

多角度偏振成像仪偏振通道响应非一致性测量方法

翁建文^{1,2}, 袁银麟^{1*}, 郑小兵¹, 康晴¹, 涂碧海^{1,2}, 夏茂鹏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 GF-5 卫星多角度偏振成像仪(DPC)同一波段三个偏振通道(0° 、 60° 及 120°)必须进行响应非一致性校正,才能达到偏振探测的精度要求。将范围为 $-50^\circ\sim 50^\circ$ 的 DPC 宽视场划分为 15×15 个分视场,使用高精度的二维转动平台调整各分视场的位置以对准积分球参考光源进行成像。设计基于时间稳定性的分视场图像数据的拼接算法,得到全视场的拼接图像,并应用对数增强方法检测拼接图像中坏像元的位置与数量。采用拼接图像计算 DPC 同一波段三偏振通道的相对透过率、低频相对透过率及高频相对透过率,为 DPC 偏振通道响应非一致性校正提供了校正系数。结果表明,DPC 偏振通道的响应非一致性测量不确定度优于 0.67% 。所提方法为校正 DPC 偏振通道间的响应非一致性、提高偏振信息的解析精度提供了高精度的手段。

关键词 遥感; 偏振通道; 宽视场; 响应非一致性; 分视场; 测量不确定度

中图分类号 TP79

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0828001

Method for Measuring Response Non-Uniformity of Polarization Channels in Directional Polarization Camera

Weng Jianwen^{1,2}, Yuan Yinlin^{1*}, Zheng Xiaobing¹, Kang Qing¹, Tu Bihai^{1,2},
Xia Maopeng¹, 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 Only calibrating the response non-uniformity among three polarization channels of 0° , 60° , and 120° in the same waveband of a GF-5 satellite directional polarization camera (DPC) can make the accuracy requirement of polarization detection met. The wide field-of-view with DPC range of $-50^\circ\sim 50^\circ$ is divided into 15×15 sectional field-of-view and a high-accuracy two-dimensional turntable is used to adjust the position of each sectional field-of-view for aiming the integrating sphere reference light for imaging. The mosaic algorithm of the sectional field-of-view image data based on time stability is designed to obtain the mosaic images of the entire field-of-view. Furthermore, the logarithm enhancement method is used to detect the location and number of bad pixels in the mosaic images. The mosaic images are used to calculate the relative transmittance, low frequency relative transmittance, and high frequency relative transmittance of three polarization channels in the same waveband of DPC, and a calibration factor is provided for the calibration of DPC polarization channel response non-uniformity. The results show that the measurement uncertainty of DPC polarization channel response non-uniformity is superior to 0.67% . The proposed method provides a high-precision tool for calibrating the response non-uniformity among DPC polarization channels and for improving the analytical accuracy of polarization information.

Key words remote sensing; polarization channel; wide field-of-view; response non-uniformity; sectional field-of-view; measurement uncertainty

OCIS codes 280.4788; 120.0280; 130.6010; 280.4991

收稿日期: 2019-11-25; 修回日期: 2019-12-19; 录用日期: 2019-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(41605021,41805019)

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

1 引 言

偏振成像技术能够根据不同材料表面反射特性的差异突出不同物质之间的区别^[1]。研究表明,增加偏振信息可提高大气探测的精度^[2]。中国科学院安徽光学精密机械研究所基于我国对大气环境监测和气候变化等领域的研究需求,研制了 GF-5 卫星多角度偏振成像仪(DPC)。DPC 采用同一个光学系统,通过装有滤光片/偏振片的组合转轮,按照时序依次获取同一波段 0° 、 60° 及 120° 三个检偏方向上的偏振图像^[3]。由于三个方向上的图像分时共用同一个光学系统,为了实现 DPC 在轨运行时同一波段三个偏振通道对同一目标的同时测量,对其中两个方向的偏振通道增加光楔补偿元件,以补偿分时测量时由卫星运动引起的探测位置的变化^[4];同时对测量光路进行了分级角度偏转设计。这种方法增加了对同一波段三个偏振通道响应非一致性测量的难度。当 DPC 处于静止状态时,同一波段三个偏振通道获取的三幅图像存在约 ± 1 个像元的偏移,即三个偏振通道对同一目标的观测视场(FOV)不一致。同时电荷耦合器件(CCD)制造工艺和光学系统加工安装的非理想性、滤光片/偏振片与光楔补偿元件的非理想性等也会导致同一波段三偏振通道响应的非一致性。

DPC 偏振通道响应非一致性是指 DPC 同一波段的 0° 、 60° 及 120° 三个偏振通道对同一个均匀非偏目标成像时三个偏振通道响应的不一致性,主要由三部分组成: 0° 、 60° 及 120° 三个偏振通道视场中心的响应差异;单一偏振通道视场边缘与视场中心的响应差异;单一偏振通道的像元响应与对应视场的响应差异。针对宽视场偏振相机的响应非一致性测量,目前常用的实现全视场响应非一致性的测量方案有分视场测量方案和利用特殊开口形状积分球的测量方案^[5-6]。分视场测量方案无需对现有设备进行改造,但定标过程复杂,数据处理工作量大。特殊开口形状积分球的测量方案可以一次性进行全视场的测量,但需要对现有积分球进行改造,且会对积分球的面均匀性与角度特性造成较大影响。任建伟等^[5]对分视场与特殊开口形状积分球两种测量方案进行了分析对比,发现辐射定标精度分别为 1.68% 和 1.89% ,分视场测量方案具有更高的辐射定标精度。对 DPC 偏振通道响应非一致性进行测量时,分视场采集的积分球成像图中出现一些像元响应灰度值明显低于周围像元响应灰度值的异常像元,这些

异常像元被称为坏像元^[7]。后期通过对这些坏像元进行长期跟踪观测,发现部分位置的坏像元恢复为正常像元,而部分正常像元变成了坏像元,初步判断 DPC CCD 上大部分坏像元是由 DPC 成像系统上落灰而形成的灰点造成的^[8]。坏像元是影响成像载荷非一致性校正的关键因素之一,它的存在会对 DPC 的偏振探测精度产生影响。卫星发射后,传感器受发射时的振动、在轨空间环境变化等因素的影响,DPC 坏像元数量及位置发生变化,此时使用实验室测量的偏振通道响应非一致性的校正系数进行偏振度计算时会得到虚假的偏振信息。因此必须对在轨运行期间的坏像元进行跟踪检测,在 DPC 坏像元数量及位置变化时,及时更新偏振通道的响应非一致性校正系数。现有绝大多数坏像元检测算法对坏像元进行有效检测的前提是拍摄目标均匀、平稳变化^[9-10]。在轨运行时拍摄对象为复杂的地物,因此需研究一种新的适用于复杂地物成像情况下的坏像元检测方法。

