$ 为单个饱和像元使其下方间隔 L 行处像元附加的灰度值大小.

同时遗留拖尾大小还与饱和像元真实值成正比,即

$$D_N(L) \propto (D_{\text{sat}} - T_{\text{upmax}}) \quad (13)$$

式中, D_{sat} 为恢复饱和像元的真实值, T_{upmax} 为 DPC 动态范围上限值.

将饱和像元对下方像元的影响因数比例系数设为 K_{sat} ,则饱和像元下方像元受此饱和像元影响而遗留拖尾大小为

$$D_N(L) = \frac{K_{\text{sat}} \times (D_{\text{sat}} - T_{\text{upmax}})}{L} \quad (14)$$

在饱和像元之上,校正漏光拖尾后,拖尾已得到完全校正,因此饱和像元对其上方所有像元无影响.在饱和像元下方,遗留拖尾大小如式(14)所示,可得到单列饱和像元遗留拖尾噪声大小如图 8(b)所示.

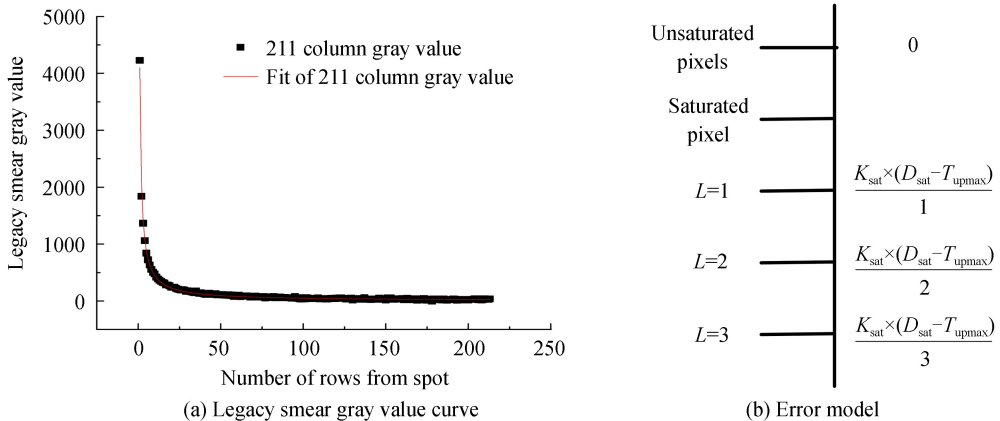


图8 单列遗留拖尾特性
Fig.8 Single column legacy smear feature

使用单列饱和像元遗留拖尾噪声大小模型校正遗留拖尾的前提条件是必须得到饱和像元的真实值,有效的恢复饱和像元真实值才能为遗留拖尾的校正提供有效的数据源.法国 POLDER 采用的方法为基于标准

通道(未饱和通道,如 443 nm 通道)的饱和像元外推法来恢复饱和像元真实值.当 DPC 在轨成像图出现太阳耀斑时,443 nm 通道在光斑处也出现饱和现象,即所有成像通道均在太阳耀斑区饱和,基于标准通道的饱和像元外推法已不适用.太阳耀斑区饱和像元具有覆盖像元少及连续的特点,一般太阳耀斑区同一列饱和像元数在 10 个像元以内,因此可假设耀斑区所有饱和像元真实值相同且耀斑区行序号集合为 S ,饱和像元数为 N ,并联立式(7)和式(11)可得

$$Y'_{i,j} = Y_{i,j} + \delta \sum_{i-1} Y_{i,j} = Y_{i,j} + \delta \sum_{i-1} Y_{i,j} + \delta N \overline{Y}_S \approx Y_{i,j} + Y'_{i1,j} \quad (15)$$

由式(15)可得到饱和像元均值为

$$\overline{Y}_S \approx \frac{1}{\delta N} (Y'_{i1,j} - \delta \sum_{i-1} Y_{i,j}) \quad (16)$$

式中, \overline{Y}_S 为图像第 j 列处于光斑内的 N 个饱和像元的均值.

