

引用格式: TU Bi-hai, YAO Ping-ping, MENG Bing-huan, *et al.* Research on Non-uniformity Correction of Detector for Directional Polarimetric Camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(9):0911002

涂碧海, 姚萍萍, 孟炳寰, 等. 多角度偏振成像仪探测器非均匀性校正研究[J]. 光子学报, 2020, 49(9):0911002

# 多角度偏振成像仪探测器非均匀性校正研究

涂碧海<sup>1,2,3</sup>, 姚萍萍<sup>1,3</sup>, 孟炳寰<sup>1,3</sup>, 翁建文<sup>1,2,3</sup>, 黄禅<sup>1,2,3</sup>, 洪津<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

(2 中国科学技术大学, 合肥 230026)

(3 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031)

**摘 要:** 像面非均匀性与镜头、探测器组件、空间杂散光、温漂等多种因素相关, 单一方法无法有效区分误差源, 需逐一校正, 针对偏振成像仪通过积分时间调整的在轨工作模式, 研究基于多参量校正补偿的探测器非均匀性校正方法. 通过探测器综合测试设备, 获取温度、暗电流、曝光时间、光谱响应率等敏感因素数据, 经过暗电流、帧转移效应、温度补偿和环境参量的校正, 对探测器非均匀性进行多点法校正, 消除了像面低频不均衡响应差异和邻域高频差异. 实验表明, 95% 满阱单帧数据像元响应不一致性由 1.141% 降至 0.513%, 校正后数据噪声表现为散粒噪声, 校正后有好的动态范围调节能力和线性度, 基于多参量的非均匀性校正方法为仪器的定标校正和在轨快速计算提供了数据支撑, 为后续偏振遥感仪器提供有效参考.

**关键词:** 偏振成像仪; 电荷耦合器件; 多参量校正法; 成像非均匀性; 曝光时间

中图分类号: TH386.5

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204909.0911002

## Research on Non-uniformity Correction of Detector for Directional Polarimetric Camera

TU Bi-hai<sup>1,2,3</sup>, YAO Ping-ping<sup>1,3</sup>, MENG Bing-huan<sup>1,3</sup>, WENG Jian-wen<sup>1,2,3</sup>,  
HUANG Chan<sup>1,2,3</sup>, HONG Jin<sup>1,3</sup>

(1 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science,  
Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

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

(3 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The image non-uniformity is related to many factors such as lens, detector assembly, spatial stray light, etc. The single correction method can not distinguish the error source effectively. In view of the on orbit working mode of polarization imager based on integral time adjustment, the non-uniformity correction method of detector based on multi parameters is studied. Through the comprehensive test equipment of CCD detector, the datas of sensitive factors such as temperature, dark current, exposure time and spectral response are obtained. After a series of preprocessing of the image including removal of darkness signal, removal of smearing effect and temperature compensation, the low-frequency unbalanced

**基金项目:** 高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(No.30-Y20A19-9007-15/17), 高分专项(民用部分)卫星应用共性关键技术项目(No.50-Y20A38-0509-15/16)

**第一作者:** 涂碧海(1977—), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要研究方向为偏振遥感仪器定标与检测. Email: tubihai@aiofm.ac.cn

**导师:** 洪津(1969—), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为光谱偏振遥感技术和航天遥感工程技术. Email: hongjin@aiofm.ac.cn

**通讯作者:** 姚萍萍(1985—), 女, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为偏振遥感相机成像技术和光电子技术. Email: ppyao@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2020-04-10; **录用日期:** 2020-06-24

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

response difference of the image surface is eliminated, and the high-frequency difference is effectively suppressed. The experimental results show that the photo response non-uniformity of 95% full well single frame data is reduced from 1.141% to 0.513%. After correction, the data noise is shown as shot noise. After correction, the detector has good dynamic range adjustment ability and linearity. The non-uniformity correction method based on multi parameters is used to provide data support for calibration correction and on orbit fast calculation of the instrument, and provide effective reference for the following polarization remote sensing instruments.

**Key words:** Polarization imaging camera; Charge coupled device; Multi-parameters correction; Imaging non-uniformity; Integration time

**OCIS Codes:** 120.5410; 120.4640; 040.1520; 230.0250

## 0 引言

多角度偏振成像仪(Directional Polarimetric Camera, DPC)用于获取全球的大气气溶胶和云性质参数,通过广角镜头获取偏振辐射空间分布信息,一天内的观测数据基本覆盖全球,多角度、多光谱偏振信息可用于提高不同下垫面情况的气溶胶、云参数确定能力<sup>[1-3]</sup>。

偏振成像仪通过大视场进行数据获取,多角度偏振信息能反映目标偏振双向分布<sup>[4,5]</sup>,遥感图像的辐射响应非均匀性影响多角度数据的准确性,相关探测器、光学镜头、滤光片和空间杂散光等多种因素,需经过多种校正。首先需要对探测器各项性能进行测试及筛选,完成探测器组件非均匀性测试及校正。整机非均匀性校正在辐射定标中完成,包括空间杂散光的校正<sup>[6]</sup>,相对辐射校正和偏振通道响应非一致性的校正<sup>[7]</sup>等。在轨测试及气溶胶、云产品结果显示满足设计指标<sup>[8]</sup>。

探测器线性度测量有两种方式:1)基于外部变化,改变外部光源如积分球的亮度<sup>[9,10]</sup>,测试响应数据的变化,计算线性度;2)基于内部变化,改变内部增益如积分时间<sup>[11,12]</sup>,测试同一光源条件下响应数据的变化。偏振成像仪在轨运行主要有陆地模式、海洋模式和自定义模式,根据遥感探测目标选择相应的模式,通过调整积分时间,适应动态范围的变化。以此为依据,实验室开展了基于积分时间变化的线性度测试,不同光源亮度下的线性度测试在整机阶段完成。

