

星载偏振相机帧转移模糊效应校正方法研究

翁建文^{1,2}, 袁银麟^{1*}, 郑小兵¹, 康晴¹, 涂碧海¹, 李健军¹, 洪津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, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 帧转移面阵 CCD 相机对高亮目标成像时产生的帧转移模糊效应是影响偏振测量精度的关键因素, 开展帧转移模糊效应的测量和校正方法研究对提高星载偏振相机高精度定量化应用水平具有重要意义。以 GF-5 卫星多角度偏振成像仪(DPC)为例, 介绍了帧转移模糊效应的产生机理及特点, 提出了将帧转移模糊效应分为与光照条件无关的响应差异型帧转移模糊效应和与光照条件有关的拖影型帧转移模糊效应。结合 DPC 在轨成像时帧转移模糊效应的特点, 分别提出了基于矩阵与暗行法的拖影型帧转移模糊效应校正模型和基于暗电流通道的响应差异型帧转移模糊效应校正模型。最后利用积分球验证了响应差异型和拖影型两种类型帧转移模糊效应的最优校正顺序及校正方法的可行性, 同时采用太阳光对 DPC 在轨运行时的帧转移模糊效应校正精度进行验证。实验结果表明, 所提方法将 DPC 帧转移模糊效应对高反射云及太阳耀斑等高亮目标的偏振测量精度的影响由 7.28% 降至 0.43%, 满足 DPC 偏振测量精度优于 2% 的定标要求。

关键词 遥感与传感器; 偏振相机; 帧转移; 模糊效应; 校正精度

中图分类号 TP79

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1228005

Correction Method for Frame-Transfer Blurring Effect of Spaceborne Polarization Camera

Weng Jianwen^{1,2}, Yuan Yinlin^{1*}, Zheng Xiaobing¹,
Kang Qing¹, Tu Bihai¹, Li Jianjun¹, Hong Jin¹

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

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The frame-transfer blurring effect is a key factor that affects the precision of polarization measurement accuracy of highlight-target imaging via a frame-transfer array CCD camera. To improve the precision of spaceborne polarization cameras, it is of great significance to carry out studies on the measurement and correction method of the frame-transfer blurring effect. Considering the GF-5 satellite directional polarization camera (DPC) as an example, this paper investigates the generation mechanism and features of the frame-transfer blurring effect. The frame-transfer blurring effect is divided into the response-difference type, which is unrelated to the light conditions, and the smear type, which depends on the light conditions. To correct the features of the frame-transfer blurring effect in on-orbit imaging by the DPC, two correction models are proposed: the correction model of smear frame-transfer blurring effect based on the matrix and dark line methods, and the correction model of response-difference frame-transfer blurring effect based on the dark current channel. Finally, the optimal correction sequence and the feasibility of correction by the response-difference and smear frame-transfer blurring effects are verified by an integrating sphere. Additionally, the correction accuracy of the frame-transfer blurring effect in the DPC on orbit is verified using sunlight. Experimental results show that the proposed method reduces the influence of the frame-transfer blurring effect in the DPC on the polarization measurement accuracy of highlight targets, such as high reflective cloud and solar flare, from 7.28% to 0.43%, satisfying the calibration requirement that the DPC polarization measurement accuracy is <2%.

Key words remote sensing and sensors; polarization camera; frame transfer; blurring effect; correction accuracy

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-08-02; 录用日期: 2019-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(41605021)、安徽省自然科学基金(1708085QF131)

* E-mail: ylyuan@aiofm.ac.cn

1 引 言

CCD作为一种光电成像器件,因其容量无限及数据可回收,成为遥感成像领域应用最广泛的探测接收器件,其中帧转移面阵 CCD 传感器因具有高灵敏度及无需外加机械快门等优点而得到广泛的应用^[1]。在星载偏振探测技术的应用中,由帧转移 CCD 传感器固有特性产生的帧转移模糊效应^[2],会降低系统的成像质量和影响目标偏振度的探测,当成像目标含有云及海洋耀斑等强反射光源时,甚至会获得错误的偏振信息。因此,针对星载偏振相机多角度偏振成像仪(DPC)偏振测量精度优于2%的偏振探测应用需求^[3],需要对 DPC 成像中的帧转移模糊效应进行校正。

目前,国内外学者针对不同相机搭载的帧转移型 CCD 探测器的不同类型,提出了一系列校正模型^[4-7]。例如, Powell 等^[4]和 Tabel 等^[5]提出了4种 CCD 工作模式下的拖影型帧转移模糊效应校正矩阵表示理论形式。刘璐等^[6]提出了高帧频 CCD 相机在考虑亮度变化情况下的拖影型帧转移模糊效应校正矩阵表示理论形式。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。杨小虎^[7]提出在帧转移时间内下传暗行的方法来解决矩阵法在图像出现饱和时的失效情况,但未考虑电荷转移时形成的响应差异型帧转移模糊效应造成的暗行法失效问题,且未对暗行法与矩阵法的校正精度进行对比验证。在实际的工程应用中,DPC的拖影型帧转移模糊效应校正和响应差异型帧转移模糊效应校正存在先后顺序的问题,根据法国 POLDER 前期研究^[8],一般需要先进行拖影型帧转移模糊效应校正,再进行响应差异型帧转移模糊效应校正,但 DPC 成像输出图像中拖影型帧转移模糊效应存在于高亮目标上下两侧,与 POLDER 成像输出图像中拖影型帧转移模糊效应只存在于高亮目标一侧不同,因此 POLDER 的校正方法不适用于 DPC。

本文结合 GF-5 卫星 DPC 的工作机理及多光谱通道特点,介绍了帧转移模糊效应的产生机理,结合 DPC 在轨成像特点及饱和状态下帧转移模糊效应特点,重点分析了拖影型帧转移模糊效应分别在矩阵法与暗行法模型下的理论推导及数值解析算

法,以及响应差异型帧转移模糊效应的理论模型。利用积分球分别在矩阵法与暗行法下对拖影型帧转移模糊效应和响应差异型帧转移模糊效应的校正结果进行对比,通过分析得到了帧转移模糊效应的最优校正方法及顺序。最后,采用在轨太阳对 DPC 在轨运行时帧转移模糊效应的校正精度进行验证。