3 DPC 拖尾校正精度验证实验研究

3.1 DPC 实验室漏光拖尾校正精度分析验证

为了验证上述算法对 DPC 连续采集成像时产生的拖尾校正的有效性,本文以大口径积分球作为 DPC 成像目标进行成像采集到的光斑来模拟在轨运行时的太阳耀斑,并利用本文算法对获取图像中的拖尾进行校正处理.实验用的积分球可通过调节积分球内部开启灯数,来获取不同辐亮度等级下的所有通道成像数据.图 9 为漏光拖尾矩阵法校正模型应用于 DPC 处于陆地模式下对大口径积分球成像图中漏光拖尾校正的结果.图 9(a)为原始成像图,不含饱和像元值,最大值为 5 830.采用矩阵法校正模型校正结果如图 9(b)、(c)所示,从图中可以看出,漏光拖尾已经被完全校正,像元响应灰度值恢复到背景水平.

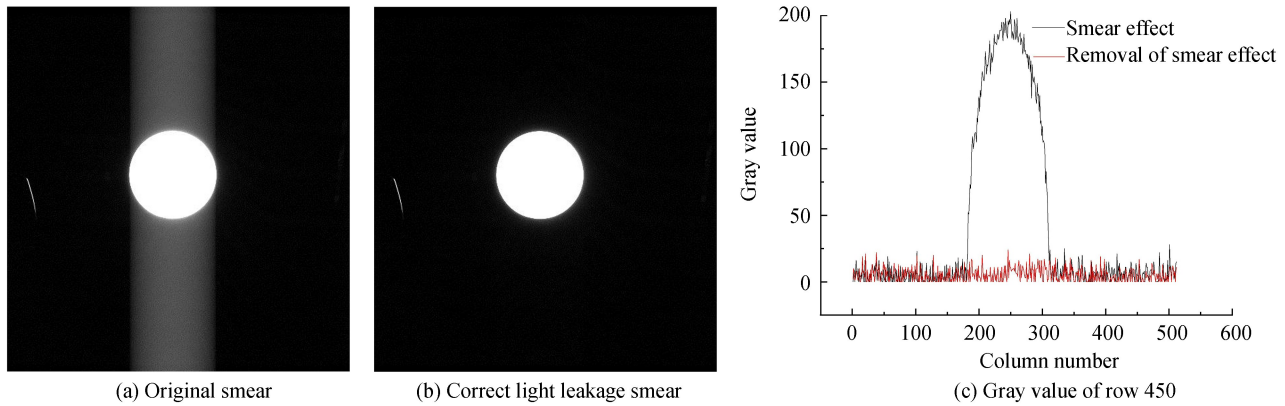


图 9 不含饱和像元时漏光拖尾校正结果

Fig.9 Correction results of light leakage smear without saturated pixels

矩阵法校正模型建立的前提条件是 DPC 采集输出图像所有像元均未出现饱和,且连续帧与帧之间入射光强不会发生明显的变化.当 DPC 采集输出图像出现饱和像元时,像元输出信号不能表征照射到该像元的实际光信号,而是比实际光信号小,因此计算的漏光拖尾值偏小^[20],利用矩阵法校正模型进行漏光拖尾校正时并不能完全消除漏光拖尾的影响.图 10 中,将漏光拖尾矩阵法校正模型应用于 DPC 处于海洋工作模式下对大口径积分球成像图中漏光拖尾校正的结果.图 10(a)为原始成像图,光斑内像元几乎全部都出现饱和.采用矩阵法校正模型校正结果如图 10(b)、(c)所示,从图中可以看出,只校正了部分漏光拖尾,漏光拖尾并没有完全校正.这是因为漏光拖尾的大小由实际照射到 CCD 感光区的光强确定,而采用矩阵法校正模型校正时只能利用图像中的饱和值进行校正,由于饱和值相对于实际信号较小,所以不能完全校正漏光拖尾,因此当图像出现饱和时采用矩阵法校正模型校正时需要恢复饱和像元真实值.