针对宽视场 DPC 偏振通道的响应非一致性测量需求,本文给出了一种高精度测量方法。利用实验室现有的积分球,结合高精度二维转动平台组成一个分视场的测量系统,在测量过程中,利用自动化测控软件实现各分视场的自动切换和各通道成像数据的采集,得到 15×15 个分视场的成像数据;再采用基于时间稳定性的拼接算法对获取的成像数据进行拼接处理,最终获得用于计算 DPC 偏振通道响应非一致性校正系数的全视场成像数据;最后利用全视场成像数据进行坏像元检测和偏振通道响应非一致性校正系数的计算,并分析偏振通道响应非一致性的测量不确定度。

2 偏振通道响应非一致性形成原因和测量方案

2.1 偏振通道响应非一致性形成原因

DPC 的光学系统主要包括基于宽视场的远心光学系统、带有光谱滤光片/偏振片的旋转轮及面阵 CCD 探测器,如图 1 所示。由图 1 可知,DPC 同一波段三偏振通道间产生响应非一致性的主要原因是旋转轮上三偏振通道的滤光片/偏振片的性能存在差异。图 2 为装有光楔滤光片的检偏滤光组件安装示意图。光楔滤光片的主要作用是补偿在轨运行时同一波段三偏振通道间的 ± 1 个像元偏移,因此当 DPC 处于静止状态时,三个偏振通道获取的三幅偏振图像存在约 ± 1 个像元偏移,在实验室环境下,该

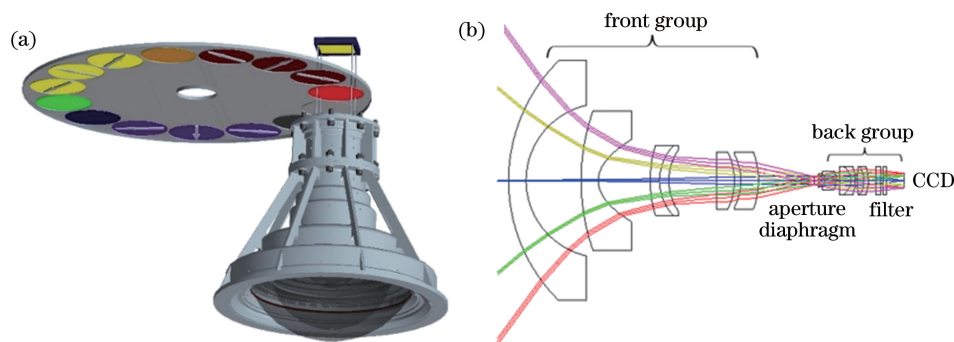


图 1 DPC 光学系统。(a) DPC 光学系统结构;(b) DPC 光学系统成像光路

Fig. 1 DPC optical system. (a) Structure of DPC optical system; (b) imaging path of DPC optical system

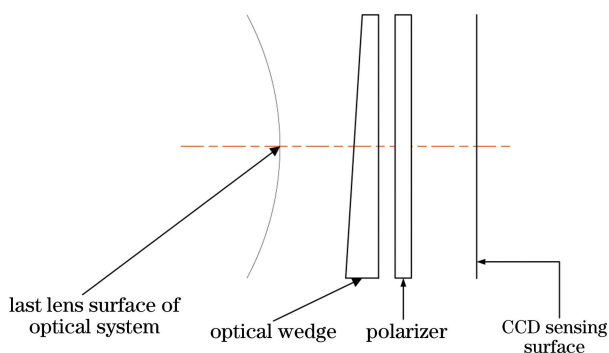


图 2 检偏滤光组件的安装示意图

Fig. 2 Installation diagram of optical filter and analyser module

观测视场不一致现象在发射前就导致测量三个偏振通道响应非一致性的难度增加。

DPC 的探测器采用英国 e2v 公司的型号为 CCD55-20 的背照型 CCD,有效探测像元数目为 512×512 ^[11];偏振通道为 490, 670, 865 nm,采用 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 偏振片实现偏振探测;非偏振通道为 443, 565, 763, 765, 910 nm,采用具有 10~40 nm 带宽的窄带滤光片实现光谱选择。由于 CCD 的感光材料的质量差异和生产工艺产生的不均匀性、检偏滤光组件材料的镀减反膜膜层和安装工艺的非理想性、光学系统加工安装的非理想性,自然光以相同的辐亮度入射时,能量透过率和 CCD 像元间响应存在一定的差异,进而导致 DPC 的 $0^\circ, 60^\circ$ 及 120° 三个偏振通道视场中心的响应、单一偏振通道视场边缘与视场中心的响应、单一偏振通道的像元响应与对应视场的响应均存在差异。同时在实验室测试过程中,发现了较多由灰尘造成的“坏像元”,只能通过后期软件处理算法来对这些坏像元进行检测与校正。同时 DPC 在轨运行时,发射时的振动、在轨运行环境变化等原因会造成灰尘点位置变化与像元损坏,即一部分坏像元恢复成正常像元,另一部分正常像

元变为坏像元,如果继续使用发射前实验室的测量系数进行校正将得到虚假偏振信息。后期在轨运行时为了能够对偏振通道响应非一致性变化进行监测和对响应非一致性校正系数进行重新测量,并考虑到目前还没有一种方法能够实现对 DPC 在轨运行时所有探测通道像元响应差异的完全校正,故将偏振通道响应非一致性校正系数拆分为相对透过率、低频相对透过率及高频相对透过率三个分量分别进行测量^[4]。

2.2 基于积分球参考光源的分视场测量方案

根据 DPC 的成像特点,设计了采用积分球参考光源实现 DPC 偏振通道响应非一致性的测量方法。实验室现有的积分球参考光源的出光口径比 DPC 全视场小,难以一次性覆盖 DPC 探测器所有像元(单视场成像覆盖像元如图 3 所示)。考虑到 DPC 的光学成像系统和偏振通道测量的特殊性,设计了采用二维转动平台来实现基于局部均匀目标的分视场测量方案,以实现 DPC 偏振通道响应非一致性的准确测量。二维转动平台的水平和竖直旋转精度均优于 0.001° ,显著低于 DPC 单像元对应的 $0.058^\circ \sim 0.140^\circ$ 视场角范围^[12]。因此,二维转动平台可以满足 DPC 各视场精度定位的要求,实现各分视场对同一目标成像,最大程度抑制位置改变而带来的重叠区域响应变化。

采用分视场测量方式,需要重点考虑有效成像区域、分视场测量数目及一个成像周期内的时序匹配,具体如下。

1) 有效成像区域:根据积分球参考光源出光口的直径、面均匀性及角度特性等参数,选择最佳的有效成像区域。根据前期均匀性检测结果^[13]选择有效成像区域,其是以积分球参考光源出光口直径 1000 mm 的 25% 为直径的中心区域。实验中 DPC 和积分球参考光源出光口平面的距离为 2000 mm,