2 DPC 帧转移模糊效应的产生机理及特点

DPC 主要由大视场角的光学系统,载有偏振片和光谱滤光片的旋转轮和面阵 CCD 探测阵列三部分构成^[9-11]。DPC 采用帧转移型面阵 CCD 传感器, CCD 探测阵列成像区像元数为 544×512 ,其中暗行像元数为 20×512 。DPC 含有 15 个数据采集通道,其中 9 个通道为偏振测量通道(490, 670, 865 nm 三个波段,每个波段含有 0° 、 60° 及 120° 三个偏振解析角度通道),5 个非偏振测量通道(443, 565, 763, 765, 910 nm 五个波段),以及 1 个用于采集暗电流的暗电流通道。CCD 传感器沿飞行方向连续拍摄成像时,在目标上方某一角度下,通过滤光片及偏振片的转动来获取 14 个通道的辐射测量信号及 1 个通道的暗电流测量信号。

DPC 面阵 CCD 的测量信号输出通过电荷转移来实现, CCD 中的电荷从一个势阱向下一个势阱的转移既不是瞬时的,也不是完全的^[12]。CCD 中电荷转移的非瞬时性导致转移时曝光过程仍在进行,转移过程中受光照影响而产生的附加电荷使输出图像产生拖影型帧转移模糊效应,如图 1(a)所示;同时,转移过程中未受光照影响而产生的附加电荷与移入遮蔽区所用时间有关,由于转移是从面阵 CCD 的最下面一行开始的,目标图像上部分先移入遮蔽区,下部分后移入遮蔽区,目标图像的下部分比上部分受帧转移影响更大,附加的电荷更多,致使目标图像的下部分比上部分响应值更大,且上下部分响应值差异正比于帧转移时间与积分时间的比值^[1],如图 1(b)所示。

DPC 的拖影及响应差异两种帧转移模糊效应导致其成像遥感数据的不准确和遥感图像的失真。为了避免 DPC 两种帧转移模糊效应的影响,需要详细地分析帧转移模糊效应形成原因,并提出解决帧转移模糊效应的方法。响应差异型帧转移模糊

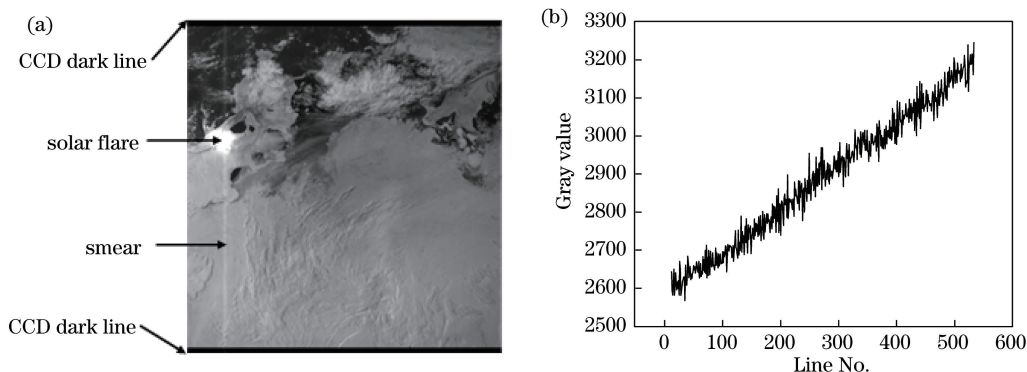


图 1 DPC 帧转移模糊效应。(a)拖影;(b)上下部分响应值差异

Fig. 1 Two types of frame-transfer blurring effect of DPC. (a) Smear; (b) response difference between upper and lower parts

效应与帧转移时间、积分时间的比值及暗电流噪声有关,而与入射光无关,因此可以使用 DPC 特有的暗电流通道进行校正;拖影型帧转移模糊效应不仅与积分时间、行转移时间有关,还与成像目标辐亮度有关,因此需要在实验室条件下,模拟在轨成像时不同积分时间和不同辐亮度等级的拖影型帧转移模糊效应,分析并提出有效的方法来处理拖影型帧转移模糊效应问题。

3 DPC 帧转移模糊效应校正模型

根据 DPC 在轨成像特点,设计 DPC 在轨成像数据帧转移模糊效应校正流程,如图 2 所示,数据处理时以一圈成像数据为一个周期,即将滤光片/偏振片转动一周采集的 15 幅图像数据作为一组数据来处理。由图 2 可知,当成像数据未出现饱和时,根据成像顺序先产生暗电流噪声再产生拖影型帧转移模糊效应噪声,故校正顺序应与之相反,即先采用矩阵法进行拖影型帧转移模糊效应校正,再进行响应差异型帧转移模糊效应校正。当成像数据出现饱和时,采用暗行法校正拖影型帧转移模糊效应,该校正方法的前提是图像中不存在响应差异型帧转移模糊效应,因此应先进行响应差异型帧转移模糊效应校正,再进行拖影型帧转移模糊效应校正,否则将出现校正或欠校正等未知情况。

3.1 DPC 响应差异型帧转移模糊效应表示

因响应差异型帧转移模糊效应与光照产生电荷无关,只与像元位置、行转移时间及曝光时间有关,暗电流通道响应信号可表示为

$$y_{i,j}^{(2)} = a_j \cdot i + b_j, \quad (1)$$

式中, i, j 为图像行序号与列序号, a_j 为与行转移时间及曝光时间有关的第 j 列响应差异比例系

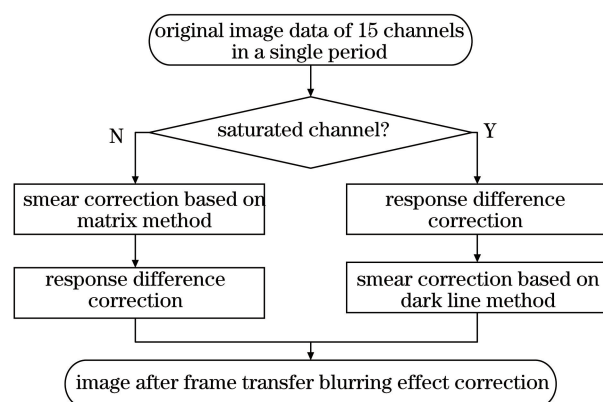


图 2 DPC 在轨成像数据帧转移模糊效应校正流程

Fig. 2 Correction procedure of frame-transfer blurring effect for on-orbit imaging data of DPC

