

星载多角度偏振成像仪测量精度验证与偏差分析

张苗苗^{1,2,3**}, 孟炳寰^{1,3*}, 骆冬根^{1,3}, 杨本永^{1,3}, 提汝芳³, 洪津^{1,3***}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 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, 安徽 合肥 230031

摘要 为了检验星载多角度偏振成像仪(DPC)在自然目标下的偏振和辐射定标精度,设计了测量精度验证试验。在晴朗天气对天空成像,得到了天空的偏振度和辐亮度数据,并将其与同时观测的 CE318 型太阳-天空偏振辐射计的数据进行了比对。结果显示:三个偏振波段的平均偏振度差异小于 0.02,满足 DPC 偏振测量精度的指标要求,但辐亮度差异较大。修正定标光源与测量目标间光谱非匹配的影响,两台仪器观测波段、观测视场非一致性的影响以及系统偏差后,两台仪器 490 nm 和 670 nm 通道的平均辐亮度的差异小于 1%,865 nm 通道的平均辐亮度差异小于 2%,验证了 DPC 定标数据的有效性和仪器的测量精度。

关键词 测量; 多角度偏振成像仪; 测量精度验证试验; CE318 型太阳-天空偏振辐射计; 辐亮度; 偏振度

中图分类号 TH744

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0812004

Measurement Precision Verification and Deviation Analysis of Spaceborne Directional Polarimetric Camera

Zhang Miaomiao^{1,2,3**}, Meng Binghuan^{1,3*}, Luo Donggen^{1,3},

Yang Benyong^{1,3}, Ti Rufang³, Hong Jin^{1,3***}

¹Anhui 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;

³Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract In order to verify the polarization and radiation calibration precision of the directional polarization camera (DPC) under natural targets, a verification experiment of measurement precision is designed. The data of the degree of polarization and radiation luminance for sky are obtained by imaging the sky in a clear weather and these data are compared with the simultaneous observation data by the CE318 sun-sky radiometer. The results show that, the average difference of the degree of polarization for the three polarization bands is smaller than 0.02, which meets the requirements of the polarization measurement precision of DPC, but the radiation luminance difference is big. After the correction of system deviation, the effect of the spectral non-matching between the calibration light source and target, and the effect of the inconsistency of the observation waveband and the observation visual field of two instruments, the average difference of radiation luminance for 490 nm and 670 nm channels of two instruments is less than 1%, and for the 865 nm channel is less than 2%, which verifies the validity of calibration data of DPC and the measurement precision of instruments.

Key words measurement; directional polarimetric camera; measurement precision verification experiment; CE318 sun-sky polarimetric radiometer; radiation luminance; degree of polarization

OCIS codes 120.5410; 120.4640

收稿日期: 2018-02-02; 修回日期: 2018-03-28; 录用日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(41405037)、高技术项目(CXJJ-16S005)、高分辨率对地观测系统重大专项(民用部分)(30-Y20A19-9007-15/17)

* E-mail: bhmeng@aiofm.ac.cn; ** E-mail: zhmf76@mail.ustc.edu.cn; *** E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

1 引 言

星载多角度偏振成像仪(DPC)是由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的一种超广角、画幅式、低畸变偏振成像仪,计划搭载卫星进行对地大气遥感观测^[1-2]。其主要任务与功能是获取多角度、多光谱偏振辐射数据,提供全球大气气溶胶和云特性数据产品,同时为其他载荷提供同步大气校正数据^[3-4]。测量精度是衡量仪器性能的重要技术指标之一,对气溶胶参数的反演具有重要的意义^[1]。仪器主要模型参数的定标已在试验室中完成,并使用可调偏振度光源^[5]验证了仪器的偏振探测精度,在偏振度为0~0.4的部分偏振光的入射下,中心、0.3、0.6、0.9视场偏振度的测量差异小于0.013^[6]。但作为星载多光谱遥感器,除了试验室单一光源的测试数据外还应有自然目标下的测试数据。这一方面可以检验自然目标下仪器的偏振、辐射定标系数,另一方面可以检验星载DPC与国际标准仪器的测量结果是否一致,从而验证仪器的辐射和偏振测量精度。

太阳-天空偏振辐射计具有高度自动化特性及较高的观测精度,是目前使用最广泛的地基观测设备之一。太阳-天空辐射计观测网也是目前整层大气气溶胶参数获取精度较高、参数较全面的观测手段,可以作为验证卫星遥感领域大气数据的参考标准^[7-8]。其中法国CIMEL公司开发的CE318型太阳-天空偏振辐射计是气溶胶自动网络(AERONET)^[9]、太阳-天空辐射计观测网(SONET)^[10]等的标准测量设备,可以观测太阳直射辐射和天空多角度散射辐射,其测量精度依赖于仪器的定标精度^[11]。CE318的定标方法有Langley法、外场交叉传递定标法和试验室积分球辐射源定标法^[12-14]。选用CE318天空漫射观测通道的偏振测量模式,其绝对辐亮度响应由试验室积分球辐射源标定,联合标准不确定度为3%~5%^[9]。星载DPC的绝对辐射测量精度为5%^[15],因此把CE318太阳-天空辐射计天空漫射观测通道的测量结果作为验证星载DPC外场数据的参考标准。