对于线性良好的探测器通常采用基于线性拟合的两点法、多点法等数学方法进行非均匀性校正<sup>[9-11,13]</sup>,对于非线性器件,除采用多线段校正外,还采用了神经网络参数训练法校正<sup>[12]</sup>,以及基于建模方式的非均匀性校正方法<sup>[14]</sup>。本文通过偏振成像仪辐射响应模型,分析探测器组件对数据的影响,以及探测器组件的噪声源组成,经过多参量补偿校正后,线性良好,选择多点线性拟合进行非均匀性校正。

首先介绍多角度偏振成像仪的测量原理,从偏振辐射模型分析探测器影响。通过探测器组件组成和噪声源,研究像元响应不一致性(Photo Response Non-Uniformity, PRNU)校正流程。成像仪探测器非均匀性体现在高频和低频两个方面,高频差异体现在相邻像素点间的快速变化,低频差异体现在不同视场区域的整体缓慢变化。本文通过实验室新研制的探测器综合测试系统,分析了影响非均匀校正的暗电流、帧转移效应、温度漂移引起的光谱响应变化,消除多参量影响因素后,探测器呈现良好线性。多点法校正消除了像面低频不平衡响应差异和邻域高频响应差异,95%满阱单帧数据的 PRNU 由 1.141% 降至 0.513%,单帧数据校正后主要噪声表现为散粒噪声,10组单帧数据平均后进行校正,则 PRNU 可降至 0.1% 以内。探测器非均匀性噪声、帧转移效应、暗电流、温度漂移影响均得到校正,满足多角度探测的需求。

## 1 偏振测量原理与探测器影响分析

偏振成像仪采用广角镜头设计,分时测量实现多角度探测,成像系统如图 1 所示,包含三个部分:12 块透镜组成的镜头组件,装载检偏片和光楔滤光片(非偏振通道使用滤光片和平板玻璃)的转轮,光路后端的电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)。光学系统采用像方远心和反远距设计<sup>[15]</sup>,仪

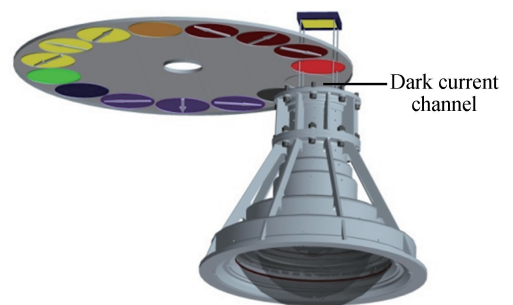


图 1 DPC 成像系统示意

Fig.1 Schematic of DPC imaging system

器主要参数如表 1.

表 1 偏振相机参数  
Table 1 Specifications of directional polarization camera

Content	Parameter
Orbit type	Sun synchronous orbit
Orbit altitude	708 km
Filed of view	118.74°
Spatial resolution	3.29 km (sub-satellite point)
Number of multi-angle	9 (along orbit)
Spectral band	443 nm, 565 nm, 763 nm, 765 nm, 910 nm, 490 nm(P), 670 nm(P), 865 nm(P)
Angle of polarizer	0°, 60°, 120°
Band selection mode	Filter wheel
Imaging method	Staring
Detector array size	512×512
Pixel size	22.5 μm×22.5 μm
Focal length of system	4.833 mm
Relative aperture	1...4

探测器非均匀性对数据的影响可以从多角度成像过程分析,如图 2 所示,综合考虑成本和系统复杂度,偏振成像仪采用广角镜头实现多角度探测,通过光楔补偿方法,实现对同一目标的偏振测量.成像观测时,滤光片转轮匀速转动切换,实现分时多角度、多光谱偏振测量.不同波段、角度的目标像点,分布在 CCD 不同位置,遥感数据集包含被测目标的 8 个波段、9 个角度的 72 组数据,非均匀性校正对多角度成像尤为重要.

从成像模型可以分析探测器非均匀校正的步骤和相关处理,偏振辐射响应模型建立了探测输出量与入射辐射量的转换关系,可表示为

$$D_{l,p}^{k,a} = A^k \cdot G \cdot T_{l,p}^{k,a} (P_{1,l,p}^{k,a} \cdot I_{l,p}^k + P_{2,l,p}^{k,a} \cdot Q_{l,p}^k + P_{3,l,p}^{k,a} \cdot U_{l,p}^k) + C_{l,p} \quad (1)$$

式中, $D$  为探测信号; $k$  代表波段; $a$  表示检偏片的不同安装方向; $l, p$  为像元坐标.乘积项  $G$  为相对增益系数包含电子学放大增益及曝光时间系数; $T$  为相对透过率响应系数包含检偏滤光组件相对透过率、光学系统低频透过率和探测器高低频响应系数; $C$  为暗背景系数; $A$  为辐射定标系数; $(I, Q, U)$  为入射光束的斯托克斯向量; $P_1, P_2, P_3$  为仪器偏振特性参数,表述为与像元视场角  $\theta$  和方位角  $\phi$  相关的镜头起偏度  $\varepsilon$  和偏振片效率  $\chi$  的函数: $P_1^{k,a}(\theta, \phi) = 1 + \chi^k \varepsilon^k(\theta) \cos 2(\phi - \alpha^{k,a})$ ,  $P_2^{k,a}(\theta, \phi) = \chi^k \cos 2(\phi - \alpha^{k,a}) + \varepsilon^k(\theta)$ ,  $P_3^{k,a}(\theta, \phi) = \chi^k \sin 2(\phi - \alpha^{k,a})$ .