数, b_j 为第 j 列开始进行帧转移时的灰度响应值, $y_{i,j}^{(2)}$ 为暗电流通道 2 第 j 列、 i 行像元响应输出灰度值。

同一个周期内采集的其他通道像元响应灰度值可表示为

$$Y'_{i,j}^{(h)} = y_{i,j}^{(2)} + Y_{i,j}^{(h)}, \quad (2)$$

式中, $Y'_{i,j}^{(h)}$ 为通道 h 第 j 列、 i 行像元响应输出灰度值, $Y_{i,j}^{(h)}$ 为通道 h 第 j 列、 i 行校正响应差异型帧转移模糊效应及暗电流噪声后的像元响应灰度值。

由(1)式及(2)式可知,当未先进行响应差异型帧转移模糊效应校正,而采用暗行法进行拖影型帧转移模糊效应校正时,由响应差异型帧转移模糊效应造成的校正偏差为

$$a_j \cdot |i_1 - i_2|, \quad (3)$$

式中, i_1 为暗行区像元行序号, i_2 为光照区像元行序号。

由(3)式可知,当 $a_j \cdot |i_1 - i_2|$ 不可忽略不计时,采用暗行法进行拖影型帧转移模糊效应校正将得

到错误的结果。对于 DPC 成像数据, $a_j \cdot |i_1 - i_2|$ 无法忽略不计, 因此必须首先对响应差异型帧转移模糊效应进行校正。

3.2 DPC 拖影型帧转移模糊效应表示

假设面阵 CCD 暴露在成像区的像元数量是 $M \times N$ (M 行、 N 列), 若 CCD 不存在拖影型帧转移模糊效应, 成像帧序号为 k , 则 DPC 成像时成像区第 i 行第 j 列 ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$) 像元的灰度理论值为 $Y_{i,j}^{(k)}$; CCD 存在拖影型帧转移模糊效应时, 图像各像元的实际灰度值为 $Y'_{i,j}^{(k)}$, 图像曝光时间为 $t_{\text{integration}}$, 图像移动一行的时间为 t_{shift} ($t_{\text{shift}} \ll t_{\text{integration}}$)。DPC 成像收集的电荷量与曝光时间呈良好线性关系, 因此 i 行前面的像元经过 i 行时会附加 $Y_{i,j}^{(k)} \cdot t_{\text{shift}} / t_{\text{integration}}$ 电荷。令 $\delta = t_{\text{shift}} / t_{\text{integration}}$ 为行移动时间因子, 则 $Y'_{i,j}^{(k)}$ 与 $Y_{i,j}^{(k)}$ 关系为

$$Y'_{i,j}^{(k)} = Y_{i,j}^{(k)} + \delta \sum_{l=i+1}^M Y_{l,j}^{(k)}, \quad (4)$$

式中, l 是计算某一区间内所有像元灰度值之和的临时行序号变量。对于 DPC 在轨连续采集成像, 当前成像采集数据附加电荷不仅与当前帧有关, 还与上一帧有关, 这在高亮积分球成像图中表现为上下同时出现拖影型帧转移模糊效应, 上一帧遗留并附加到当前帧图像数据中的附加电荷输出灰度值, 可表示为

$$S_{i,j}^{(k-1)} = \delta \sum_{l=1}^{i-1} Y_{l,j}^{(k-1)}. \quad (5)$$

联合(4)式和(5)式, 考虑前一帧成像附加电荷时 DPC 成像实际采集信号灰度值可表示为

$$Y'_{i,j}^{(k)} = Y_{i,j}^{(k)} + \delta \sum_{l=1}^{i-1} Y_{l,j}^{(k-1)} + \delta \sum_{l=i+1}^M Y_{l,j}^{(k)}. \quad (6)$$

以矩阵形式表示时, (6)式可表示为

$$\begin{pmatrix} Y'_{1,j}^{(k)} \\ Y'_{2,j}^{(k)} \\ Y'_{3,j}^{(k)} \\ \vdots \\ Y'_{M,j}^{(k)} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \delta & \delta & \cdots & \delta \\ 0 & 1 & \delta & \cdots & \delta \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & \delta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y_{1,j}^{(k)} \\ Y_{2,j}^{(k)} \\ Y_{3,j}^{(k)} \\ \vdots \\ Y_{M,j}^{(k)} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \delta & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \delta & \delta & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta & \delta & \delta & \cdots & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y_{1,j}^{(k-1)} \\ Y_{2,j}^{(k-1)} \\ Y_{3,j}^{(k-1)} \\ \vdots \\ Y_{M,j}^{(k-1)} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

假设成像目标静止且亮度不变, 则可认为当前帧与前一帧成像采集理论值相等, 即

$$Y_{i,j}^{(k-1)} = Y_{i,j}^{(k)}, \quad (8)$$

则 DPC 成像时实际采集信号灰度值可表示为

$$Y'_{i,j}^{(k)} = Y_{i,j}^{(k)} + \delta \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^{i-1} Y_{l,j}^{(k)}, \quad (9)$$

式中, $Y'_{i,j}^{(k)}$ 表示当前帧在 (i, j) 处附加拖影型帧转移模糊效应后的灰度值。

以矩阵形式表示时, (9)式可表示为

$$\begin{pmatrix} Y'_{1,j}^{(k)} \\ Y'_{2,j}^{(k)} \\ Y'_{3,j}^{(k)} \\ \vdots \\ Y'_{M,j}^{(k)} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \delta & \delta & \cdots & \delta \\ \delta & 1 & \delta & \cdots & \delta \\ \delta & \delta & 1 & \cdots & \delta \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta & \delta & \delta & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y_{1,j}^{(k)} \\ Y_{2,j}^{(k)} \\ Y_{3,j}^{(k)} \\ \vdots \\ Y_{M,j}^{(k)} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