基于上述情况,本文根据大气气溶胶的探测原理,通过DPC与CE318型太阳-天空辐射计同步观测,分别获取了天空辐亮度和偏振度数据,并对两仪器数据进行了比对分析,验证了DPC定标数据的有效性、数据处理流程的正确性及仪器的测量精度。

2 星载 DPC 的工作原理

星载DPC^[2]采用大视场光学系统加面阵电荷耦合器件(CCD)探测器,通过滤光检偏组件转动切换光谱波段和检偏方向以分时获取大气偏振成像信息,其光学系统结构图如图1所示。仪器总视场为118.74°,探测器为帧转移面阵CCD,有效成像像元数为512×512,工作波长范围为400~1000 nm,且线性度良好(最大线性误差小于0.17%)。仪器共有15个通道,设置了8个波段,其中3个为偏振波段(490,670,865 nm),5个为非偏测量波段(443,565,763,765,910 nm),另外一个挡光通道用来测量暗电流。每个偏振测量波段分别采用三个相对偏振方向(0°,60°,120°)对同一地物进行拍摄,根据拍摄所得三幅图像对应像元的输出数据,通过定标的测量矩阵即可得到被测目标在观测视场方向上的辐射偏振信息。仪器的技术指标要求绝对辐射的测量精度优于5%,偏振度的测量精度优于0.02。



图1 光学系统结构

Fig. 1 Structural diagram of optical system

星载DPC的斯托克斯参量反演关系式^[1]可表示为

$$\begin{bmatrix} I_{0i,j} \\ Q_{0i,j} \\ U_{0i,j} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{i,j}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} D_{1i,j} \\ D_{2i,j} \\ D_{3i,j} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 i, j 为像元坐标位置; $I_{0i,j}, Q_{0i,j}, U_{0i,j}$ 为入射光束的斯托克斯向量; \mathbf{M} 为仪器的传输矩阵,已通过定标试验获得,每一个像元均为 3×3 的Mueller矩阵; $D_{1i,j}, D_{2i,j}, D_{3i,j}$ 分别为三个偏振通道P1、P2、P3探测器的响应灰度值。则入射光束的辐亮度和偏振度分别为

$$L_{0i,j} = A^k \cdot I_{0i,j}, \quad (2)$$

$$P_{0i,j} = \sqrt{|Q_{0i,j}|^2 + |U_{0i,j}|^2} / |I_{0i,j}|, \quad (3)$$

式中 A^k 为 k 波段的绝对辐射定标系数。

3 测量精度验证试验

3.1 星载 DPC 的测量试验及结果

测量精度验证试验通过DPC对天空成像,得到

辐亮度和偏振度数据,并与 CE318 太阳辐射计的测试数据进行比对,从而验证 DPC 的辐射测量精度和偏振测量精度。试验环境要求天气晴朗,湿度不高于 60%,试验期间太阳高度角变化缓慢,太阳不在光机头部视场范围内。因此选择时间大约为上午 11 时至下午 14 时之间。为了避免太阳直射光,整个试验装置放置在大楼阴影区,DPC 镜头朝上并设计了仪器保护箱,DPC 的光机头部用水平仪调平以使光轴指向天空正上方,利用罗盘调整仪器的 +X 方向指向正北方向,试验现场如图 2 所示。

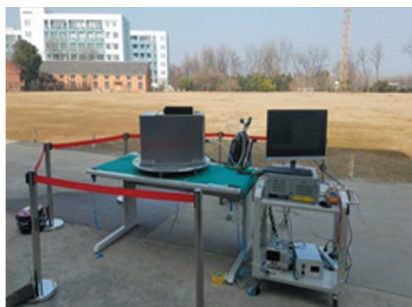


图 2 DPC 试验现场图

Fig. 2 Test site image of DPC

DPC 采用在轨工作模式进行数据采集,原始成像图如图 3 所示,图片左下角为房屋的成像信息,右边为天空的成像信息。取天空的成像数据进行处理,处理流程如图 4 所示,原始图像分别进行暗电流校正、帧转移效应校正^[16]、杂散光校正^[17]和全像面相对响应率校正,再根据 DPC 偏振通道的参数反演关系式得到偏振参量 $I_{0i,j}, Q_{0i,j}, U_{0i,j}$,进而求得天空的辐亮度和偏振度。由于外场的环境温度与试验室温度不一致,CCD 响应率降低^[18],需要用温度系数修正绝对辐射响应。490,670,865 nm 的外场温度系数分别为 $R_{T490\text{ nm}}=1.0063, R_{T670\text{ nm}}=1.0048,$

$R_{T865\text{ nm}}=1.0105$ 。图 5 所示为星载 DPC 670 nm 通道晴朗天空的辐亮度和偏振度结果,数据结果表明大气相对均匀稳定,天空辐亮度和偏振度变化缓慢。