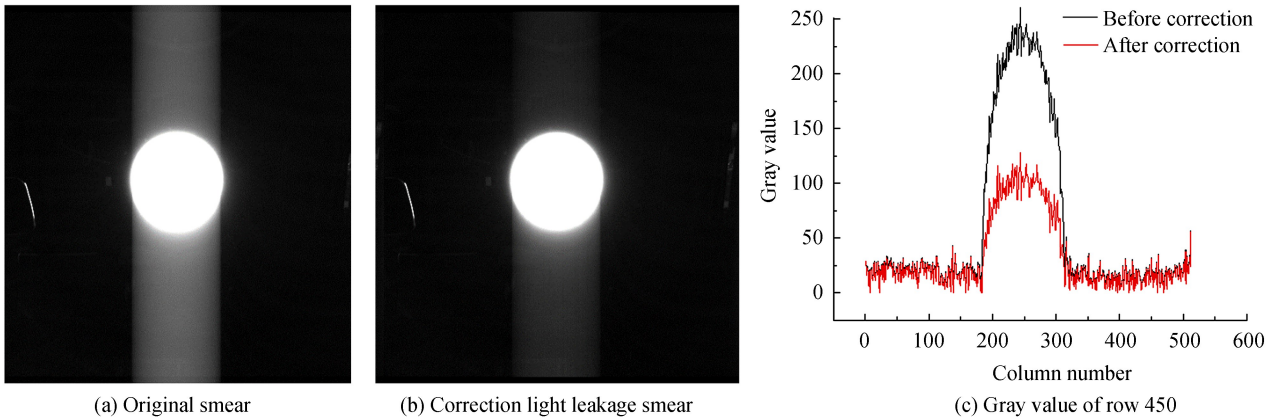


图 10 含饱和像元时漏光拖尾校正结果

Fig.10 Correction results of light leakage smear with saturated pixels

图 11 为采用 POLDER 的基于标准通道恢复饱和像元真实值方法恢复饱和像元真实值后,分别采用暗行法与矩阵法校正模型校正结果图.由图 11(a)~(c)可知,成像光斑上方拖尾已经校正完全,光斑下方遗留部分拖尾未校正;由图 11(b)~(c)可知,两种方法进行拖尾校正后光斑下方还有部分拖尾未校正完全,未校正完全部分可能是由于曝光过程中饱和像元的信号电荷溢出到垂直于 CCD 的同一列相邻像元中与转移过程中饱和像元电荷转移效率降低等造成的^[21].由图 11(d)可知,两种校正方法校正效果相当,说明采用基于标准通道恢复饱和像元真实值的方法同样适用于 DPC.遗留拖尾信号与实际照射到 CCD 感光区的光强有关,需要将饱和像元恢复到真实信号值进行校正.