由(10)式对矩阵求逆得到拖影型帧转移模糊效应校正后灰度响应值, 即

$$\begin{pmatrix} Y_{1,j}^{(k)} \\ Y_{2,j}^{(k)} \\ Y_{3,j}^{(k)} \\ \vdots \\ Y_{M,j}^{(k)} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \delta_2 & \cdots & \delta_2 \\ \delta_2 & \delta_1 & \delta_2 & \cdots & \delta_2 \\ \delta_2 & \delta_2 & \delta_1 & \cdots & \delta_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_2 & \delta_2 & \delta_2 & \cdots & \delta_1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y'_{1,j}^{(k)} \\ Y'_{2,j}^{(k)} \\ Y'_{3,j}^{(k)} \\ \vdots \\ Y'_{M,j}^{(k)} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

式中,

$$\delta_1 = \frac{1}{1-\delta} \times \left[1 + \frac{\delta}{\delta(1-M)-1} \right], \quad (12)$$

$$\delta_2 = \frac{1}{1-\delta} \times \frac{\delta}{\delta(1-M)-1}. \quad (13)$$

这种方法要求图像在连续采集时帧与帧之间不会发生明显的变化且图像不存在饱和像元, 从而在处理 DPC 实验室定标数据时能够得到有效的拖影型帧转移模糊效应校正效果。

3.3 含饱和像元时拖影型帧转移模糊效应的校正

上述 DPC 拖影型帧转移模糊效应校正模型推导的前提条件是 DPC 采集输出图像所有像元均未出现饱和。当 DPC 采集输出图像出现饱和像元时, 此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, 因此计算的拖影型帧转移模糊效应附加电荷偏小^[13], 利用上述算法进行拖影型帧转移模糊效应校正时并不能完全消除拖影型帧转移模糊效应的影响。

当 DPC 工作在海洋模式时, 在太阳照射下, 大部分成像通道对高亮度的云及海洋耀斑会出现饱和。由于 DPC 成像 CCD 带有暗行, 暗行在 CCD 曝光时不受光照影响, 可认为是完全不存在的^[8], 而在电荷转移输出时经过成像区曝光, 因此暗行中像元信号大小能够反映拖影型帧转移模糊效应信号大

小。由(6)式可知,当 i 处于暗行区时 $Y_{i,j}^{(k)}=0$,则

$$Y'_{i_1,j}{}^{(k)} = \delta \sum_{l=1}^{i_1-1} Y_{l,j}^{(k-1)} + \delta \sum_{l=i_1+1}^M Y_{l,j}^{(k)}。 \quad (14)$$

当 i 处于光照区时 $Y_{i,j}^{(k)} \neq 0$,则

$$Y'_{i_2,j}{}^{(k)} = Y_{i_2,j}^{(k)} + \delta \sum_{l=1}^{i_2-1} Y_{l,j}^{(k-1)} + \delta \sum_{l=i_2+1}^M Y_{l,j}^{(k)}。 \quad (15)$$

由(14)式和(15)式可得:

$$Y'_{i_2,j}{}^{(k)} - Y'_{i_1,j}{}^{(k)} = Y_{i_2,j}^{(k)} - \delta Y_{i_2,j}^{(k)} + \delta \sum_{l=i_1+1}^{i_2-1} [Y_{l,j}^{(k-1)} - Y_{l,j}^{(k)}]。 \quad (16)$$

当光照条件变化忽略不计时, $Y_{l,j}^{(k-1)} - Y_{l,j}^{(k)} \approx 0$,则(16)式可表示为

$$Y'_{i_2,j}{}^{(k)} - Y'_{i_1,j}{}^{(k)} = (1 - \delta)Y_{i_2,j}^{(k)} \approx Y_{i_2,j}^{(k)}。 \quad (17)$$

DPC 的动态范围上限灰度值为 9500,在动态范围上限处,DPC 处于陆地工作模式时 $\delta Y_{i_2,j}^{(k)} = 2.8$ 、 $1 - \delta = 0.9997$,DPC 处于海洋模式工作时 $\delta Y_{i_2,j}^{(k)} = 0.9$ 、 $1 - \delta = 0.9999$,最大偏差不到真实响应值的 0.03%。因此,将暗行像元响应值作为 DPC 拖影型帧转移模糊效应来进行饱和和像元所在列的拖影型帧转移模糊效应的校正可以得到令人满意的结果,但还需考虑当输出图像出现饱和时,这种偏差也随之增大。

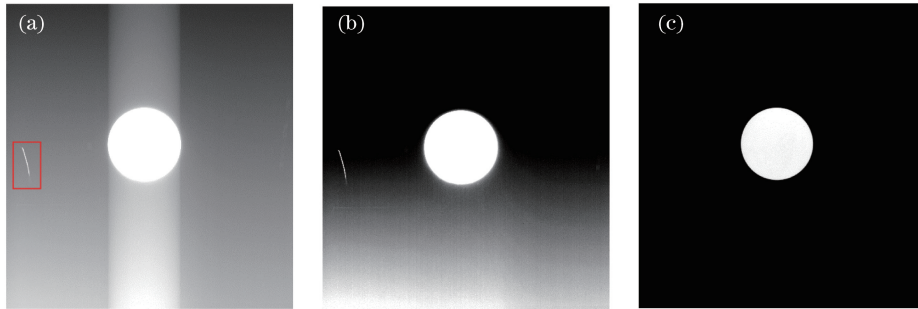


图 3 采用暗行法校正帧转移模糊效应且校正顺序为先校正拖影、后校正响应差异时的结果图。(a)积分球原始成像图; (b)校正拖影型帧转移模糊效应;(c)校正响应差异型帧转移模糊效应

Fig. 3 Results of frame-transfer blurring effect corrected by dark line method with correction sequence of smear type first and then response-difference type. (a) Original imaging of integral sphere; (b) correction of smear frame-transfer blurring effect; (c) correction of response-difference frame transfer blurring effect