通过三个检偏方向的信号可以解算入射光偏振态,如式(2)所示,入射光斯托克斯参量  $(I_{l,p}^k, Q_{l,p}^k, U_{l,p}^k)$ ,  $D$  为探测信号,  $C$  为暗电流,  $M$  为系统穆勒矩阵.

$$\begin{bmatrix} I_{l,p}^k \\ Q_{l,p}^k \\ U_{l,p}^k \end{bmatrix} = (M_{l,p}^k)^{-1} \begin{bmatrix} D_{l,p}^{k,1} - C_{l,p} \\ D_{l,p}^{k,2} - C_{l,p} \\ D_{l,p}^{k,3} - C_{l,p} \end{bmatrix} \quad (2)$$

模型中探测器组件对偏振成像仪影响主要有三个方面:1) CCD 暗电流影响,表现为  $C_{l,p}$ ; 2) 温度影响,体现温漂对绝对辐射定标系数  $A^k$  的影响; 3) CCD 非均匀性对  $T_{l,p}^{k,a}$  相对透过率影响.本文主要讨论探测器的非均匀校正流程,包含了暗电流校正、帧转移效应校正、温度补偿.

## 2 探测器非均匀性校正实验

多角度偏振成像仪为对地观测仪器,光谱响应度如图 3,分布在可见和近红外波段<sup>[16]</sup>,仪器的辐射响应

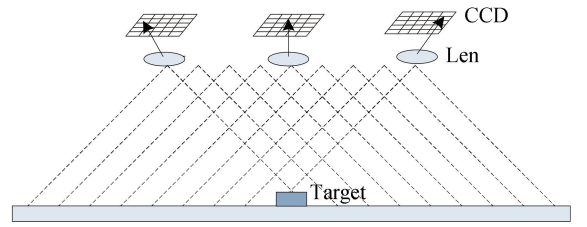


图 2 在轨工作示意

Fig.2 On-orbit working indication

度会随空间环境和时间的变化发生不同的衰减,需要适时进行在轨辐射定标<sup>[17-20]</sup>,为提高环境变化的适应性,在轨工作期间有三种工作模式,陆地、海洋和自定义模式.

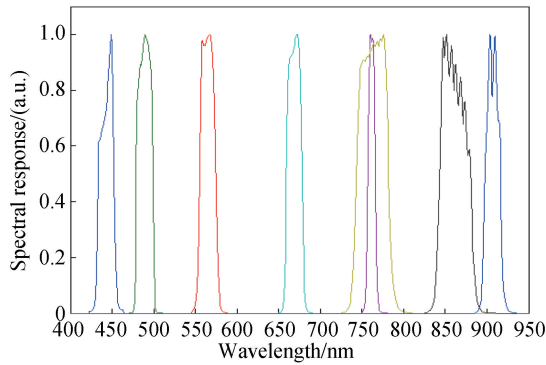


图3 光谱响应度曲线  
Fig.3 Spectral response curve

偏振成像仪建立了应对主要观测目标变化的动态范围调整机制,工作模式的区别在于探测器的积分时间不同,参数调整需要考虑目标反射率、光谱响应度和在轨辐射定标的结果,由地面数据系统进行决策.实验室阶段研究了基于积分时间调整变化的探测器组件校正方法.

探测器组件组成如图4,CCD进行入射光采集,模拟电路进行信号整理、滤波和模数转换,可编程逻辑器件(Field Programmable Gate Array, FPGA)完成时序控制,输出格式化数据.

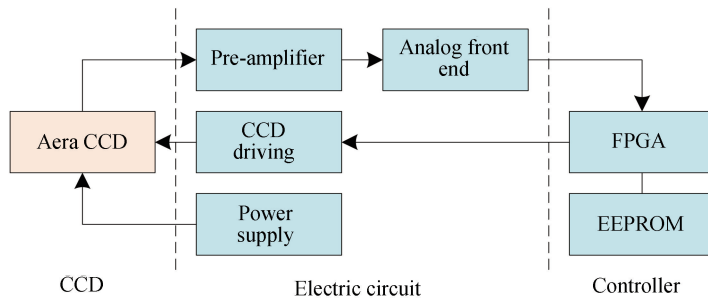


图4 探测器组件示意  
Fig.4 Schematic of detector assembly

探测器组件噪声来源如图5所示,主要来自面阵 CCD、前置放大电路和 AD 转换电路.放大电路、AD 转换电路的开关噪声、频响噪声和量化噪声,可通过选用高等级器件及电路滤波器抑制,远小于前端的 CCD 散粒噪声、本底噪声和 PRNU 噪声.本文分析了本底噪声和非均匀校正的处理方法.

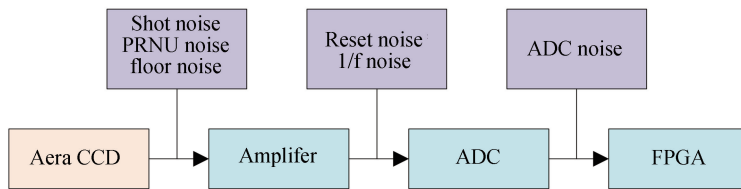


图5 探测器组件示意  
Fig.5 Noise composition of detector assembly

实验采用新研的探测器综合测试系统进行非均匀性校正研究,研究不同积分时间条件下,CCD 输出数据变化规律.系统组成如图6所示,主要包含:1) 暗室;2) 6 自由度光敏面调整机构;3) 积分球光源;4) CCD 图像采集系统;5) 温控制冷单元;6) 光源、温度监测.

积分球内置卤钨灯作为照明光源,选用与整机同批次滤光片,保证测试照明光谱与工作波段相一致.在探测器同平面上放置标准探测器,用于光源能量标准传递.图像采集系统输出的图像信号由工控机进行实时采集.探测器背面安装热敏电阻,通过数据采集器监测工作温度.