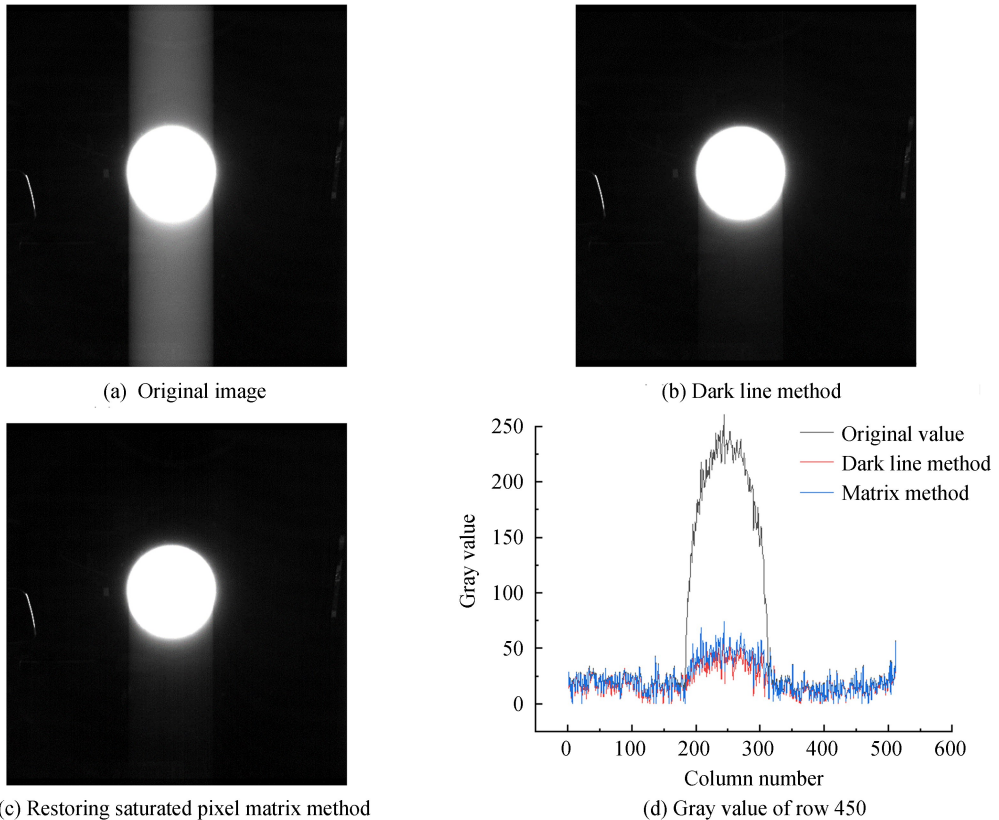


图 11 饱和外推法可行性验证

Fig.11 Feasibility verification of saturated extrapolation method

3.2 DPC 实验室遗留拖尾校正精度分析验证

上一节已经验证了基于标准通道恢复饱和像元是有效可行的,现将基于结合暗行法与矩阵法校正模型推导得到的恢复饱和像元新方法,即 2.2 节中的式(16).将采用本文提出的恢复饱和像元的新方法与基于标

准通道的饱和像元外推法进行饱和像元的恢复,对两种方法恢复结果进行对比,对比结果如图 12 所示.由图 12 可知,采用两种方法恢复饱和像元的结果几乎相同,由此可知本文提出的恢复饱和像元的新方法同样有效可行,但是与基于标准通道的饱和像元外推法相比,本文提出的新方法具有只能恢复同一列所有饱和像元真实值均值的缺点.

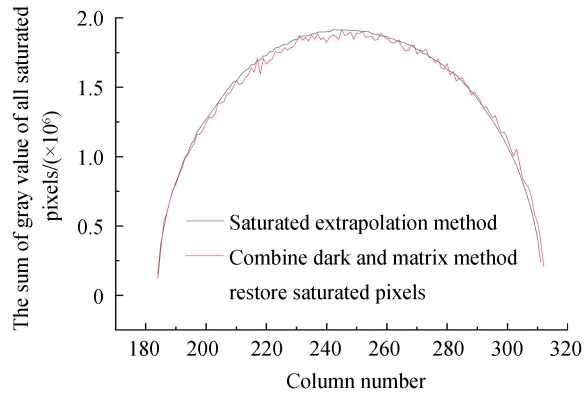


图 12 两种方法恢复饱和像元结果

Fig.12 Results comparison of the two methods to restore saturated pixels

图 13 为采用上述饱和像元遗留拖尾校正模型,即式(14)对图 11(c)中校正漏光拖尾后图像中的遗留拖尾进行校正的结果,从图中可以看出,光斑下方遗留拖尾已校正到背景水平.