其次,针对拖影型帧转移模糊效应,对采用矩阵法校正时的两种帧转移模糊效应校正顺序进行验证。当校正顺序为先校正拖影型帧转移模糊效应,后校正响应差异型帧转移模糊效应时,结果如图 5 所示。当校正顺序为先校正响应差异型帧转移模糊效应,后校正拖影型帧转移模糊效应时,结果如图 6 所示。从图 5 和图 6 可以看出,当拖影型帧转移模糊效应采用矩阵法校正时,响应差异型帧转移模糊效应与拖影型帧转移模糊效应的校正顺序对校

4 实验结果与分析

4.1 帧转移模糊效应校正顺序分析验证

当拖影型帧转移模糊效应分别采用暗行法与矩阵法校正时,拖影型与响应差异型两种类型帧转移模糊效应的校正顺序不同。对帧转移模糊效应的校正顺序分析验证如下。

首先,针对拖影型帧转移模糊效应,对采用暗行法校正时两种帧转移模糊效应的校正顺序进行验证,验证数据采用模拟在轨工作状态下采集的积分球成像未饱和数据。当校正顺序为先校正拖影型帧转移模糊效应,后校正响应差异型帧转移模糊效应时,结果如图 3 所示。由图 3 可知,在该校正顺序下,原始图响应较小的日光灯成像完全消失,出现过校正现象。当校正顺序为先校正响应差异型帧转移模糊效应,后校正拖影型帧转移模糊效应时,结果如图 4 所示。由图 4 可知,在该校正顺序下,图 3 中原始图响应较小的日光灯成像依然存在。由此可知,对拖影型帧转移模糊效应采用暗行法进行校正时,最优帧转移模糊效应校正顺序为先进进行响应差异型帧转移模糊效应校正,后进行拖影型帧转移模糊效应校正。

正结果影响较小,两种顺序校正后灰度均值差在 1 以内。

综上所述,当拖影型帧转移模糊效应采用暗行法校正时,应先进进行响应差异型帧转移模糊效应校正,后进行拖影型帧转移模糊效应校正;当拖影型帧转移模糊效应采用矩阵法校正时,响应差异型帧转移模糊效应与拖影型帧转移模糊效应的校正顺序对校正结果影响较小,校正顺序可选择先进行拖影型帧转移模糊效应校正,后进行响应差异型帧

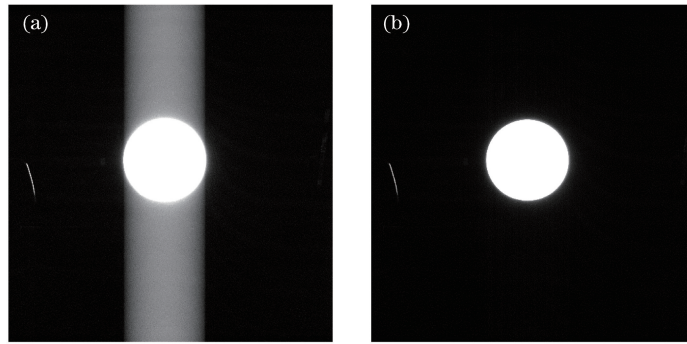


图 4 采用暗行法校正帧转移模糊效应且校正顺序为先校正响应差异、后校正拖影时的结果图。

(a)校正响应差异型帧转移模糊效应;(b)校正拖影型帧转移模糊效应

Fig. 4 Results of frame-transfer blurring effect corrected by dark line method with correction sequence of response-difference type first and then smear type. (a) Correction of response-difference frame-transfer blurring effect; (b) correction of smear frame-transfer blurring effect

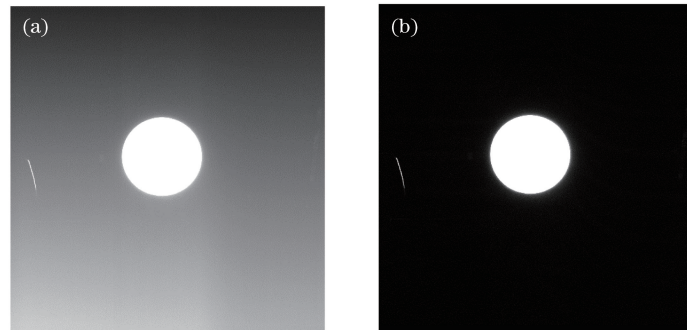


图 5 采用矩阵法校正帧转移模糊效应且校正顺序为先校正拖影、后校正响应差异的结果图。

(a)校正拖影型帧转移模糊效应;(b)校正响应差异型帧转移模糊效应

Fig. 5 Results of frame-transfer blurring effect corrected by matrix method with correction sequence of smear type first and then response-difference type. (a) Correction of smear frame-transfer blurring effect; (b) correction of response-difference frame transfer blurring effect

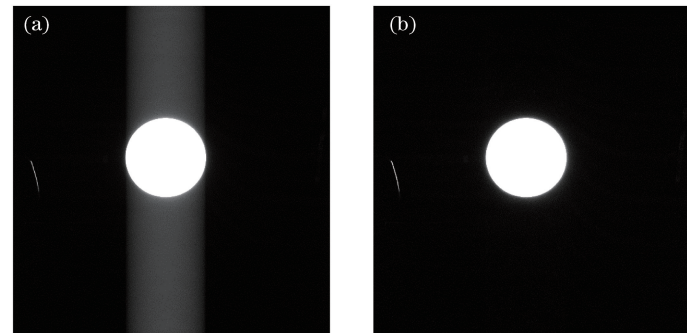


图 6 采用矩阵法校正帧转移模糊效应且校正顺序为先校正响应差异、后校正拖影的结果图。

(a)校正响应差异型帧转移模糊效应;(b)校正拖影型帧转移模糊效应

Fig. 6 Results of frame-transfer blurring effect corrected by matrix method with correction sequence of response-difference type first and then smear type. (a) Correction of response-difference frame-transfer blurring effect; (b) correction of smear frame-transfer blurring effect

转移模糊效应校正,下文中结果均采用上述顺序进行校正。

4.2 响应差异型帧转移模糊效应的分析验证

由 4.1 节可知,响应差异型帧转移模糊效应作

为主要的帧转移模糊效应之一,其校正精度影响着最终帧转移模糊效应结果,特别是当拖影型帧转移模糊效应采用暗行法校正时,若未正确进行响应差异型帧转移模糊效应校正,将得到错误的校正结果。