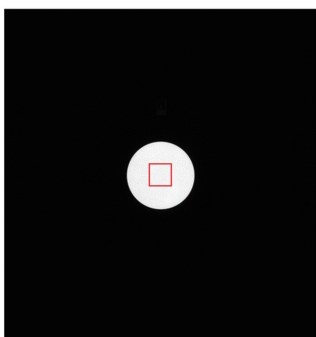


图 3 单视场积分球参考光源成像光斑

Fig. 3 Integral sphere reference light imaging in single field-of-view

DPC 一次分视场测量覆盖的视场角约为 $\pm 5^\circ$ 。积分球参考光源单视场成像光斑如图 3 所示,其中单视场所需的有效数据选自方框内成像区域。

2) 分视场测量数目:确定有效成像区域后,即可计算出所需的总测量视场数,确定各分视场与高精度二维转动平台转动位置之间的关系。经过计

算,分视场测量视场数为 15×15 ,需要进行 225 个视场的数据采集。

3) 一个成像周期内的时序匹配:针对每一个分视场,DPC 模拟在轨工作模式,采集一个成像周期的成像数据,包括 9 个偏振通道、5 个波段非偏振通道及 1 个本底通道。在一个成像周期最后一个通道数据采集完成时,设置测试参数,调整二维转动平台实现分视场切换,以高效地实现全视场响应非一致性的测量。

在分视场测量视场数和位置确定后,为进一步减少时间稳定性造成的误差,设计专用的分视场测控软件,模拟 DPC 在轨运行时的目标成像状态进行数据采集。数据采集软件涉及到的硬件编程采用适用于底层开发的 C++ 语言。将前期精确计算得到的各个视场的位置信息存储为采集参数配置文件,以提高数据采集系统的通用性和扩展性。分视场测量照明原理图、分视场测量原理图及分视场测量现场图如图 4 所示。

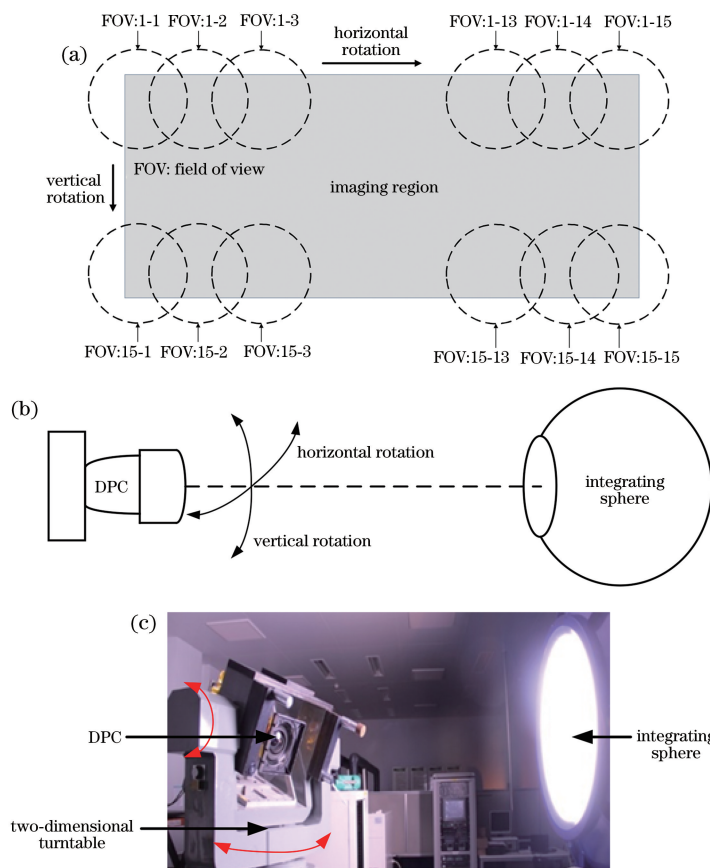


图 4 偏振通道响应非一致性分视场测量。(a)分视场测量照明原理图;(b)分视场测量原理图;(c)分视场测量现场图

Fig. 4 Sectional field-of-view measurement of polarization channel response non-uniformity. (a) Schematic of lighting for sectional field-of-view measurement; (b) schematic of sectional field-of-view measurement; (c) experiment diagram of sectional field-of-view measurement

3 偏振通道响应非一致性测量数据处理算法

3.1 分视场采集图像拼接算法

分视场采集图像的拼接算法是决定分视场测量方案可行性的关键因素之一,因 DPC 分视场对积分球参考光源成像数据的特殊性,目前基于区域相关与基于特征相关的图像拼接算法^[14]已不适用,因此需要设计一种适用于积分球参考光源分视场成像数据的拼接算法,以提高分视场成像数据的拼接质量与拼接效率。积分球参考光源在单个视场下的成像为一个较小光斑,需将各视场下的积分球参考光源成像光斑组合为覆盖 CCD 所有成像像元的灰度图。对 DPC 分视场积分球参考光源成像光斑进行拼接时,首先需要得到各分视场下光斑的重心,由于成像

光斑覆盖的像元总数远大于 9,故采用椭圆拟合光斑重心算法^[15]。该算法首先采用局域窗口统计法获取成像光斑所在的局部矩形窗口的位置,再利用 Roberts 边缘检测算子检测出该窗口内的光斑边缘。图像 $f(i, j)$ 的交叉算子运算模板表示为

$$G(i, j) = |G(i) + G(j) - |f(i, j) - f(i + 1, j + 1)| - |f(i + 1, j) - f(i, j + 1)|, \quad (1)$$

式中: $G(i, j)$ 为图像 $f(i, j)$ 的交叉算子运算模板; i, j 分别为分块区域内像元的行序号和列序号。若 $G(i, j)$ 大于某一阈值,则认为点 (i, j) 为边缘点。椭圆方程的一般方程为

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + 1 = 0. \quad (2)$$

根据最小二乘原理可以得到求解 5 个未知数的方程组,表达式为

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 y_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^3 & \sum_{i=1}^N y_i^4 & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 \\ \sum_{i=1}^N x_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i & \sum_{i=1}^N x_i y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^3 & \sum_{i=1}^N x_i y_i & \sum_{i=1}^N y_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ \sum_{i=1}^N y_i^2 \\ \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N y_i \end{bmatrix}. \quad (3)$$

通过求解(3)式可以得到 5 个参数,再求出重心位置 (x_0, y_0) :

$$\begin{cases} x_0 = \frac{BE - 2CD}{4AC - B^2} \\ y_0 = \frac{BD - 2AE}{4AC - B^2} \end{cases} \quad (4)$$