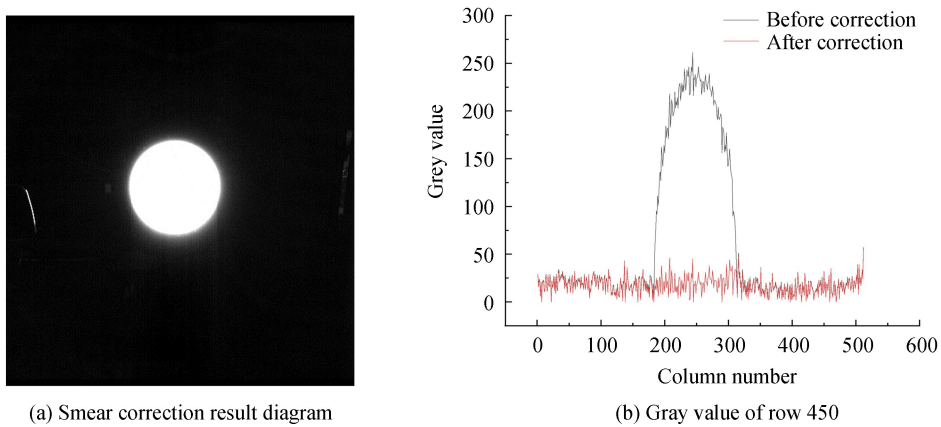


图 13 饱和像元遗留拖尾校正模型校正图 11 光斑下方遗留拖尾后结果

Fig.13 Saturated pixel legacy smear correction model correct legacy smear under figure 11 light spot

3.3 DPC 在轨运行太阳耀斑区的拖尾校正精度分析验证

为了验证上述方法同样也适用于在轨运行时太阳耀斑区的拖尾校正,选取 DPC 发射后在轨运行时的第 716 轨成像数据的第 13 圈通道 14 成像图进行拖尾校正处理.太阳耀斑区拖尾校正前后像元响应灰度值等高线图如图 14 所示.由图 14(a)可知,拖尾校正前图像中的拖尾比较严重,极大地影响了图像质量;图 14(b)为采用本文方法进行拖尾校正后的结果,从图中可以看出图像中拖尾得到了有效的校正.

为了定量地对拖尾校正效果进行评价,使用灰度方差^[22]与平均梯度^[9]来分析校正前后的图像.灰度方差反应的是图像背景灰度起伏情况,灰度方差越小表明灰度的起伏变化越小,也说明算法对拖尾校正的越完全.灰度方差计算公式如式(17)和式(18)所示.

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i \quad (17)$$

$$\delta = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (18)$$

式中, Y_i 为图像中第*i*个像元响应灰度值, n 为图像中像元总数, \bar{Y} 为像元响应灰度值均值, δ 为计算的灰度方差.