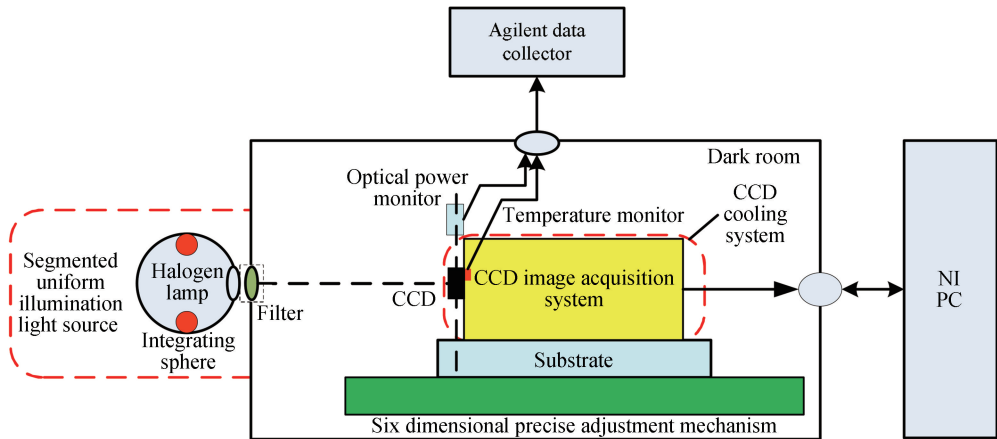


图 6 面阵 CCD 的光电性能测试系统示意

Fig.6 Electro-optical test system of CCD

多角度偏振成像仪探测器非均匀性校正实验步骤为：

- 1) 调整 CCD 像面位置对准积分球辐射源出光口中心；
- 2) 调节积分球输出,可达到信号探测满量程,并进行预热至稳定状态；
- 3) 运行测试系统,设置温度点、预热至稳定状态；
- 4) 设置不同积分时间,测试输出响应；
- 5) 实验过程实时监测积分球光源能量和探测器工作温度变化。

### 3 实验数据分析

#### 3.1 数据处理流程

实验获取成像仪原始数据和多参量数据,包括温度监测数据和光源监测数据,用来校正温度变化和光源亮度变化,数据校正流程如图 7,与在轨校正流程一致.实验数据处理包括暗背景校正、帧转移校正、温度变化补偿和外部光源稳定性补偿,多参量校正后,使用多点法计算 PRNU 校正系数.为提高信噪比,减少噪声影响,实验数据用 100 帧图像平均,计算 PRNU 校正系数.通过探测器组件校正,可获取有效图像信号转换为数字灰度值 (Digital Number, DN) 数据.

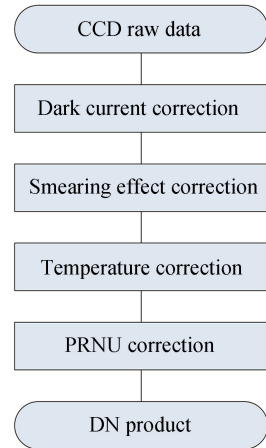


图 7 数据处理流程

Fig.7 Data processing flow

#### 3.2 暗背景校正

暗背景信号主要来源是 CCD 暗电流,积分时间、温度和在轨环境的变化以及仪器的衰变都会影响暗电流,暗电流总体幅度约占满阱 3% 左右,对暗目标如海洋等低反射率目标影响明显.成像仪在滤光片转轮上设置了暗电流通道,可以在每 8 s 测量周期内提供一帧全视场的暗电流数值,用于实时校正,同时也为像元质量监测提供数据.

暗背景随温度变化的曲线如图 8,测量范围内温度每升高 5~7 °C,暗电流增加约一倍,CCD 温度较高时,暗电流随温度变化非常明显,20 °C 时的暗电流是 0 °C 时的 6 倍左右.实验保持与在轨一致的校正方法,采用暗场和亮场交替探测进行,获取 100 帧暗场数据,平均后表示暗电流.不同积分时间条件下的暗电流变化曲线如图 9,呈线性变化关系.

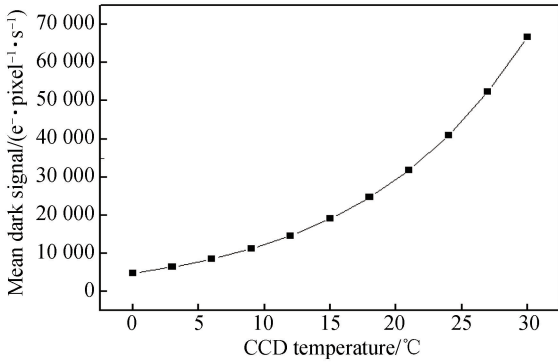


图8 暗电流随温度变化曲线

Fig.8 Dark current changes with temperature

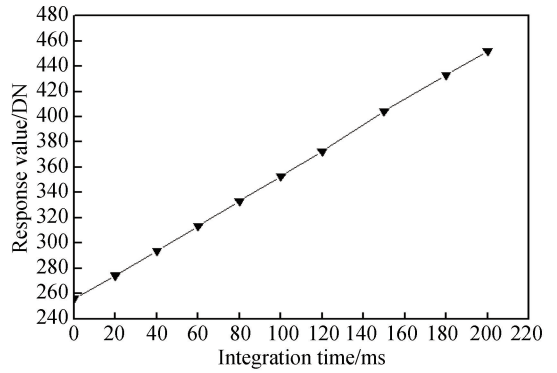


图9 暗电流随积分时间变化曲线

Fig.9 Dark current changes with integration time

### 3.3 帧转移校正

探测器选用帧转移体系结构 CCD,帧转移指探测器电荷转移方式,每个像元既收集光电荷又实现电荷转移,在电荷输出过程中,电荷逐行移动输出的同时继续曝光导致像元响应不均匀.通过测量分析探测器帧转移效应<sup>[7]</sup>,在数据处理中消除帧转移影响才能得到有效数据,为便于说明,采用中心视场测试数据说明,图 10 为帧转移校正前后的对比图,消除了影响信号.在轨期间,目标光谱变化复杂,需要对帧转移校正进行适应性分析研究.