图 3 DPC 原始成像

Fig. 3 Original image of DPC

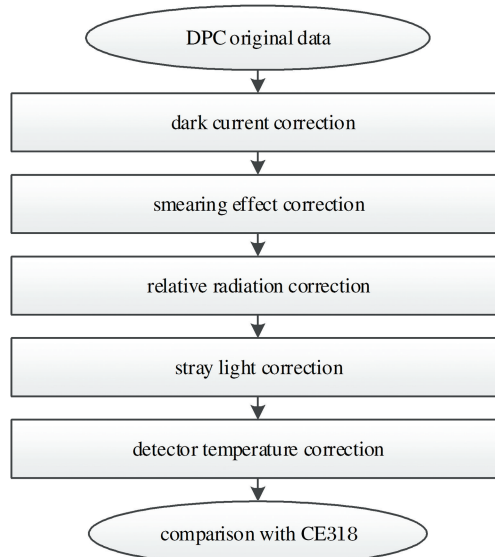


图 4 DPC 数据处理流程

Fig. 4 Flow chart of data processing of DPC

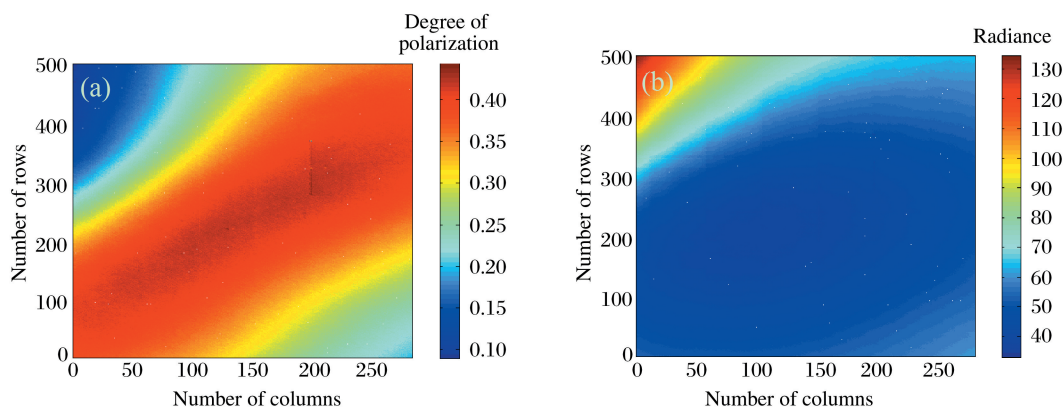


图 5 DPC 数据处理结果。(a) 670 nm 天空偏振度; (b) 670 nm 天空辐亮度

Fig. 5 Data processing results of DPC. (a) Degree of polarization of sky under 670 nm;

(b) radiation luminance of sky under 670 nm

3.2 CE318 的测量试验及结果

测量精度验证试验选用的太阳-天空偏振辐射计是法国 CIMEL 公司生产的 CE318N, 波段有 9 个: 1020, 1640, 937, 870, 675, 440, 500, 380, 340 nm, 带宽均为 10 nm。在天空光的观测方式上, CE318N 采用太阳主平面 (SPP) 和平纬圈 (ALM) 两种扫描方式, 其中偏振测量只能在 SPP

上进行。选择具有偏振测量的主平面扫描模式, 工作示意图如图 6(a) 所示, 观测方位角保持在 SPP 上, 通过改变观测天顶角获得天空光的角度分布信息 (偏振模式 $-85^{\circ} \sim 85^{\circ}$, 偏振每 5° 测量一次, 共 35 个角度数据)。CE318N 的测量现场图如图 6(b) 所示。

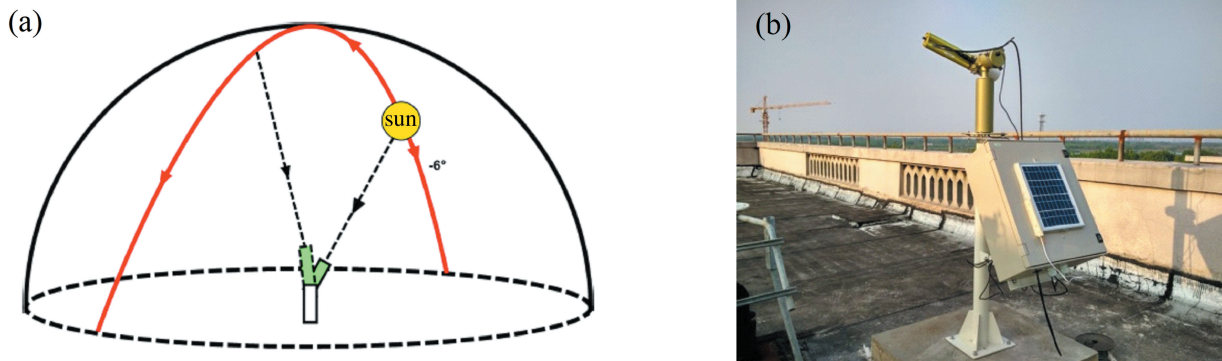


图 6 CE318N 工作示意图。(a) SPP 内扫描示意图; (b) 测量现场图

Fig. 6 Working diagram of CE318N. (a) Schematic of SPP interscan; (b) test site image

CE318N 通过滤光片和偏振片的组合实现多波长偏振的分时测量, 偏振轮上的 9 个偏振片分为 3 组, 每组 3 片。观测时, 每组 3 个偏振片的偏振轴夹角为 60° 。在任一波段, 假设通过 3 个偏振片测量到的辐射信号分别为 L_{P1} , L_{P2} 和 L_{P3} , 则入射光的辐亮度 L 和线偏振度 P 分别为

$$\begin{cases} L = \frac{2}{3} (L_{P1} + L_{P2} + L_{P3}) \\ P = \frac{2\sqrt{L_{P1}^2 + L_{P2}^2 + L_{P3}^2 - L_{P1}L_{P2} - L_{P2}L_{P3} - L_{P1}L_{P3}}}{L_{P1} + L_{P2} + L_{P3}} \end{cases} \quad (4)$$