根据理论计算,提取以重心位置 (x_0, y_0) 为中心的 35×35 像元响应灰度值,并将其放入合成图的对区域。基于积分球参考光源的时间稳定性特点,多个视场下重叠区域中成像输出的像元响应灰度值在理论上应相同,因此,对于可能出现的拼接不全的微小狭缝处的像元拼接,应遍历并计算出所有视场在此微小狭缝处的灰度响应值标准偏差,取标准偏差最小的视场数据放入合成图对应的微小狭缝内,从而减小随机波动噪声造成的误差。

图 5 为分视场成像拼接图像中 490 nm 波段的

通道 13、15 与通道 14 的像元响应灰度比值 R_1, R_2 的三维图,可以看出,三个偏振通道间具有明显的响应非一致性。

3.2 坏像元检测算法

CCD 材料制备、封装及后期使用过程等造成面阵 CCD 感光像元损坏、感光异常,进而产生坏像元。对于 DPC 来说,坏像元大部分是由粘在镜头或感光像元上的灰尘形成的,且坏像元大小通常只有一个像元。目前采用两种方式处理坏像元,第一种为在发射前检测出坏像元位置信息并将其存储为配置文件,在后期的产品生产程序中利用相邻的像元值来进行替换^[16];第二种为在后期的产品生产程序中进行坏像元的实时检测和校正,这种方法易出现检测不全或误检测情况。经常会出现坏像元数量及位置的变化,因此需第二种对位置进行实时检测的方法对坏像元进行监测并及时更新坏像元位置信息配置

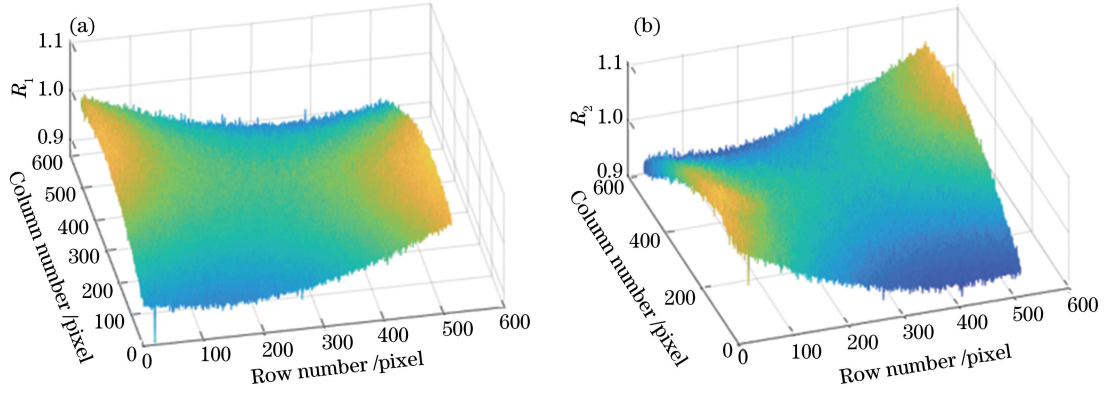


图 5 同一波段三通道间的响应非一致性。(a)通道 13/通道 14;(b)通道 15/通道 14

Fig. 5 Response non-uniformity among three channels in same waveband. (a) Channel 13/channel 14; (b) channel 15/channel 14

文件。

坏像元检测需要在局部均匀区域内进行,因此采用大小为 11×11 的分块提取一轨成像数据,将各分块区域非均匀性最小的部分放入坏像元检测合成图中。分块区域非均匀性计算公式为

$$\mu = \frac{\text{Std}(G_{i,j})}{\bar{G}_{i,j}} \times 100\%, \quad (5)$$

式中: μ 为非均匀性; $G_{i,j}$ 为分块区域内像元响应灰度值; $\text{Std}(G_{i,j})$ 为分块区域内像元响应灰度值的标准偏差; $\bar{G}_{i,j}$ 为分块区域内像元响应灰度值的均值。

坏像元在一般情况下都是独立的像元,且与周围像元相比,其输出有较大突变^[17],因此采用 3×3 像元的检测窗口来检测灰度值平稳变化方向。检测窗口内 3×3 像元响应灰度值用 G_1, G_2, \dots, G_9 表示,如图 6 所示。首先确定待检测点在水平 H、垂直 V、左斜 L、右斜 R 四个方向像元响应灰度值变化量中的最小值 $\Delta M (\Delta M \in \min \{ \Delta H, \Delta V, \Delta L, \Delta R \})$,最小值所在方向即为像元响应灰度值平稳变化方向,其中 $\Delta H = |G_4 - G_6|$ 、 $\Delta V = |G_2 - G_8|$ 、 $\Delta L = |G_1 - G_9|$ 、 $\Delta R = |G_3 - G_7|$ 。

G_1	G_2	G_3
G_4	G_5	G_6
G_7	G_8	G_9

图 6 坏像元检测窗口

Fig. 6 Bad pixel detection window

选取平稳变化方向上含待检测像元在内的 11

个点 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{11}\}$ 进行拟合,根据拟合函数计算得到 11 个新数据点集合 $S' = \{S'_1, S'_2, \dots, S'_{11}\}$,再利用对数增强方法计算得到用于判断坏像元的点集合 $L = \{L_1, L_2, \dots, L_{11}\}$,表达式为

$$L = \begin{cases} \log \frac{S'_n}{S_n}, & \text{black spot detection} \\ \log \frac{S_n}{S'_n}, & \text{bright spot detection} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: n 为 $1, 2, \dots, 11$ 。

图 7 为通道 3 拼接图第 187 行第 96 列像元的坏像元检测结果。由图 7 可知,正常点比值在 0.1 以下,坏像元比值在 0.3 以上,比值在 0.1~0.3 之间的为可疑坏像元。因此,将坏像元分为两个等级,第一级坏像元为响应强度明显区别于其周围像元强度的坏像元,第二级坏像元为响应强度接近其周围像元强度的可疑坏像元。

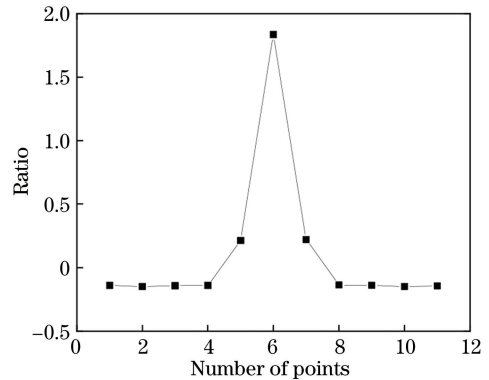


图 7 通道 3 分视场成像拼接图中(187,96)处坏像元检测结果
Fig. 7 Detection result of bad pixels at (187,96) of mosaic image in channel 3 sectional field-of-view imaging