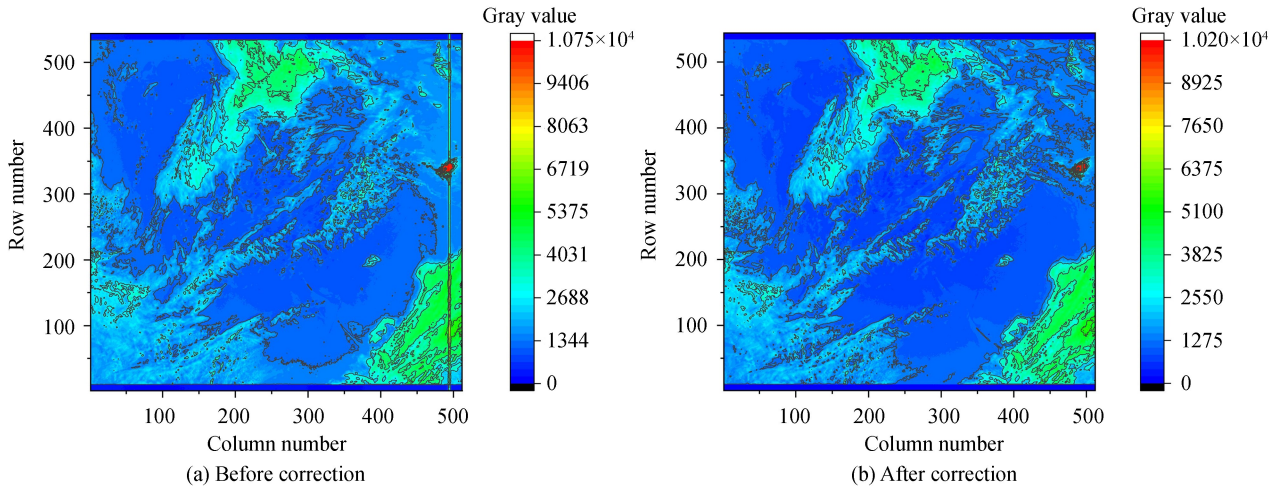


图 14 拖尾校正前后像元响应灰度值等高线图

Fig.14 Gray value contour map of pixel response before and after smear correction

平均梯度可以灵敏地反映图像纹理变化特征,可以用来衡量拖尾区域与图像其他区域在梯度上的变化,平均梯度越小,表明拖尾区域与其他区域过渡越平滑,计算公式如式(19)所示.

$$G = \frac{1}{m \times n} \sqrt{\sum_{x=1}^{m-1} \sum_{y=1}^{n-1} [G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)]} \cdot 1/2 \quad (19)$$

式中, $m \times n$ 为评价拖尾校正效果时选取的评价区域大小, $G_x(x, y)$ 和 $G_y(x, y)$ 分别为图像沿 x 和 y 方向的差分.

选取的评价区域为像元位置序号从(280,480)至(300,510)的局部图像,在此区域内不含拖尾时,像元响应灰度值变化平稳,评价区域像元响应灰度值等高线图如图 15 所示,评价区域像元响应灰度值的灰度方差与平均梯度计算结果如表 1 所示.由图 15 及表 1 可知,校正太阳耀斑区拖尾后图像像元间灰度值过渡更加平滑,图像质量得到极大的改善.

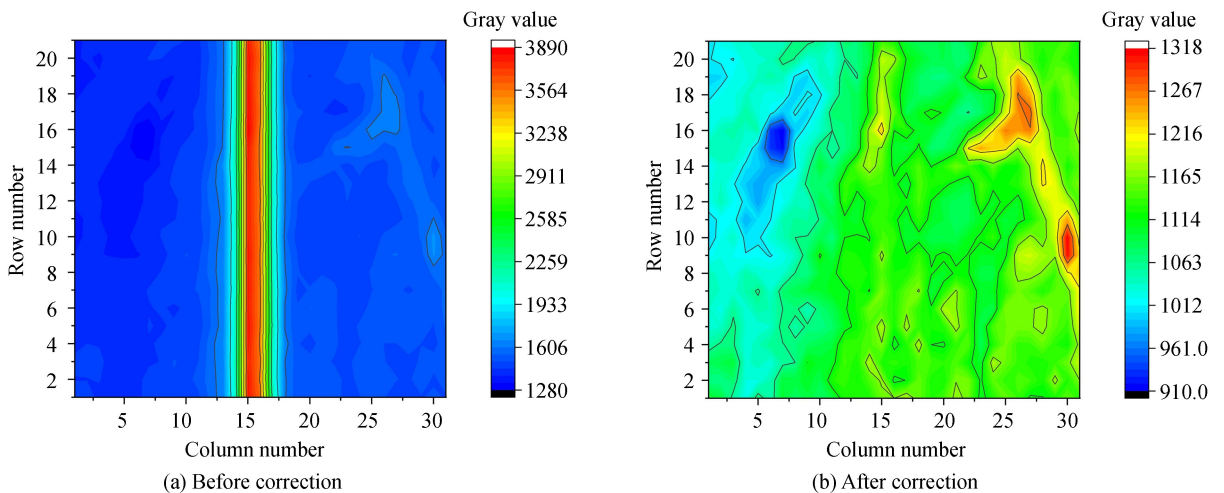


图 15 像元位置序号从(280,480)至(300,510)的局部等高线图

Fig.15 Local contour map of pixel position from (280, 480) to (300,510)