根据 (4) 式计算 CE318N 太阳-天空偏振辐射计的天空散射辐射在 500, 675, 870 nm 通道的偏振度和辐亮度, 结果如图 7 所示。

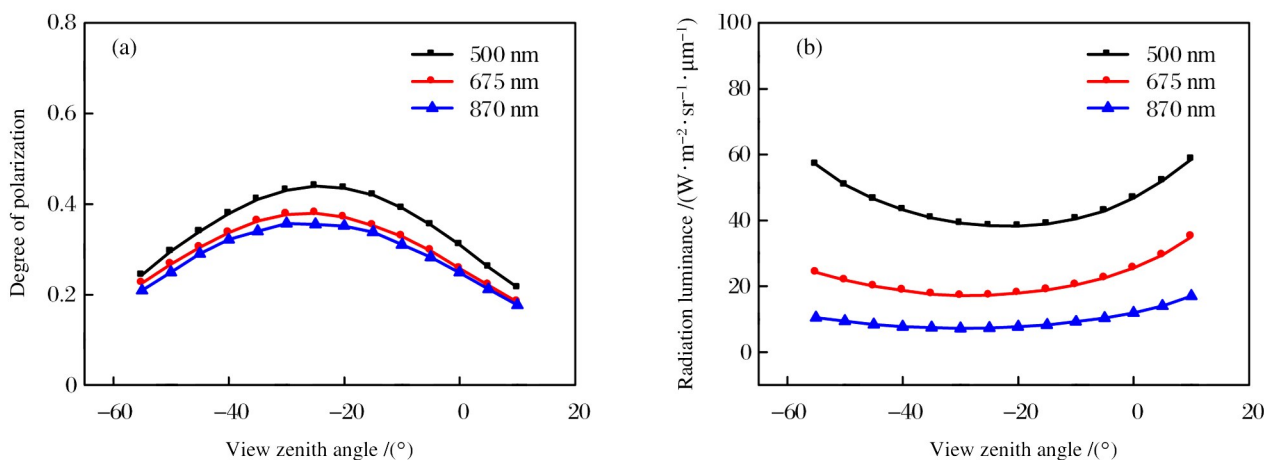


图 7 CE318N 的数据处理结果。(a) 天空偏振度; (b) 天空辐亮度

Fig. 7 Data processing results of CE318N. (a) Degree of polarization of sky; (b) radiation luminance of sky

3.3 数据对比

选择同一时刻、同一天空位置两个仪器测得的偏振度和辐亮度数据进行对比。某一时刻 SPP 偏振扫描模式下,太阳方位角为 220° , CE318N 的扫描视场角为 $-85^\circ \sim 85^\circ$ (以 5° 为间隔), 其中与 DPC 对应的为 $-55^\circ \sim 10^\circ$ ($15^\circ \sim 55^\circ$ 是房屋成像信息)。对比结果如图 8 所示, 辐亮度差异用 ΔI 表示, 即 $\Delta I = (I_{DPC} - I_{CE318N}) / I_{CE318N}$, 其中 I_{DPC} 、 I_{CE318N} 分别为 DPC 与 CE318N 的辐亮度测量结果; 偏振度差异用

ΔP 表示, 即 $\Delta P = P_{DPC} - P_{CE318N}$, 其中 P_{DPC} 、 P_{CE318N} 分别为 DPC 与 CE318N 的偏振度测量结果。相对于 CE318N 的结果, 星载 DPC 490, 670, 865 nm 通道的偏振度差异基本都在 0.02 以内。490 nm 通道的辐亮度差异均在 $\pm 5\%$ 以内; 670 nm 通道 DPC 的辐亮度均小于 CE318N 的, 且 -40° 与 $-5^\circ \sim -10^\circ$ 视场的辐亮度差异大于 -5% ; 865 nm 通道 DPC 的辐亮度均大于 CE318N 的, 且 -20° 视场的辐亮度差异最大, 为 5.48%。