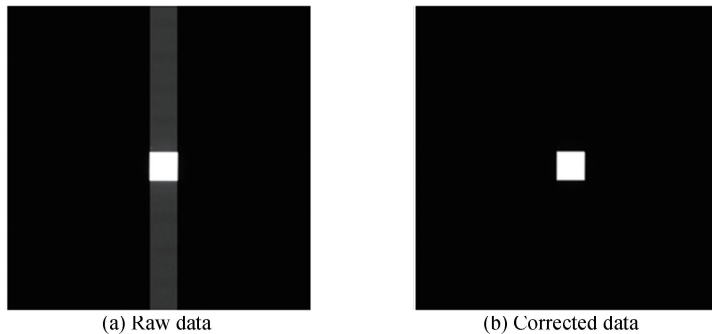


图 10 帧转移校正

Fig.10 Frame transfer correction

### 3.4 温度、照度补偿

探测器组件不同温度工况下光谱响应曲线变化如图 11,近红外谱段光谱响应度有较大波动,非均匀性校正前需要对实验数据进行温度补偿校正<sup>[21,22]</sup>.

工作温度范围内校正算法表达式为

$$L = L_0 \cdot [1 + (T - T_x) \cdot f_x] \quad (3)$$

式中, $T$  为探测器组件温度, $L_0$  为计算输出辐亮度值, $f_x$  为相对参考温度点  $T_x$  的计算系数, $L$  为校正后值.910 nm 波段温漂变化率为 0.28%/°C,则  $f_x = 0.0028$ , 865 nm 波段温漂变化率为 0.17%/°C,则  $f_x = 0.0017$ ,实验过程中温度变化

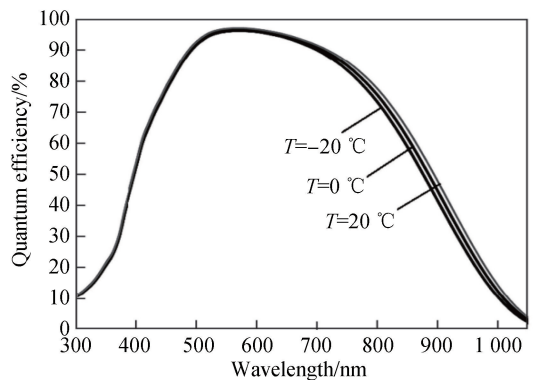


图 11 探测器光谱响应曲线

Fig.11 Spectral response curve of detector

小于 1 °C,其余波段温度影响可忽略不计.采用热控设计和温度补偿方法后,温度波动产生的测量误差小于 0.1%.温度  $t$  状态的偏振成像仪波段  $k$  的积分球出光口处辐亮度测量值用  $L_{k,t}$  表示,其表达式为

$$L_{k,t} = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} L(\lambda)r(\lambda)d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} r(\lambda)d\lambda} \quad (4)$$

式中,  $L(\lambda)$  为参考光源波长  $\lambda$  的光谱辐亮度,即光谱辐射计实测结果,  $r(\lambda)$  为仪器相对光谱响应率,  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为  $k$  波段滤光片的上下限波长,温度校正系数是相对温度参考点的相对数值,用偏振成像仪 DN 值等价表示辐亮度,简化计算量。

实验期间,温度监测数据如图 12 所示,选取 6.1 °C 为校正点,温度整体变化小于 0.2 °C,温控效果良好,温漂量微小。

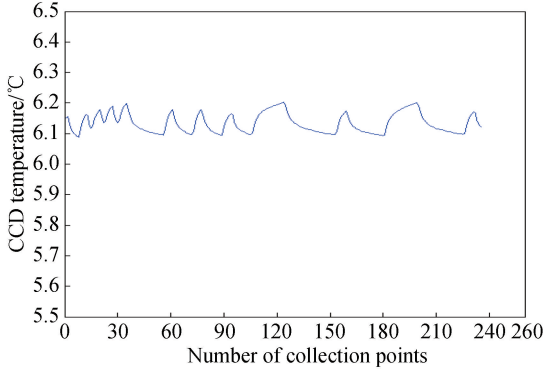


图 12 温度变化数据

Fig.12 Temperature change monitoring

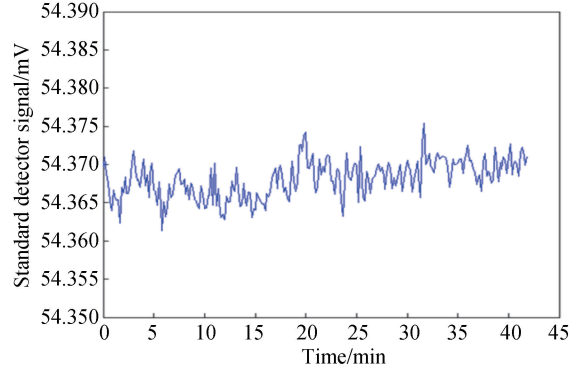


图 13 光源稳定性数据

Fig.13 Monitoring data of light source stability

使用标准探测器的监测数据补偿光源照度变化影响,实验考虑光源稳定性和仪器安全,要求光源达到热稳定状态后再进行测量,为了减小误差影响,测试要求光源稳定性需满足 30 min 内最大变化量小于 0.5%。实验光源稳定性测试数据如图 13,最大偏差为 0.025 7%[(54.375-54.361)/54.368],积分球光源稳定,满足实验要求。