表 1 拖尾校正效果量化评价

Table 1 Quantitative evaluation of smear correction effect

| Parameter | Calibration status | |
|------------------------------------|--------------------|------------------|
| | Before correction | After correction |
| Gray variance/ $\times 10^6$ | 202.69 | 2.32 |
| Average gradient/ $\times 10^{-1}$ | 5.08 | 2.26 |

4 结论

采用帧转移型 CCD 传感器的星载偏振探测载荷对地观测应用时,由于 CCD 传感器固有特性产生的拖尾会影响目标的定量化探测精度.本文以 DPC 为例进行拖尾的校正方法研究,DPC 在轨运行成像图中拖尾主要出现在太阳耀斑区,在太阳耀斑区中弱目标处拖尾甚至高达实际响应的 58%,导致 DPC 对弱目标探测无法完成.本文基于在轨成像时太阳耀斑区漏光拖尾与遗留拖尾校正对恢复太阳耀斑区光斑内饱和像元实际响应值需求,提出了结合矩阵法与暗行法来恢复太阳耀斑区光斑内饱和像元实际灰度值的方法,解决了光斑内像元过饱和时遗留拖尾校正的难题.本文方法可在有效保留弱小目标原始信息的基础上,较好地消除太阳耀斑区拖尾,为类似的采用帧转移型 CCD 传感器的星载偏振探测载荷的拖尾校正提供参考.

参考文献

- [1] WANG Zu-jun, ZHANG Yong, TANG Ben-qi, *et al.* Analysis of experiments on total dose radiation effects on TCD132D linear CCD[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2010, **33**(1): 18-21.
王祖军, 张勇, 唐本奇, 等. TCD132D 线阵 CCD 总剂量效应的实验分析[J]. *电子器件*, 2010, **33**(1): 18-21.
- [2] CAI Rong. The design and research of network camera hardware platform[D]. Zhejiang University, 2006.
蔡荣. 网络摄像机硬件平台的设计与研究[D]. 浙江大学, 2006.
- [3] ZHANG Jian-min, ZHANG Zhen, FENG Guo-bin, *et al.* Estimating method of jamming thresholds for laser irradiated interline transfer CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(3): 0314004.
张检民, 张震, 冯国斌, 等. 行间转移型 CCD 激光干扰效应阈值估算方法[J]. *光学学报*, 2015, **35**(3): 0314004.
- [4] KANG Jian, ZHANG Jie, MENG Jun-min, *et al.* A polynomial fitting method of sun glitter image equalization[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, **40**(6): 36-40.
康健, 张杰, 孟俊敏, 等. 耀斑遥感图像均衡化的多项式拟合方法[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, **40**(6): 36-40.
- [5] ZHANG Zhen, ZHOU Meng-lian, ZHANG Jian-min, *et al.* Entirely saturated unilateral smear of laser spot in CCD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(6): 1351-1353.
张震, 周孟莲, 张检民, 等. CCD 中激光光斑的全饱和和单侧拖尾现象[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(6): 1351-1353.
- [6] POWELL K, CHANA D, FISH D, *et al.* Restoration and frequency analysis of smeared CCD images[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(8): 1343-1347.
- [7] TABEL S, STECHELE W. Fast computation of readout smear correction for framestore CCD based images[C]. 2017 International Conference, 2017.
- [8] SUN Jin-qiu, ZHOU Jun, ZHU Yu, *et al.* Smear removal of CCD camera in astronomic observation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(10): 2526-2532.
孙瑾秋, 周军, 朱宇, 等. 天文观测 CCD 相机中 Smear 效应的消除[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(10): 2526-2532.
- [9] YAO Rui, ZHANG Yan-ning, SUN Jin-qiu, *et al.* Smear removal algorithm of CCD imaging sensors based on wavelet transform in star sky image[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(3): 413-418.
姚睿, 张艳宁, 孙瑾秋, 等. 星图中基于小波变换的 CCD 传感器 Smear 现象消除方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(3): 413-418.
- [10] HAN Y S, CHOI E, KANG M G, *et al.* Smear removal algorithm using the optical black region for CCD imaging sensors[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, **55**(4): 2287-2293.
- [11] HAGOLLE O, GUERRY A, CUNIN L, *et al.* POLDER level-1 processing algorithms[C]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1996, **2758**: 308-319.
- [12] ZHOU Meng-lian, ZHANG Zhen, ZHANG Jian-min, *et al.* Characteristic analysis of entirely saturated unilateral smear in linear CCD[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**(4): 041008.
周孟莲, 张震, 张检民, 等. 线阵 CCD 全饱和和单侧拖尾特性分析[J]. *强激光与粒子束*, 2015, **27**(4): 041008.
- [13] KNOX T. Recovering saturated pixels blurred by CCD image smear[C]. Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2007.
- [14] LI Z, HOU W, HONG J, *et al.* Directional Polarimetric Camera (DPC): Monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, **218**(7): 21-37.
- [15] DAI Hai-shan, WANG Shao-lin, JIANG Tong, *et al.* The research of sun glint observation geometry model for remote sensing satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, **39**(3): 85-93.
代海山, 汪少林, 姜通, 等. 遥感卫星载荷海洋耀斑观测几何模型研究[J]. *航天返回与遥感*, 2018, **39**(3): 85-93.
- [16] HAN Yan-li, LIU Feng, ZHANG Jian, *et al.* Bright line removal algorithm of star-sky image in astronomic observation [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, **40**(8): 47-51.
韩艳丽, 刘峰, 张健, 等. 天文观测星图中亮线的去除方法[J]. *光电工程*, 2013, **40**(8): 47-51.