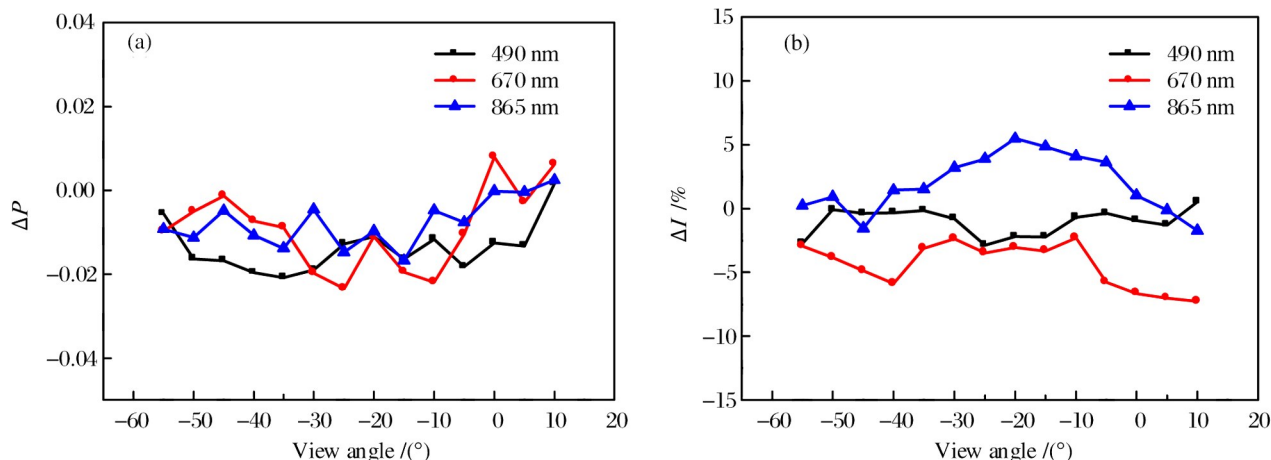


图 8 CE318N 与 DPC 的数据对比结果。(a) 偏振度; (b) 辐亮度

Fig. 8 Data comparison of DPC and CE318N. (a) Degree of polarization; (b) radiation luminance

4 偏差分析

由初步对比结果可知, 星载 DPC 三个偏振通道的偏振度相对于 CE318N 的差异基本在 0.02 以内, 满足偏振测量的精度要求, 进一步验证了在外场自然目标下偏振定标矩阵的准确性, 而辐亮度的对比结果差异较大。分析误差的来源, 可能有以下几个方面的因素: DPC 定标光源与待观测目标的光谱非匹配、DPC 与 CE318N 对应波段的中心波长和带宽不一致、两台仪器的瞬时视场角的不一致等。

首先, 通过数值模拟计算, 定量分析了定标光源与待观测目标的光谱非匹配对 DPC 测量结果的影响, 结果如图 9 所示^[19], 其中红线为试验室中所用定标光源的光谱辐亮度曲线, 黑线为基于 MODTRAN 软件模拟的天空散射光的光谱辐亮度曲线。以 865 nm 通道为例, 计算了 DPC 在两种光谱分布下的测量结果。图 10 所示为 DPC 865 nm 通道的整机光谱响应曲线, 可以看出斜度较大, 长短波响应度的差异明显。当带宽内的平均辐亮度一致

时, 得到了 865 nm 通道分别在积分球定标光源和天空散射光两种光谱下的带内响应曲线, 带内积分得到最终的响应结果, 如图 11 所示。基于同样的方法计算了 490 nm 和 670 nm 通道的响应曲线。

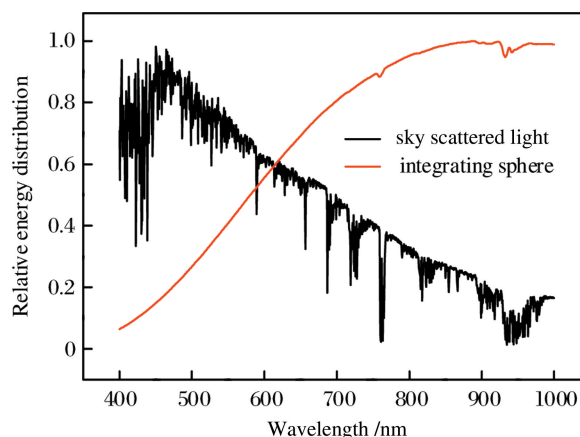


图 9 积分球光源和天空散射光的光谱分布

Fig. 9 Spectral distributions of integrating sphere and sky scattered light

用相对误差 E_R 表示光谱非匹配对 DPC 测量结果的影响:

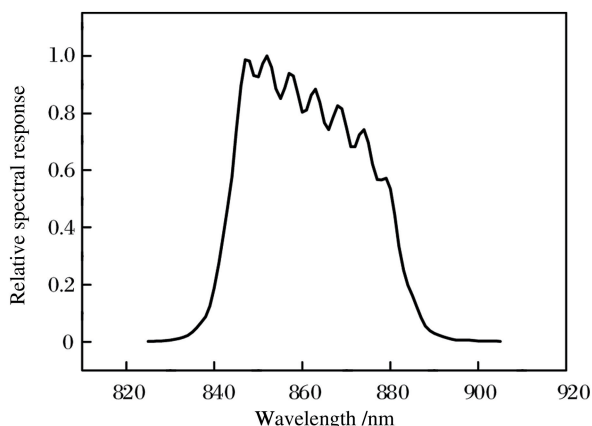


图 10 865 nm 通道 DPC 的光谱响应曲线
Fig. 10 Spectral response curve of DPC for 865 nm channel