### 3.5 非均匀性校正

光源条件不变,改变积分时间,获取 0~75 ms 共 11 组信号,经过暗电流、帧转移、温度、照度校正后,像面均值变化如图 14,在 75 ms 积分时间, DN 接近 8 000,处于探测器满阱 95%,数据线性度良好。积分时间为 0 ms 时,数据值极小,线性偏置接近 0,暗电流校正、帧转移等多参量校正取得理想效果,实验数据符合线性回归拟合计算条件。

依据线性回归理论,建立校正模型

$$\mathbf{D} - \mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{E} \quad (5)$$

式中,经过多参量校正补偿后的有效信号值  $\mathbf{D} = [DN_1, DN_2, \dots, DN_n]^T$ ,输入参考量  $\mathbf{P} = [t_1, 1; t_2, 1; \dots, t_n, 1]$ ,参数量  $\mathbf{A} = [a, b]$ , $\mathbf{E} = [e_1, e_2, \dots, e_n]^T$

为偏差量,依据线性回归拟合  $\mathbf{A} = (\mathbf{P}^T \mathbf{P})^{-1} \mathbf{P}^T \mathbf{D}$ ,获取逐像元的线性参数矩阵  $\mathbf{A}_{i,j}$  和均值参数矩阵  $\mathbf{A}_{\text{mean}}$ .通过线性变换获取 PRNU 校正矩阵  $\mathbf{A}_{i,j}^{\text{PRNU}}$ ,存放为  $\mathbf{K}_1$  斜率矩阵和  $\mathbf{K}_2$  截距矩阵,通过系数矩阵实现探测器数据校正。

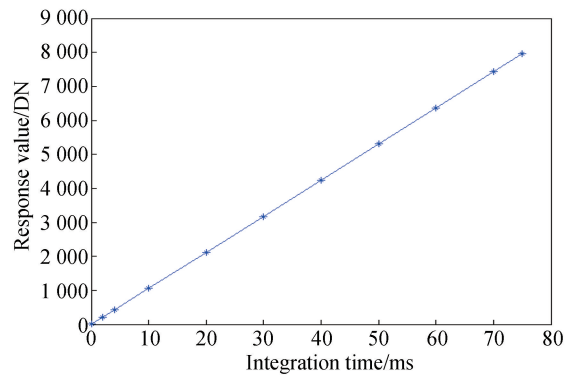


图 14 线性响应变化曲线

Fig.14 Linear response curve

PRNU 像元响应不一致性指在均匀光照条件下,像元间的响应差异,校正后的评价计算方法可表示为

$$\begin{cases} \bar{\mu} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\mu_{i,j}) \\ s^2 = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (\mu_{i,j} - \bar{\mu})^2 \\ \text{PRNU} = \frac{\sqrt{s^2}}{\bar{\mu}} \times 100\% \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $M$ 、 $N$  为面阵 CCD 光敏面像元的行数和列数,  $\mu_{i,j}$  为第  $i$  行, 第  $j$  列像元的响应值,  $s^2$  为校正后图像有效像元的方差;  $\bar{\mu}$  为校正后图像有效像元的均值。

噪声和不均匀性影响会随着信号幅值的增大而增大, 选择 95% 满阱单帧数据评测, 可更有效评估校正效果. 如图 15 所示, 使用 PRNU 校正系数, 对单帧数据进行校正, 单帧数据 PRNU 由 1.141% 下降到 0.513%. 校正前图 15(a) 有明显的低频非均匀性, 校正后图 15(b) 像元低频不平衡差异消除。