3.3 偏振通道响应非一致性校正算法

在测量偏振通道响应非一致性时,积分球参考光源强度应使 DPC 成像输出灰度响应值在 DPC 动

态范围上限值的 30%~80%。在此响应区间内, DPC 具有良好的线性关系。针对宽视场偏振载荷, 目前还没有一种方法能够在在轨运行时完全校正全视场的偏振通道响应非一致性。因此, 通过相对透过率、低频相对透过率及高频相对透过率对偏振通道响应非一致性进行校正^[4]。相对透过率为 DPC 同一波段三检偏通道响应的相对比值, 以 60° 检偏通道作为参考, 数据处理方法的表达式为

$$T^{k,a} = \frac{\sum_{i=i_0-1}^{i_0+1} \sum_{j=j_0-1}^{j_0+1} Y_{i,j}^{k,a}}{\sum_{i=i_0-1}^{i_0+1} \sum_{j=j_0-1}^{j_0+1} Y_{i,j}^{k,2}}, \quad (7)$$

式中: $T^{k,a}$ 为相对透过率, k 为波段号, a 为三偏振通道编号 ($a=1, 2, 3$); $Y_{i,j}^{k,a}$ 为经过暗电流、帧转移校正后的像元响应灰度值。

低频相对透过率是指自然光经过光学镜头后, 在偏振解析光路前进入各视场的光强相对变化。利用三角函数的正交性, 通过三检偏通道响应的加权均值计算光强。取被测视场 3×3 区域的三检偏通道响应值和中心视场 3×3 区域的响应值计算光强相对变化, 即获取空间低频相对透过率, 表达式为

$$P_{i_0,j_0}^k = \frac{\sum_{i=i_0-1}^{i_0+1} \sum_{j=j_0-1}^{j_0+1} \text{mean}(Y_{i,j}^{k,1} + Y_{i,j}^{k,2} + Y_{i,j}^{k,3})}{3 \times \sum_{i=i_0-1}^{i_0+1} \sum_{j=j_0-1}^{j_0+1} \text{mean}(Y_{i,j}^{k,2})}, \quad (8)$$

$$Y_{i,j}^{k,a} = Y_{i,j}^{k,a} / T^{k,a}, \quad (9)$$

式中: P_{i_0,j_0}^k 为 k 波段的低频相对透过率; $Y_{i,j}^{k,a}$ 为处理后的像元响应灰度值。

高频相对透过率为 DPC 三个偏振通道各像元响应与其对应视场响应的相对比值。选取参考偏振通道被测像元的响应值和被测视场 3×3 区域的响应值, 则高频相对透过率的表达式为

$$g_{i_0,j_0}^{k,a} = \frac{Y_{i_0,j_0}^{k,a}}{\sum_{i=i_\theta}^{i_\theta+1} \sum_{j=j_\varphi}^{j_\varphi+1} \text{mean}(Y_{i,j}^{k,1} + Y_{i,j}^{k,2} + Y_{i,j}^{k,3})}, \quad (10)$$

式中: i_θ 为被测视场的视场角 θ 对应的像元行序号; j_φ 为被测视场的方位角 φ 对应的像元列序号。

由上述分析可知, DPC 同一波段三偏振通道采集的原始成像图经过高频相对透过率、低频相对透过率及相对透过率 3 次校正后, 即可得到偏振通道响应非一致性校正后的成像图, 校正流程如图 8

所示。

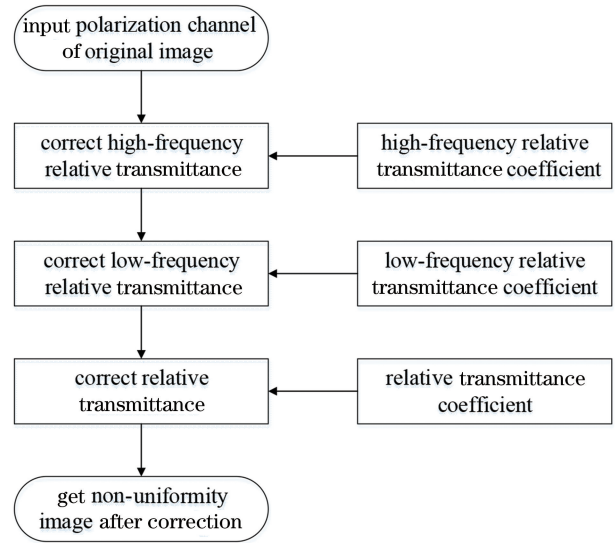


图 8 偏振通道响应非一致性校正流程

Fig. 8 Calibration process of polarization channel response non-uniformity

4 实验结果与分析

4.1 坏像元检测结果

采用 DPC 发射前实验室积分球分视场成像拼接图、发射后第 2 圈成像数据及发射一年后第 5638 圈成像数据检测坏像元。发射前和发射后坏像元检测原始图及其单像元坏像元检测 11×11 区域的合成图如图 9~11 所示。

表 1 为三个主要时间节点检测出的坏像元数量及位置变化, 检测结果只考虑像元响应灰度值明显有别于周围像元的第一级坏像元。由表 1 可知: 发射后 2018 年 5 月 10 日第 2 圈成像数据检测出的总坏像元数相较于发射前 2016 年 8 月 15 日成像数据减少了 3 个(新增加 1 个坏像元, 减少 4 个坏像元), 说明发射前后坏像元数量及位置的变化是由于 DPC 发射时的振动影响了传感器; 在轨运行一年后 2019 年 5 月 30 日第 5638 圈成像数据检测出的坏像元数相较于发射后 2018 年 5 月 10 日第 2 圈成像数据增加了 1 个, 说明在轨运行时坏像元数量的变化是由于传感器使用过程中面阵 CCD 感光像元损坏、感光异常。

4.2 偏振通道响应非一致性测量结果

利用由分视场测量方法采集并拼接后的成像数据, 进行偏振通道响应非一致性的相对透过率、低频相对透过率及高频相对透过率校正系数的计算, 得到的相对透过率校正系数如表 2 所示。由表 2 可知,

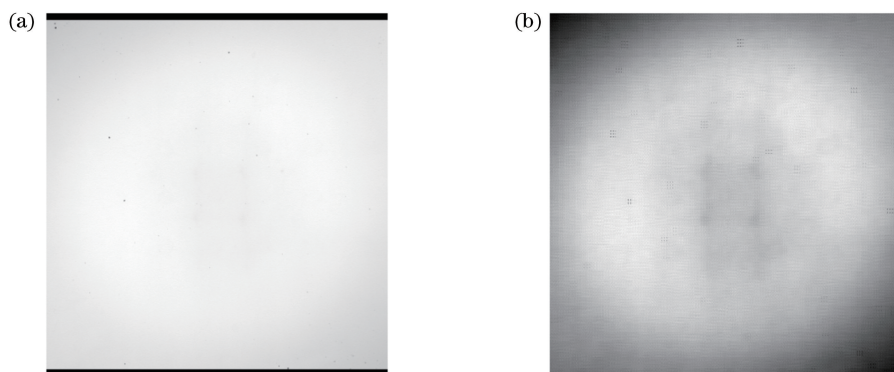


图 9 发射前实验室坏像元检测。(a)原始图;(b)坏像元检测 11×11 区域的合成图

Fig. 9 Detection of bad pixels in laboratory before launch. (a) Original image;
(b) 11×11 area composite graph for detecting bad pixels