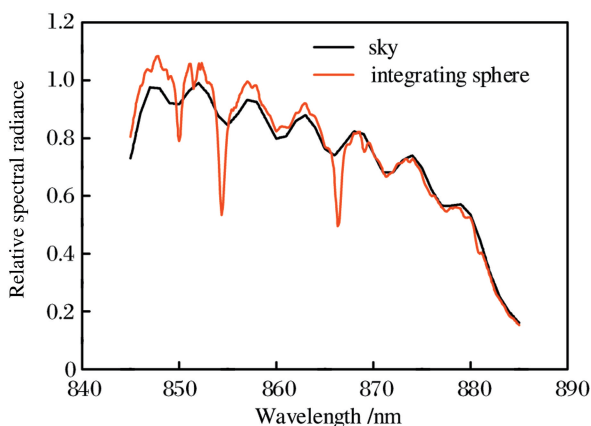


图 11 865 nm 通道不同光谱下带宽内的响应曲线
Fig. 11 Response curves within different spectral bandwidths for 865 nm channel

$$E_R = \frac{|M_S - M_C|}{M_C} \times 100\%, \quad (5)$$

式中 M_S 为天空谱 DPC 的测量结果, M_C 为积分球卤灯谱 DPC 的测量结果。相对误差的结果见表 1。

表 1 光谱非匹配对测量结果的影响

Table 1 Effect of spectral mismatch on measurement results

DPC channel	Bandwidth/nm	$E_R/\%$
490 nm	20	0.4
670 nm	20	0.4
865 nm	40	1.1

从模拟计算的结果可以看出,定标光源与天空目标谱的不匹配对 DPC 测量结果的影响较小,490 nm 和 670 nm 的相对误差只有 0.4%,865 nm 的为 1.1%。光谱非匹配产生的相对误差与待测谱的形状、仪器的带宽和整机的光谱响应曲线有关,待测目标与定标光源的光谱差异较大时,此误差需要

进行评估计算并校正。

其次,分析由仪器通道的光谱非匹配造成的观测目标的差异。DPC 与 CE318N 的对应波段信息见表 2,两台仪器的光谱响应曲线如图 12 所示,490 nm 通道中心波长的最大差异为 10 nm。天空谱线如图 9 所示,计算同一天空谱下两台仪器在各自带宽内的平均辐亮度,得相对误差结果如下:490 nm 通道的为 3.66%,670 nm 通道的为 0.89%,865 nm 通道的为 3.26%。由此可知,由 DPC 与 CE318N 的光谱不匹配造成的测量差异较大,需要修正。因此,比对试验的两台仪器应要求其对应波段的光谱响应一致;若中心波长和带宽有偏差,在结果中要校正仪器光谱非匹配引入的测量误差。

表 2 DPC 与 CE318N 波段的对应表

Table 2 Waveband mapping between DPC and CE318N

DPC		CE318N	
Band/nm	Bandwidth/nm	Band/nm	Bandwidth/nm
490	20	500	10
670	20	675	10
865	40	870	10

最后分析仪器视场不匹配导致的辐亮度误差。CE318N 的视场角为 1.3° ,DPC 中心视场单像元的视场角为 0.269° 。选择与 CE318N 视场角对应的像元进行合并,计算像元合并后平均辐射值和单像元辐射值的差异。该情况下相对误差 E_1 的计算公式为

$$E_1 = \frac{|M_p - M_{avg}|}{M_{avg}} \times 100\%, \quad (6)$$

式中 M_p 为单像元 DPC 的测量结果, M_{avg} 为像元合并 DPC 的测量结果。各视场辐亮度的相对误差结果如图 13 所示,可以看出,由视场不匹配造成的平均误差小于 1%,符合天空辐亮度变化缓慢的规律。

综上所述,由积分球光源与天空散射光的光谱不匹配和仪器视场不匹配引入的辐亮度测量误差都比较小;而由仪器通道光谱的非匹配造成的观测目标的辐亮度误差较大。因此,对比试验要根据两台仪器的参数,评估光谱匹配、视场匹配的影响,并根据影响大小进行校正。

在初步比对结果的基础之上修正了上述三种因素的影响,测量精度验证试验的最终结果如图 14 所示。DPC 的 490,670,865 nm 通道的辐亮度与 CE318N 的平均差异仍有 -5% ,部分视场大于 -5% 。分析差异原因,可能是 DPC 自身的绝对辐射测量不确定度大,也有可能是两台仪器绝对辐射测量的差异。