采用 DPC 分视场下积分球成像拼接图像数据进行验证,图 7(a)为分视场成像拼接后全视场覆盖图,图 7(b)为暗电流通道成像图、分视场成像拼接图及响应差异型帧转移模糊效应校正图中心第 256 列灰度响应曲线图。

从图 7 可以看出,未校正响应差异型帧转移模糊效应时,成像通道及暗电流通道与 CCD 行序号呈线性关系,且斜率均为 1.14;校正响应差异型帧转移模糊效应后,成像通道斜率为 0.00。由此可知,响应差异型帧转移模糊效应与光照条件无关,采用暗电

流通道即可完全校正。

4.3 拖影型帧转移模糊效应的分析验证

4.3.1 未饱和时拖影型帧转移模糊效应校正精度的分析验证

首先,对未饱和成像数据进行拖影型帧转移模糊效应校正,为保证结果对比明显,采用积分球内开 64 灯状态并将 DPC 工作模式设置成陆地模式,对 DPC 通道 14 的成像数据进行对比验证,分别采用暗行法与矩阵法及 4.1 节校正顺序进行校正,校正结果如图 8 所示。

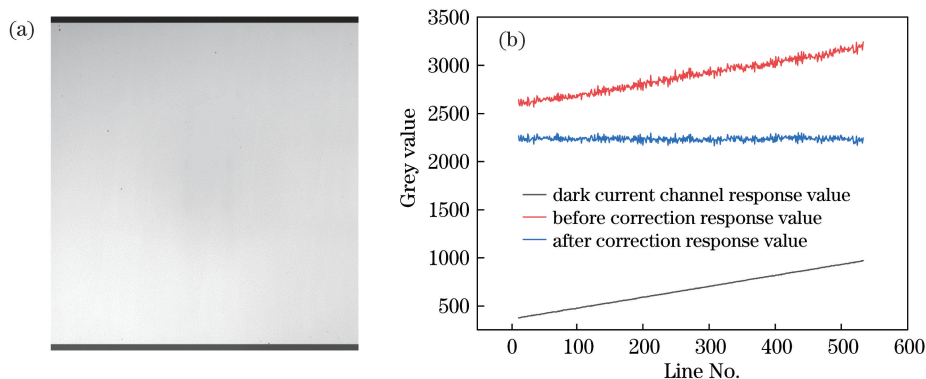


图 7 响应差异型帧转移模糊效应校正结果。(a)积分球分视场成像拼接图;(b)响应差异型帧转移模糊效应校正
Fig. 7 Correction result of response-difference frame-transfer blurring effect. (a) Imaging mosaic of integral sphere in field-of-view; (b) correction of response-difference frame-transfer blurring effect

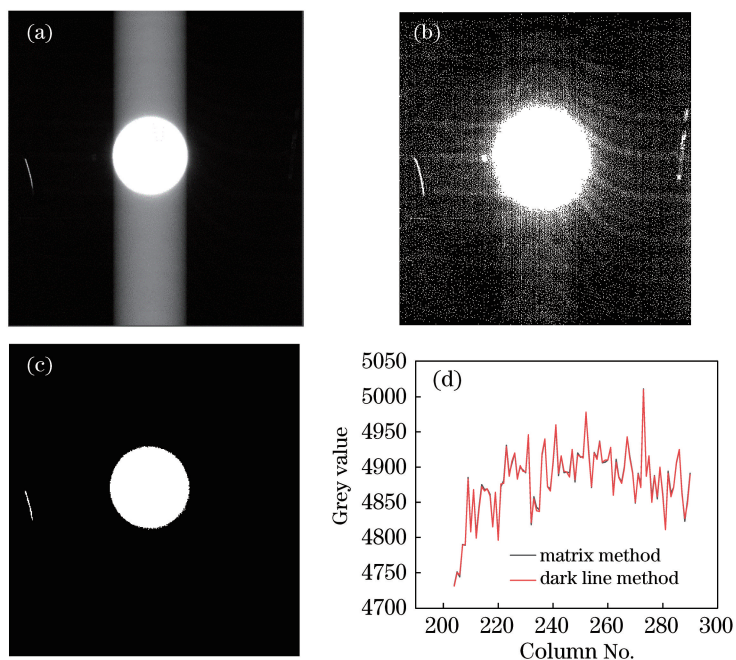


图 8 未饱和成像数据拖影型帧转移模糊效应校正精度的对比验证。(a)原始拖影型帧转移模糊效应;
(b)暗行法模型校正;(c)矩阵法模型校正;(d)光斑内第 210 行灰度值曲线

Fig. 8 Comparison and verification of correction accuracy of smear frame-transfer blurring effect for unsaturated imaging data. (a) Original smear frame-transfer blurring effect; (b) correction by dark line method; (c) correction by matrix method; (d) gray-value curve of line 210 in spot

由图 8 可知,暗行法与矩阵法都能很好地对拖影型帧转移模糊效应进行校正,且矩阵法校正后的灰度值比暗行法校正后的灰度值略大。定量化表征校正精度时,采用图 8(d)中数据进行均值计算,暗行法和矩阵法校正后均值分别为 4879.79 和 4880.43,理论均值为 4881.23,由此可知,采用暗行法和矩阵法校正时灰度值偏差分别为 1.44 和 0.80,矩阵法校正精度更高。