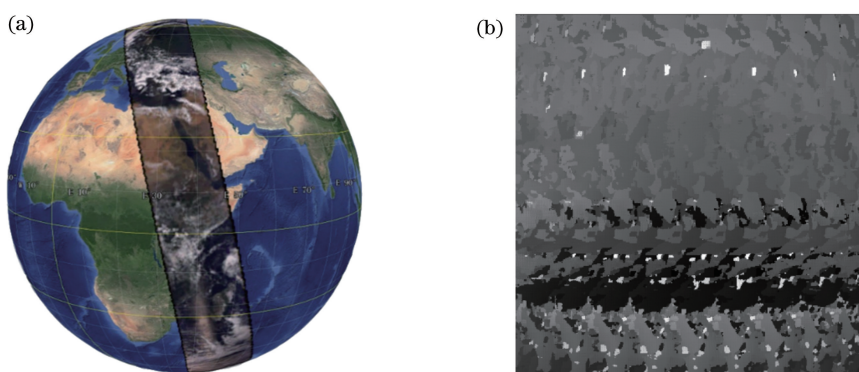


图 10 发射后在轨成像数据坏像元检测。(a)在轨第 2 圈成像数据;(b)坏像元检测 11×11 区域的合成图

Fig. 10 Detection of bad pixels of on-orbit imaging data after launch. (a) The second circle on-orbit imaging data;
(b) 11×11 area composite graph for detecting bad pixels

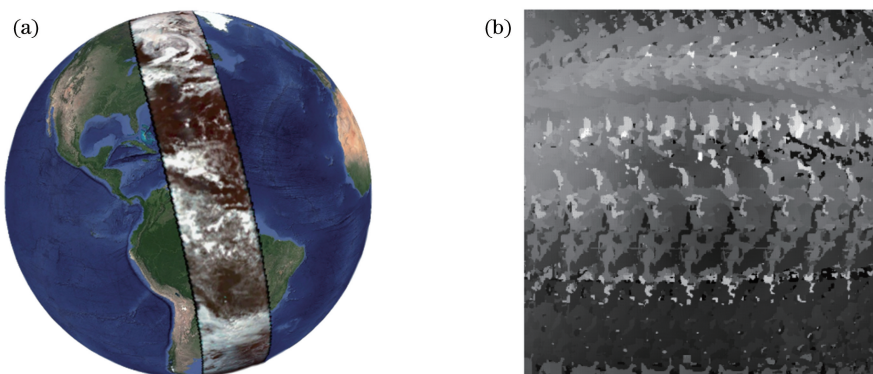


图 11 在轨运行一年后成像数据坏像元检测。(a)在轨第 5638 圈成像数据;(b)坏像元检测 11×11 区域合成图

Fig. 11 Detection of bad pixels of imaging data after one year on-orbit operation. (a) The 5638th circle on-orbit
imaging data; (b) 11×11 area composite graph for detecting bad pixels

670 nm 波段三偏振通道相对透过率差异较大。

图 12(a)为 DPC 670 nm 偏振波段空间低频相对透过率的测量结果,由图可知,在相同入射辐亮度条件下,边缘视场与中心视场低频相对透过率系数相差较大。图 12(b)为 DPC 670 nm P1 偏振通道高频相对透过率的测试结果,由图可知,高频相对透过率数值在 1 附近变化,图中突起和下降差异是由

DPC 探测器像元响应差异引起的。

4.3 测量方案不确定度分析

根据 DPC 偏振通道响应非一致性测量原理,考虑测量装置的各个组成部分及测量过程中环境因素对测量结果的影响,DPC 偏振通道响应非一致性的测量不确定度来源主要有积分球参考光源面均匀性、积分球参考光源角度特性^[18]及 DPC 的非稳定

表 1 坏像元检测结果
Table 1 Detection results of bad pixels

August 15, 2016			May 10, 2018			May 30, 2019		
Line number	Column number	Ratio	Line number	Column number	Ratio	Line number	Column number	Ratio
21	14	2.30	21	14	1.42	21	14	1.39
21	15	1.31	21	15	0.72	21	15	0.68
22	14	0.88	22	14	0.56	22	14	0.51
22	15	0.46	58	274	0.60	58	274	0.64
58	274	0.71	59	274	0.54	59	274	0.57
59	274	0.61	129	18	0.32	129	18	0.31
95	50	0.36	149	53	0.70	149	53	0.68
129	18	0.64	186	95	1.56	186	95	1.55
185	95	0.32	186	94	0.57	186	94	0.49
186	95	1.83	280	118	0.58	280	118	0.54
186	94	0.46	280	117	0.47	280	117	0.48
187	95	0.33	281	117	0.77	281	117	0.78
280	118	0.58	525	118	0.36	502	232	0.60
280	117	0.48				525	118	0.36
281	117	0.76						
525	118	0.49						

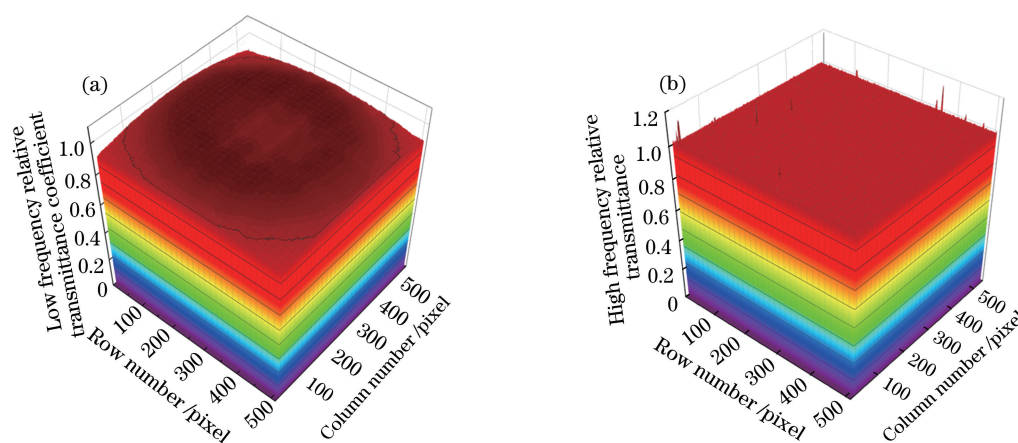


图 12 低频相对透过率与高频相对透过率的计算结果。(a)低频相对透过率;(b)高频相对透过率

Fig. 12 Calculation results of low and high frequency relative transmittances. (a) Low frequency relative transmittance; (b) high frequency relative transmittance