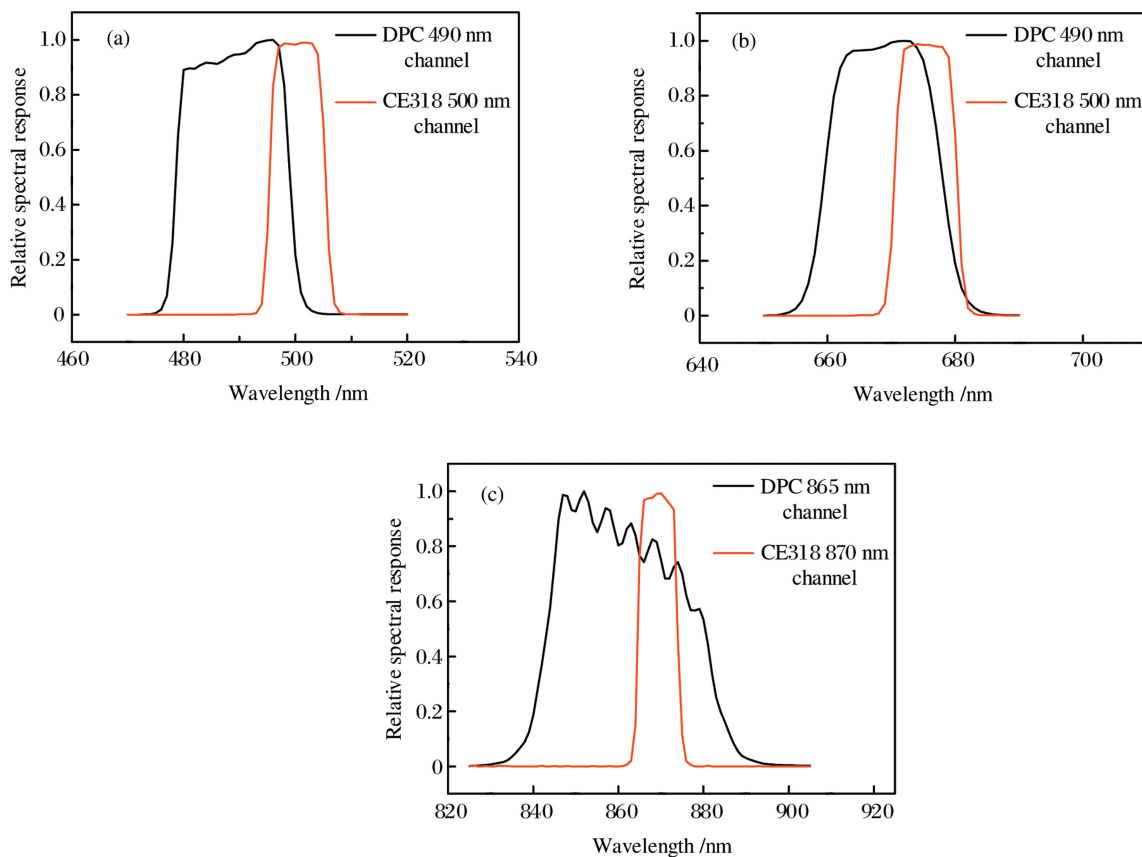


图 12 DPC 与 CE318 的仪器光谱响应曲线。(a) 490 nm 通道;(b) 670 nm 通道;(c) 865 nm 通道

Fig. 12 Spectral response curves of DPC and CE318 instruments.

(a) 490 nm channel; (b) 670 nm channel; (c) 865 nm channel

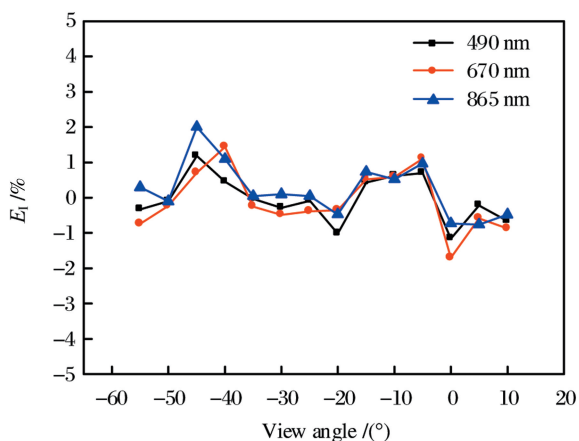


图 13 视场不匹配产生的测量结果的相对误差

Fig. 13 Relative error of measurement induced by visual field mismatch

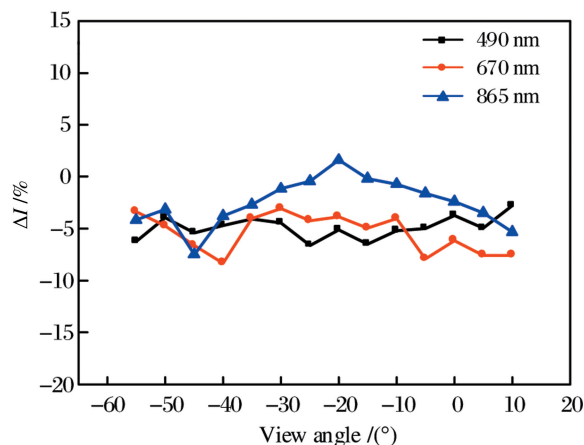


图 14 CE318N 与 DPC 辐亮度的对比结果

Fig. 14 Radiation luminance comparison between DPC and CE318N

进一步分析两台仪器绝对辐亮度测量的固有偏差。DPC 基于试验室的积分球辐射源实现绝对辐射定标,辐射标准可溯源于中国计量科学研究所的一级辐照度标准灯;其传递链路为:基于标准灯-漫

射板系统,通过光谱辐射计(SVC)对积分球辐射源系统进行辐亮度标准传递,积分球辐射源作为工作标准对 DPC 进行辐亮度响应度标定。而 CE318N 通过高山交叉定标实现绝对辐射定标,参考标准为

西班牙 Izane 高山站的主仪器,其传递链路利用标准仪器对比方法获得待定标仪器的定标参数。两台仪器的定标方法、溯源标准及传递链路均不同,绝对辐亮度测量可能会存在差异。因此,采用对比测试方案,使两台仪器同时观测均匀稳定的目标,计算其辐亮度测量结果的相对误差。积分球光源稳定性高、均匀性好,是较为理想的均匀漫射参考光源,因此使用 DPC 和 CE318N 同时观测试验室积分球。测试示意图如图 15 所示,DPC 观测的辐亮度由 SVC 传递,带内平均测量结果的差异见表 3,其中 I_{SVC} 为 SVC 的辐亮度测量结果, I_{SVC}/I_{CE318N} 为 DPC 与 CE318N 的绝对辐亮度测量的相对误差。由表 3