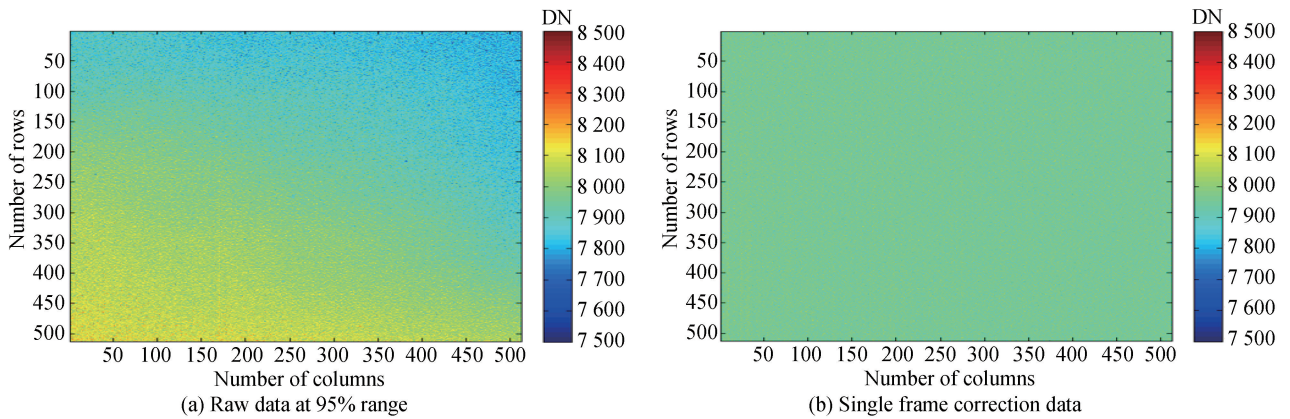


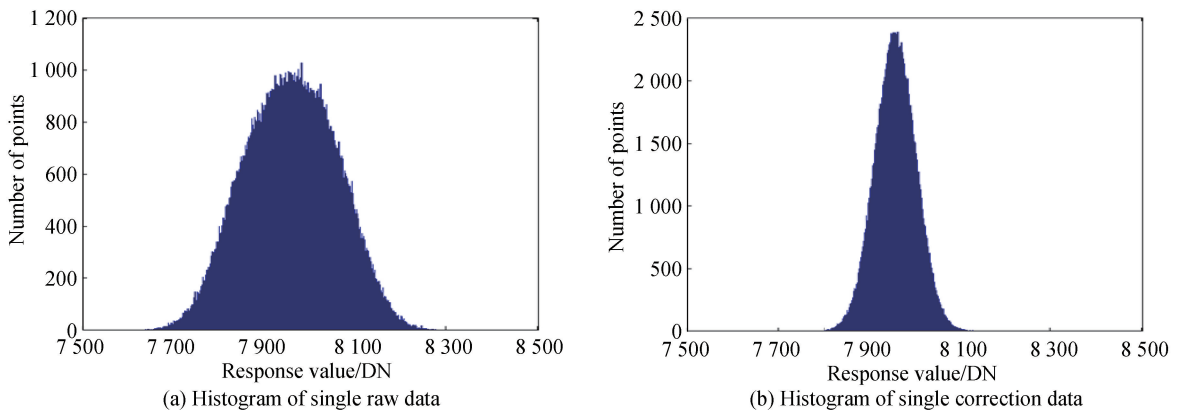
图 15 单帧数据校正前后对比

Fig.15 Comparison before and after single frame data correction

通过直方图分析高频非均匀性校正效果. 虽然数据平均可消除大部分散粒噪声影响, 但是, 对比单帧数据直方图(图 16(a))和 10 帧数据平均后直方图(图 16(c)), 可知, 通过原始数据平均的方法不会降低非均匀性噪声  $N_{\text{PRNU}}$ , 仅消除叠加在非均匀性噪声上的散粒噪声  $N_{\text{Shot}}$ . 由于散粒噪声影响, 如图 16(b) 所示, 单帧数据校正后无法判断高频非均匀性校正效果, 需要消除散粒噪声影响, 评估有效性。

10 帧数据平均后, 首先消除了大部分散粒噪声, 然后进行非均匀性校正, 效果如图 16(d) 所示, 校正后 PRNU 降至 0.1% 以内, 同时消除了散粒噪声和非均匀性影响, 非均匀性得到有效校正。

由以上分析可知, 95% 满阱单帧数据的校正效果表明, 像面分视场低频非均匀性、邻域像元高频非均匀性均得到有效校正, 小于散粒噪声影响. 对于图 6 中分析的探测器组件主要噪声源中, 探测器非均匀性噪声和本底噪声得到有效校正, 满足多角度数据应用。





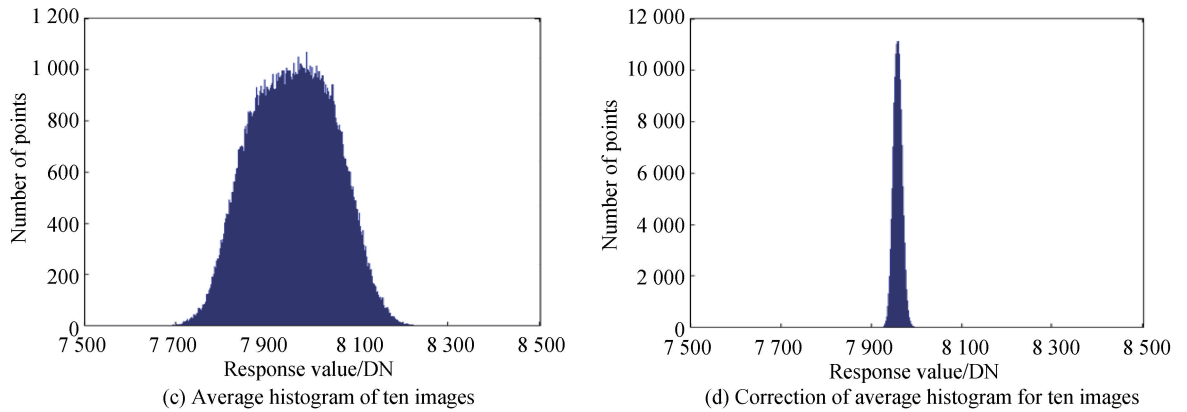


图 16 非均匀性校正前后数据直方图

Fig.16 Histogram of data before and after non-uniformity correction

## 4 结论

多角度偏振成像仪利用大视场探测气溶胶和云偏振辐射特性,全视场的非均匀性影响多角度数据质量,需采取多种校正方法逐级校正,本文针对偏振成像仪通过积分时间调整动态范围的工作模式,进行了探测器组件非均匀性校正研究.通过探测器多参量监督的测试,进行了不同积分时间下,像元响应线性度分析.通过暗电流、帧转移效应、温度补偿和光源能量变化校正,响应数据体现了良好的线性.利用多点法拟合,进行了全像面非均匀性校正.95%满阱单帧数据校正后 PRNU 由 1.141% 下降到 0.513%,非均匀噪声和本底噪声得到有效校正,校正后主要噪声表现为散粒噪声.10 帧数据平均后进行校正,PRNU 降至 0.1% 以内,散粒噪声、非均匀性噪声和本底噪声均得到校正.探测器校正为进一步的辐射、偏振定标提供了数据基础,满足多角度数据应用,为后续仪器的研制提供有效参考.