表 2 相对透过率结果
Table 2 Relative transmittance results

Angle / (°)	865 nm	670 nm	490 nm
0	0.992	0.998	1.001
60	1.000	1.000	1.000
120	0.997	1.037	1.015

性。其中,DPC 积分球参考光源成像采集数据的非稳定性受测试环境因素变化、积分球参考光源时间非稳定性及 DPC 自身时间非稳定性等因素影响。积分球的面均匀性是用来评价积分球出光口内不同位置处辐亮度的相对偏差程度,通常使用非均匀性来表征。对积分球面均匀性测试时,将陷阱探测器固定在高精度二维平移台上,分别沿水平方向和垂

直方向移动陷阱探测器(间隔 100 mm)进行网格状测量,测试范围为0~1000 mm。使用数据采集器在各个测试点采样 10 次陷阱探测器输出信号值并取均值,非均匀性计算公式为

$$\mu = \frac{\text{Std}(V_i)}{\bar{V}} \times 100\%, \quad (11)$$

式中: V_i 为出光口内均匀区域测量的电压值; $\text{Std}(V_i)$ 为测量电压值的标准偏差; \bar{V} 为测量电压值的均值。

角度特性表征积分球出光面法线一定角度范围内测量值相对于法线的朗伯偏移量,通常以多个角度的测量值与法线测量值的相对偏差来表述^[18-19]。在进行角度特性测量时,将陷阱探测器固定在角度特性测量旋转台上,在垂直和水平方向上以 2° 间隔旋转探测器进行测量,测量角度范围为 -30°~30°。同样在各个角度测量点采样 10 次取均值,以各角度测量值相对 0° 位置测量值的偏离表征角度特性。

角度特性计算公式为

$$d = \max \left| 1 - \frac{\bar{V}_\theta}{\bar{V}_0} \right|, \quad (12)$$

式中: \bar{V}_θ 为各个测量角度位置处测量的电压均值; \bar{V}_0 为 0° 处测量的电压均值。

图 13 为积分球面均匀性与角度特性测试结果图,表 3 为积分球出光口中心处 64% 有效成像区域的均匀性结果。由图 13(a) 与表 3 可知,有效成像区域面均匀性较好,优于 0.27%。从图 13(b) 角度特性测试曲线可以看出:积分球在垂直方向上低于 -6° 时,角度特性较差,这也是特殊开口形状积分球测量方案精度不如分视场测量方案精度的主要原因之一;在 -6°~6° 区间,水平和垂直方向的角度特性较优,角度特性数值结果如表 4 所示。由图 13(b) 与表 4 可知,DPC 一次分视场定标覆盖的视场角在 -5°~5° 范围内时,角度特性优于 0.006。

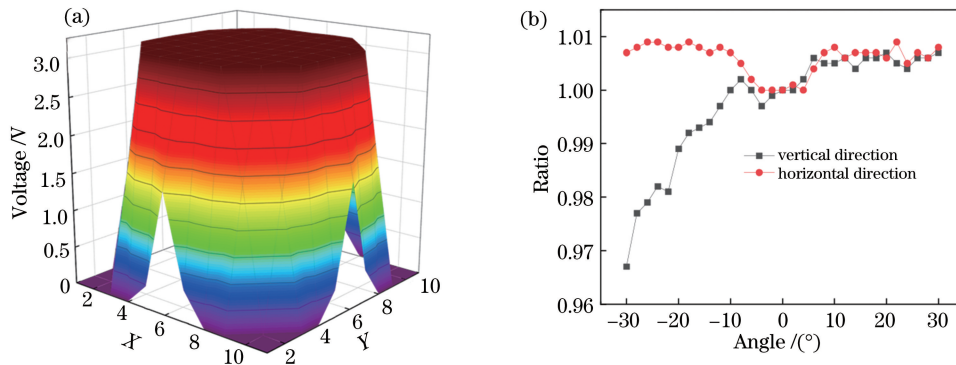


图 13 积分球面均匀性与角度特性的测试结果。(a)面均匀性检测;(b)角度特性测试

Fig. 13 Test results of integral sphere uniformity and angle characteristic. (a) Surface uniformity detection; (b) angle characteristic test curve

表 3 面均匀性测试数据处理结果

Table 3 Processing results of surface uniformity test data

Parameter	Surface uniformity	Standard deviation	Average voltage /V	Maximum voltage /V	Minimum voltage /V
Value	0.27%	0.0085	3.1345	3.1490	3.1180

表 4 角度特性数据处理结果

Table 4 Processing results of angular characteristic data

Angle / (°)	-6	-4	-2	0	2	4	6
Vertical angular characteristic	0	0.003	0.001	0	0	0.002	0.006
Horizontal angular characteristic	0.002	0	0	0	0.001	0	0.004

DPC 非稳定性表征输出像元响应灰度值随时间的变化程度,测试时调整 DPC 处于 0° 视场,再对积分球参考光源成像,以一定的时间间隔持续测量一段时间^[20]。DPC 非稳定性计算公式为

$$N_s = \frac{1}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{N_{\text{total}}} (Y_t - \bar{Y})^2}{N_{\text{total}} - 1}} \times 100\%, \quad (13)$$

式中： N_{total} 为总测试时间内的测量次数； \bar{Y} 为总测试时间内 N_{total} 次测量的像元响应值均值； Y_t 为第 t 次测量时的像元响应值； t 为测量次数序号。

DPC 非稳定性测试时间为 1 h，测试结果如图 14 所示。根据(13)式计算得到 14 个成像通道非稳定性结果，如表 5 所示，可知 DPC 非稳定性结果优于 0.14%。

由此可知，DPC 偏振通道响应非一致性测量合成不确定度 $\delta = \sqrt{\mu^2 + d^2 + N_s^2} = \sqrt{(0.0027)^2 + 0.006^2 + (0.0014)^2} = 0.67\%$ 。