- [17] WANG Zu-jun, TANG Ben-qi, XIAO Zhi-gang, *et al.* Experimental analysis of charge transfer efficiency degradation of charge coupled devices induced by proton irradiation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(6): 4136-4142.
王祖军,唐本奇,肖志刚,等. 质子辐照电荷耦合器件诱导电荷转移效率退化的实验分析[J]. 物理学报, 2010, **59**(6): 4136-4142.
- [18] HOU Rui, ZHAO Shang-hong, YAO Zhou-shi, *et al.* Radiation characteristics of CCD in satellite optical communication system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **32**(6): 1263-1269.
侯睿,赵尚弘,么周石,等. 卫星光通信系统中 CCD 器件的空间辐射特性研究[J]. 应用光学, 2011, **32**(6): 1263-1269.
- [19] YANG Xiao-hu. Research on smear removing for frame transfer CCD image[J]. *Practical Electronics*, 2014, **19**: 14-15.
杨小虎. 帧转移型 CCD 图像去 smear 效应研究[J]. 电子制作, 2014, **19**: 14-15.
- [20] WENG Jian-wen, YUAN Yin-lin, ZHENG Xiao-bing, *et al.* Research on the calibration method of frame transfer blurring effect of spaceborne polarization camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, **39**(12): 1228005.
翁建文,袁银麟,郑小兵,等. 星载偏振相机帧转移模糊效应校正方法研究[J]. 光学学报, 2019, **39**(12): 1228005.
- [21] SHU Ping. Pixel Modeling and simulation of CCD image sensor[D]. *University of Electronic Science and Technology of China*, 2009.
舒平. CCD 图像传感器像元建模与仿真[D]. 电子科技大学, 2009.
- [22] LIU Lu, LUO Tong-ding, LI Bin-kang, *et al.* Smear correction of asynchronous binning high frame rate CCD camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, **25**(1): 217-223.
刘璐,罗通顶,李斌康,等. 异步 Binning 高帧频 CCD 相机的拖尾校正[J]. 光学精密工程, 2017, **25**(1): 217-223.