## 参考文献

- [1] DINER D J, CHIPMAN R, BEAUDRY N A, *et al.* An integrated multiangle, multispectral, and polarimetric imaging concept for aerosol remote sensing from space[C]. SPIE, 2005, **5659**: 88-96.
- [2] BÖTTGER U, PREUSKER R, NIEKE J. Radiative transfer model STORM for full Stokes vector calculations for a plane parallel atmosphere-surface-system[C]. SPIE, 2005, **5979**: 59791V.
- [3] HUANG C, MENG B H, CHANG Y Y, *et al.* Geometric calibration method based on a two-dimensional turntable for a directional polarimetric camera[J]. *Applied Optics*, 2020, **59**(1): 226-233
- [4] DAI Jun, GAO Juan, FAN Zhi-guo. Polarization-maintaining capacity of backscattered linearly and circularly polarized lights[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(5): 0505002.  
戴俊,高隽,范之国. 线偏振光与圆偏振光向后散射偏振保持能力[J]. 中国激光,2017,**44**(5):0505002.
- [5] ZHANG Yan-juan, WANG Xia, HE Si. Polarization properties of rough surfaces based on polarized bi-directional reflectance distribution function[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(3): 0329002.  
章延隽,王霞,贺思. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙表面偏振特性[J]. 光学学报,2018,**38**(3):0329002.
- [6] HUANG C, ZHANG M M, CHANG Y Y, *et al.* Directional polarization camera stray light analysis and correction[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(26): 7042-7049
- [7] 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.
- [8] CHEN Fei-nan, HUANG Chan, HONG Jin, *et al.* In Flight radiation evaluation and validation of directional polarimetric camera[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, **36**(S2): 126-136+172.  
陈斐楠,黄禅,洪津,等. 大气气溶胶多角度偏振探测仪在轨辐射精度与真实性验证研究[J]. 上海航天,2019,**36**(S2): 126-136+172.
- [9] LIANG Shao-lin, WANG Yong-mei, MAO Jing-hua, *et al.* Test for pixel non-uniformity of scientific optical CCD[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(4): 0417004.  
梁少林,王咏梅,毛靖华,等. 科学级光学 CCD 像素非均匀性的测试[J]. 红外与激光工程,2019,**48**(4):0417004.
- [10] CHENG Wan-sheng, ZHAO Jie, CAI He-gao, *et al.* Correction method of pixel response nonuniformity of CCD[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(2): 314-317.  
程万胜,赵杰,蔡鹤皋,等. CCD 像素响应非均匀性的校正方法[J]. 光学精密工程,2008, **16**(2): 314-317.

- [11] BAI Le, LAI Xue-feng, HAN Wei-qiang, *et al.* An infrared image nonuniformity correction method adapted to adjustment of integration time[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(1): 0110002.  
白乐, 赖雪峰, 韩维强, 等. 适应积分时间调整的红外图像非均匀性校正方法[J]. *光子学报*, 2020, **49**(1): 0110002.
- [12] LI Jing, ZHU Bin, GUO Li-xin, *et al.* A method of non-uniformity correction based on adaptively adjusting integration time[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 486-490  
李晶, 朱斌, 郭立新, 等. 一种积分时间自适应调整的非均匀性校正算法[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 486-490.
- [13] JIANG Ping, WANG En-de, JIN Lei, *et al.* Uncooled infrared stripe noise correction algorithm based on multiscale analysis and weighted least squares[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(9): 0910002  
姜平, 王恩德, 金磊, 等. 基于多尺度分析和加权最小二乘法的非制冷红外条纹噪声校正算法[J]. *光子学报*, 2019, **48**(9): 0910002
- [14] LIU Li-ying, LI Ye, ZHENG Feng, *et al.* Nonlinearity characteristic modeling and correction of CCD spectroradiometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(8): 0804002.  
刘丽莹, 李野, 郑峰, 等. CCD光谱辐射计的非线性特性建模与校正[J]. *光子学报*, 2019, **48**(8): 0804002.
- [15] YANG Wang-feng, HONG Jin, QIAO Yan-li. Optical design of spaceborne directional polarization camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(8): 0822005.  
杨伟锋, 洪津, 乔延利. 星载多角度偏振成像仪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, **35**(8): 0822005.
- [16] GU Ming-li. Methods for the in-flight absolute radiation calibration of space-borne remote sensors[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2000, **21**(1): 16-21.  
顾名澧. 星载遥感器在飞行时的绝对辐射定标方法[J]. *航天返回与遥感*, 2000, **21**(1): 16-21.
- [17] GAO Cai-xia, JIANG Xiao-guang, MA Lin-lin, *et al.* Review of radiometric cross-calibration[J]. *Arid Land Geography*, 2013, **36**(1): 139-146.  
高彩霞, 姜小光, 马灵玲, 等. 传感器交叉辐射定标综述[J]. *干旱区地理*, 2013, **36**(1): 139-146.
- [18] TORRES B, DUBOVIK O, TOLEDANO C, *et al.* Sensitivity of aerosol retrieval to geometrical configuration of ground-based sun/sky radiometer observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(2): 847-875.
- [19] DUBOVIK O, SMIRNOV A, HOLBEN B N, *et al.* Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from aerosol robotic network (AERONET) sun and sky radiance measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, **105**(D8): 9791-9806.
- [20] ZHU Bin-qing, YUAN Yin-lin, KANG Qin, *et al.* Research on calibration method of in-band relative spectral responsivity of polarization remote sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(7): 0712005.  
朱冰青, 袁银麟, 康晴, 等. 偏振遥感器带内相对光谱响应度定标方法研究[J]. *光学学报*, 2018, **38**(7): 144-151.
- [21] HU Bin-ting, XU Tao, JIANG Shi-chen, *et al.* Thermal control design of multi channel scanning imagery radiometer[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(3): 141-146.  
胡炳亭, 徐涛, 江世臣, 等. 多通道扫描成像辐射计热设计[J]. *红外技术*, 2011, **33**(3): 141-146.
- [22] WANG Gan-quan, SHEN Xia, WANG Wei-chen, *et al.* On board adaptation of temperature of the FY-4 meteorological satellite radiation imager[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, **37**(5): 540-544.  
王淦泉, 沈霞, 王伟成, 等. 风云四号气象卫星辐射成像仪在轨温度环境适应性[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, **37**(5): 540-544.