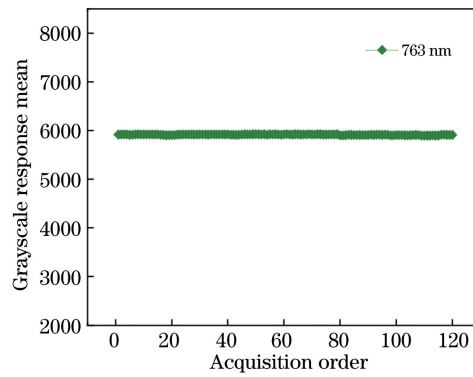


图 14 非稳定性测试结果图

Fig. 14 Result of non-stability test

表 5 非稳定性测试结果

Table 5 Results of non-stability test

Channel	1	3	4	5	6	7	8
Wavelength /nm	565	670 P1	670 P2	670 P3	763	765	865 P1
Non-stability	0.07	0.05	0.06	0.06	0.13	0.14	0.12
Grayscale response mean	3806.96	8104.41	8115.31	8426.37	5914.23	4438.31	5472.28
Channel	9	10	11	12	13	14	15
Wavelength /nm	865 P2	865 P3	910	443	490 P1	490 P2	490 P3
Non-stability	0.12	0.12	0.11	0.08	0.06	0.06	0.07
Grayscale response mean	5516.72	5506.04	7892.56	2336.09	4956.34	4949.27	5029.30

5 结 论

针对 DPC 偏振通道响应非一致性测量需求，对 DPC 偏振通道响应非一致性测量方法进行了研究。分析了 DPC 同一波段三个偏振通道产生响应非一致性的原因，基于实验室现有的大口径积分球参考光源，设计了基于积分球参考光源的 DPC 偏振通道响应非一致性的分视场测量方案。研究了基于时间稳定性的分视场采集成像数据拼接算法和基于对数增强的局部均匀区域坏像元检测算法，解决了 DPC 偏振通道响应非一致性测量的技术难题，实现了对 DPC 偏振通道响应非一致性校正系数的测定。最后对 DPC 偏振通道响应非一致性的测量不确定度进行了分析，通过实验结果可知，基于积分球参考光源的偏振通道响应非一致性测量方法的不确定度优于 0.67%，该测量系统可为生产 DPC 在轨数据产品提供更准确的偏振通道响应非一致性校正系数。

参 考 文 献

[1] Ji E Y, Gu G H, Bai L F, et al. Three-channel polarization imaging systems and system error correction method[J]. Acta Photonica Sinica, 2014,

43(1): 111002.

季尔优, 顾国华, 柏连发, 等. 三通道偏振成像系统及系统误差校正方法[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 111002.

[2] Gu X F, Chen X F, Cheng T H, et al. In-flight polarization calibration methods of directional polarized remote sensing camera DPC [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(7): 070702.

顾行发, 陈兴峰, 程天海, 等. 多角度偏振遥感相机 DPC 在轨偏振定标[J]. 物理学报, 2011, 60(7): 070702.

[3] 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.

[4] Hagolle O, Goloub P, Deschamps P Y, et al. Results of POLDER in-flight calibration [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(3): 1550-1566.

[5] Ren J W, Liu Z X, Wan Z, et al. Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmat space camera with wide viewing field [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(7): 1491-1497.

任建伟, 刘则洵, 万志, 等. 离轴三反宽视场空间相

- 机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1491-1497.
- [6] Thierry B D, Yves A, Laherrere J M. Preflight calibration of the POLDER instrument [J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2553:218-231.
- [7] López-Alonso J M, Alda J. Bad pixel identification by means of principal components analysis [J]. Optical Engineering, 2002, 41(9): 2152-2157.
- [8] Li L, Yang Y Y, Cao P, et al. Automatic discrimination between dusts and digs for large fine optics[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 012001.
李璐, 杨甬英, 曹频, 等. 大口径光学元件表面灰尘与麻点自动判别[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 012001.
- [9] Li L P, Yang J, Liu C Y, et al. An impulse rejection filter based on moving window for artifact removal in R-R interval series[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(9): 1426-1430.
李丽萍, 杨静, 刘澄玉, 等. 滑动窗口脉冲抑制滤波用于心电图间期序列坏点去除[J]. 光电子 • 激光, 2010, 21(9): 1426-1430.
- [10] Yang S J. A new method of removing singular points in dynamic testing data: absolute mean value method and its application study [J]. China Measurement Technology, 2006, 32(1): 47-49, 82.
杨世杰. 动态测试数据中坏点处理的一种新方法: 绝对均值法及应用研究[J]. 中国测试技术, 2006, 32(1): 47-49, 82.
- [11] Zhang M M, Meng B H, Qian H H, et al. Research on correction method of stray light in directional polarization camera[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1112003.
张苗苗, 孟炳寰, 钱鸿鹄, 等. 多角度偏振成像仪杂散光校正方法研究[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1112003.
- [12] Kang Q, Yuan Y L, Li J J, et al. Effect of divergence angle of polarization calibration source on DPC polarization calibration: analysis and validation [J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(2): 203-210.
康晴, 袁银麟, 李健军, 等. 光源发散角对 DPC 偏振定标的影响分析及验证[J]. 遥感学报, 2018, 22(2): 203-210.
- [13] Yuan Y L, Zheng X B, Wu H Y, et al. Uniformity research of integrating spheres reference light source with large exit aperture[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(4): 0422003.
袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 大口径积分球参考光源的均匀性研究[J]. 光子学报, 2015, 44(4): 0422003.
- [14] Li Y F, Li G Z, Gu S H, et al. Image mosaic algorithm based on area blocking and SIFT [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(5): 1197-1205.
李玉峰, 李广泽, 谷绍湖, 等. 基于区域分块与尺度不变特征变换的图像拼接算法[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1197-1205.
- [15] Huang F Y, Li G, He Y Q, et al. Algorithm for laser spot precise locating in omni-directional laser detecting system [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(11): 1224-1228.
黄富瑜, 李刚, 何永强, 等. 全向激光探测系统中光斑精确定位方法研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(11): 1224-1228.
- [16] Han T, Goodenough D G, Dyk A, et al. Detection and correction of abnormal pixels in Hyperion images [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, June 24-28, 2002, Toronto, Ontario, Canada. New York: IEEE, 2002: 1327-1330.
- [17] Qian F, Jia J J, Zhang L, et al. Defective pixel correction of spot-detecting camera in satellite-to-ground laser communication ATP system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 0505007.
钱锋, 贾建军, 张亮, 等. 星地激光通信 ATP 系统探测相机的坏点校正[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505007.
- [18] Xie P, Wu H Y, Zheng X B, et al. Automatic directional radiometric testing system for large aperture integrating spheres[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 1943-1950.
谢萍, 吴浩宇, 郑小兵, 等. 大口径积分球方向辐射特性自动测试系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 1943-1950.
- [19] Yuan Y L, Xu J, Zhai W C, et al. Design and test of a spectrally tunable integrating sphere reference light source with large exit aperture [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0712004.
袁银麟, 徐骏, 翟文超, 等. 大孔径可调光谱积分球参考光源研制和检测[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0712004.
- [20] 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: 63-84.
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: 63-84.