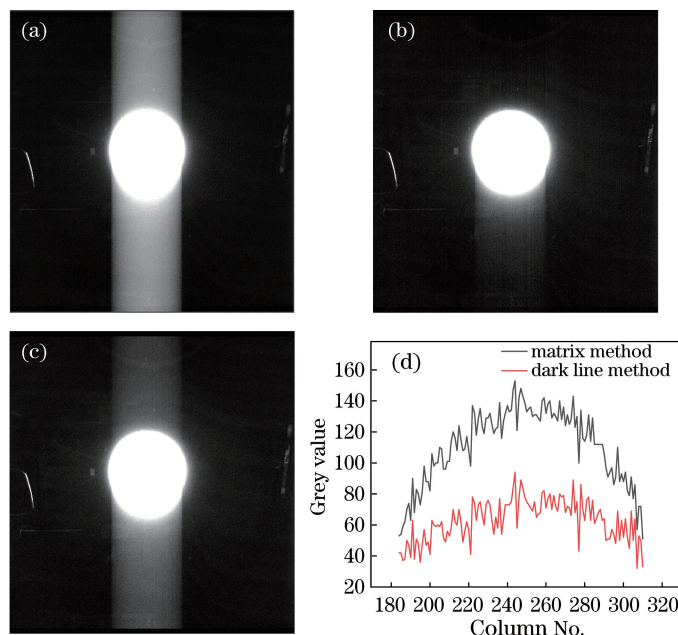


图 9 饱和成像数据拖影型帧转移模糊效应校正精度的对比验证。(a)原始拖影型帧转移模糊效应;

(b)暗行法模型校正;(c)矩阵法模型校正;(d)光斑下方 380 行灰度值曲线

Fig. 9 Comparison and verification of correction accuracy of smear frame-transfer blurring effect for saturated imaging data.

(a) Original smear frame-transfer blurring effect; (b) correction by dark line method; (c) correction by matrix method; (d) gray-value curve of line 380 beneath spot

由图 9 中拖影型帧转移模糊效应校正结果可知,两种方法在图像出现大量饱和情况下都不能对拖影型帧转移模糊效应进行有效校正。由图 9(b)暗行法校正结果可知,当光斑图像全像元饱和时,校正后从光斑到尾端的遗留拖影由粗变细,且主要存在于光斑一侧,这与转移过程中光照影响产生的拖影型帧转移模糊效应特点不符。这是由于积分球的高亮度,信号电荷数密度特别大,从而产生信号电荷溢出^[14]与转移损失拖影^[15],其校正方法尚待进一步研究。因此,当整体灰度响应值较大时,简单地减去暗行均值并不能完全校正拖影型帧转移模糊效应噪声。由图 9(c)矩阵法校正结果可知,光斑上下拖影依然存在,图像出现大量饱和时采用矩阵法无法校正拖影型帧转移模糊效应。由图 9(d)可知,在积分球光斑下方 380 行处,暗行法与矩阵法的遗留拖

4.3.2 饱和时拖影型帧转移模糊效应校正精度的分析验证

当对饱和成像数据进行拖影型帧转移模糊效应校正时,为保证结果对比明显,采用积分球内开 64 灯状态并将 DPC 工作模式设置成海洋模式,对 DPC 成像的通道 14 成像数据进行对比验证,同样利用两种校正模型分别对成像数据进行处理,校正结果如图 9 所示。

影型帧转移模糊效应最大值分别为 94 与 153。

4.4 在轨运行帧转移模糊效应的校正精度

DPC 帧转移模糊效应的存在造成了附加能量的产生。在轨运行成像时不存在无光照的暗目标,校正前后,无法获取准确的附加帧转移模糊效应来定量地评价图像校正效果。但可以通过对比校正前后的偏振度图像进行评价。图 10 为 2018 年 6 月 24 日 655 轨数据第 79 圈内 490 nm 波段经过帧转移模糊效应校正前后的偏振度计算结果图。可以看出,由于帧转移模糊效应,均匀变化区域偏振度突变的现象已经消失,帧转移效应校正效果良好。

对图 10 中校正前后的偏振度成像图,分别获取其沿轨方向的一行中前 200 列平稳变化区域的偏振度相对值变化曲线,如图 11 所示。

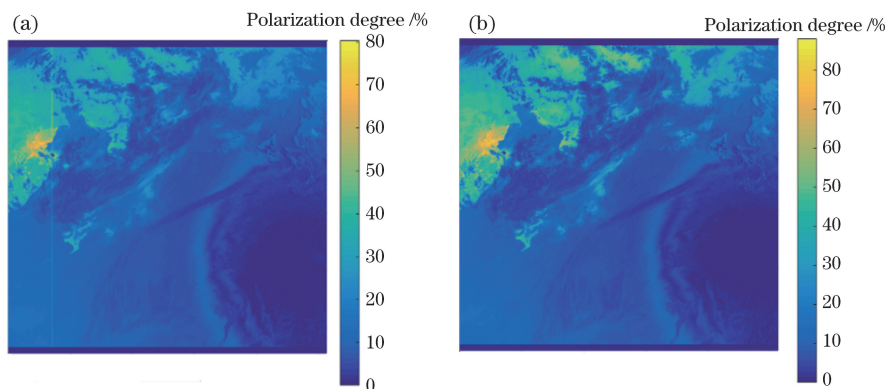


图 10 帧转移模糊效应校正前后的偏振度图。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 10 Polarization images before and after correction of frame-transfer blurring effect.

(a) Before correction; (b) after correction

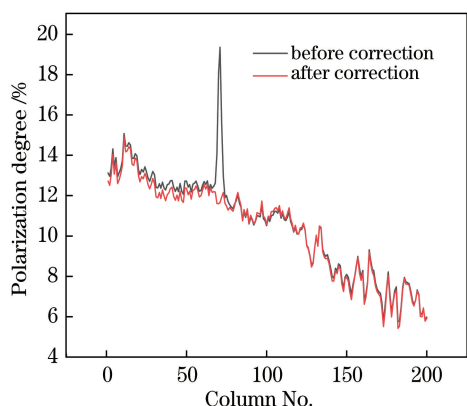


图 11 校正前后沿轨方向偏振度的相对值变化

Fig. 11 Variation of relative value of polarization degree along orbit before and after correction

表 1 与表 2 分别为 DPC 在轨运行时帧转移模糊效应校正前后非耀斑区与耀斑区偏振度的校正效果。由图 11,表 1 和表 2 可知,帧转移模糊效应所在列区域在沿轨方向上的数值本应是均匀平稳变化,但由于帧转移模糊效应的影响,校正前后非耀斑所在列偏振度均值由 13.00%变为 12.66%,存在 0.34%的变化。从平稳变化角度看,耀斑区校正前后的偏振度偏差分别为 7.28%和 0.43%。由此可

表 2 DPC 在轨运行帧转移模糊效应校正前后耀斑区偏振度的校正效果

Table 2 Correction result of polarization degree in flare region before and after correction of frame-transfer blurring effect of on-orbit DPC

Correction state	Theoretical polarization degree /%	Actual polarization degree /%	Polarization degree deviation /%
Before correction	12.08	19.36	7.28
After correction	12.08	11.65	0.43

知,当成像列未出现高亮目标时,帧转移模糊效应对偏振度结果的影响在 0.34%左右,当成像目标列出现高反射云及太阳耀斑等高亮目标时,帧转移模糊效应对偏振度结果影响可高达 7.28%。从以上定量分析结果可以看出,当成像区域未出现高亮目标时,帧转移模糊效应对偏振度计算结果的影响可忽略不计;当成像区域出现高亮目标时,帧转移模糊效应对偏振度计算结果的影响无法忽略不计,必须进行帧转移模糊效应校正。通过本文方法对帧转移模糊效应校正后,图像偏振度变化平稳,未出现突变现象,偏振度偏差最大值由 7.28%降至 0.43%,满足 DPC 偏振度偏差优于 2%的偏振测量精度要求。

表 1 DPC 在轨运行帧转移模糊效应校正前后非耀斑区偏振度的校正效果

Table 1 Correction result of polarization degree in non-flare region before and after correction of frame-transfer blurring effect of on-orbit DPC

Polarization degree /%		Polarization degree deviation /%
Before correction	After correction	
13.00	12.66	0.34

5 结 论

星载偏振相机对高亮目标成像时,帧转移模糊

效应是影响其偏振测量精度的重要因素,研究星载偏振相机帧转移模糊效应的校正方法对其定量应用水平具有重要意义。本文以 GF-5 卫星多角

度偏振成像仪(DPC)为例,通过分析 DPC 帧转移模糊效应的产生机理,提出了将帧转移模糊效应分为与光照条件无关的响应差异型帧转移模糊效应及与光照条件有关的拖影型帧转移模糊效应。结合 DPC 在轨成像特点及饱和状态下帧转移模糊效应特点,给出了响应差异型帧转移模糊效应的校正方法以及拖影型帧转移模糊效应的矩阵法与暗行法校正模型的理论推导及数值解析算法。最后,采用积分球验证了响应差异型和拖影型帧转移模糊效应的最优校正顺序,同时采用太阳光验证了 DPC 在轨运行时帧转移模糊效应校正方法的校正精度。

实验结果表明:当拖影型帧转移模糊效应采用暗行法校正时,最优校正顺序为先进行响应差异型帧转移模糊效应校正,后进行拖影型帧转移模糊效应校正;当拖影型帧转移模糊效应采用矩阵法校正时,两者校正顺序对校正结果影响较小。对未饱和图像进行拖影型帧转移模糊效应校正时,采用暗行法和矩阵法校正时灰度值偏差分别为 1.44 和 0.80,矩阵法校正具有更高精度;在图像饱和情况下,暗行法模型校正效果优于矩阵法模型校正效果。DPC 在轨运行时,对高反射云及太阳耀斑等高亮目标的帧转移模糊效应校正后,偏振度测量值偏差由 7.28% 降至 0.43%,说明该校正方法能够明显降低帧转移模糊效应引起的附加灰度均值水平,有效抑制成像过程中的帧转移模糊效应,减小了帧转移模糊效应引起的误差。本文设计的帧转移模糊效应方法可为 DPC 在轨数据产品提供有效的理论依据和数据支持且易于软件化实现,为类似帧转移面阵 CCD 型相机的帧转移模糊效应校正提供参考。

参 考 文 献

- [1] Liu T J. Techniques and applications research on airborne multispectral digital camera system[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2002: 19-25.
刘团结. 航空多光谱数字相机系统关键技术及应用研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2002: 19-25.
- [2] Yao R, Zhang Y N, Sun J Q, *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.
- [3] Kang Q. Research on system-level radiometric and polarized calibration methods in laboratory of polarization remote sensors[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018: 11-12.
康晴. 偏振遥感器实验室系统级辐射与偏振定标方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 11-12.
- [4] Powell K, Chana D, Fish D, *et al.* Restoration and frequency analysis of smeared CCD images[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(8): 1343-1347.
- [5] Tabel S, Stechele W. Fast computation of readout smear correction for framestore CCD based images [C]//Proceedings of the 2017 International Conference on Computer Graphics and Digital Image Processing-CGDIP'17, July 2-4, 2017, Prague, Czech Republic. New York: ACM, 2017: 18.
- [6] Liu L, Luo T D, Li B K, *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.
- [7] Yang X H. 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.
- [8] Hagolle O, Guerry A, Cunin L, *et al.* POLDER level-1 processing algorithms[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2758: 308-319.
- [9] Yuan Y L, Kang Q, Weng J W, *et al.* High-precision radiometric calibration of directional polarization camera[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(1): 24-35.
袁银麟, 康晴, 翁建文, 等. 多角度偏振成像仪高精度辐射定标方法[J]. *大气与环境光学学报*, 2019, 14(1): 24-35.
- [10] Kang Q, Yuan Y L, Weng J W, *et al.* System-level polarized calibration methods in laboratory of directional polarization camera[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2019, 14(1): 36-48.
康晴, 袁银麟, 翁建文, 等. 多角度偏振成像仪系统级偏振定标方法研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2019, 14(1): 36-48.
- [11] Li Z Q, Hou W Z, 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: 21-37.
- [12] Dong L, Li T. Research of CCD imaging model and simulation system based on Matlab/simulink[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(14): 4520-4523, 4527.

- 董龙, 李涛. CCD 成像模型及仿真系统研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(14): 4520-4523, 4527.
- [13] Huang Y. Research on correction algorithm of CCD image smear with saturated pixels[J]. Computer Knowledge and Technology, 2014, 10(35): 8520, 8526.
- 黄煜. 带有饱和像素的 CCD 图像拖尾修正算法研究[J]. 电脑知识与技术, 2014, 10(35): 8520, 8526.
- [14] Zhang J M, Zhang Z, Feng G B, *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.
- [15] Zhang Z, Zhou M L, Zhang J M, *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单侧拖尾现象[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(6): 1351-1353.