可知,CE318N 测量的绝对辐亮度值均大于 DPC 测量的,且两者的差异在 4%~6%之间。

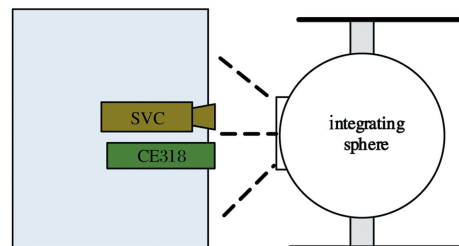


图 15 绝对辐射定标系数差异的测试示意图

Fig. 15 Schematic of test of absolute radiation calibration coefficient difference

表 3 CE318N 与 DPC 绝对辐亮度测量的相对误差

Table 3 Relative error of absolute radiation measurement between DPC and CE318N

Wavelength/nm	$I_{SVC}/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	$I_{CE318N}/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1})$	$I_{SVC}/I_{CE318N}/\%$
500	132.72	140.05	94.77
670	369.72	389.63	94.13
870	502.02	524.87	95.65

将二者辐亮度测量的相对修正因子代入上述对比的结果,发现 490 nm 和 670 nm 通道的平均辐亮度差异小于 1%,865 nm 通道的平均辐亮度差异小于 2%。此结果有力验证了 DPC 定标数据的有效性、数据处理流程的正确性及仪器的测量精度,也说明了 DPC 与 CE318N 对比的最大辐亮度差异来源于两台仪器自身绝对辐射测量的固有偏差。这个偏差可能是 CE318N 仪器自身的老化导致,随着仪器工作时间的推移,电子系统和光学系统的性能都可能发生变化,自然环境、仪器损耗等因素也会导致仪器的定标系数发生变化;也有可能两台仪器自身的辐射标准不一致。后续工作将对 CE318 重新定标,进一步核实 CE318N 的辐射标准,研究辐射标准之间的差异;建议将基于 SVC 传递的 DPC 的绝对辐射定标系数保留,待研究辐射标准之间的差异后,在原系数的基础之上修正差异,保证 DPC 绝对辐射的测量精度与国际标准一致。

5 结 论

使用星载 DPC 对天空成像,解析得到了定量偏振辐射数据,并将辐亮度和偏振度的结果与地基太阳-天空偏振辐射计 CE318N 的同步观测数据进行了对比。结果显示,三个偏振通道的偏振度偏差小

于 0.02,说明 DPC 在外场自然目标场景下,可以获得高精度的偏振数据,但辐亮度偏差较大。对可能造成辐亮度误差的因素进行了定量分析,结果显示,由积分球光源与天空散射光光谱的非匹配导致的辐亮度测量误差最大为 1.1%;两台仪器视场不匹配引入的辐亮度平均误差为 1%;而由两台仪器光谱的非匹配造成的辐亮度误差超过了 3%。在误差修正后,辐亮度差异仍超过 5%。进一步研究发现,两台仪器绝对辐亮度测量的固有偏差为 4%~6%,主要来源于两台仪器绝对定标系数的不一致性。后续工作将深入研究 DPC 和 CE318N 的绝对辐射定标系统之间的误差。

研究结果有力验证了星载 DPC 在外场自然目标场景下定标系数及数据处理流程的正确性。另外,试验获取的高精度偏振辐射数据可为气溶胶多参数反演提供有效依据,有助于 DPC 反演算法的开发、优化和测试。

参 考 文 献

- [1] Qian H H, Meng B H, Yuan Y L, *et al.* Full field of view polarization effect measurement and error analysis of non-polarized channels of spaceborne directional polarimetric camera[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(10): 100701.

- 钱鸿鹄, 孟炳寰, 袁银麟, 等. 星载多角度偏振成像仪非偏通道全视场偏振效应测量及误差分析[J]. 物理学报, 2017, 66(10): 100701.
- [2] Yang W F, Hong J, Qiao Y L. 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.
- [3] Sun Y Z, Jiang G W, Li Y D, *et al.* Hyper-spectral observation satellite and its application prospects[J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(3): 1-13.
孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 等. 高光谱观测卫星及应用前景[J]. 上海航天, 2017, 34(3): 1-13.
- [4] 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.
- [5] Kang Q, Li J J, Chen L G, *et al.* Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412003.
康晴, 李健军, 陈立刚, 等. 大动态范围可调线性偏振度参考光源检测与不确定度分析[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412003.
- [6] Qian H H. Laboratory full field of view polarization calibration of directional polarimetric camera[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017: 77-83.
钱鸿鹄. 宽视场航空偏振成像仪的实验室定标研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017: 77-83.
- [7] 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, 2000, 105(D8): 9791-9806.
- [8] Oleg D, Michael D K. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105 (D16): 20673-20696.
- [9] Holben B N, Eck T F, Slutsker I, *et al.* AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66(1): 1-16.
- [10] Li Z Q, Li D H, Li K T, *et al.* Sun-sky radiometer observation network with the extension of multi-wavelength polarization measurements[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(3): 495-519.
李正强, 李东辉, 李凯涛, 等. 扩展多波长偏振测量的太阳-天空辐射计观测网[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 495-519.
- [11] 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(13): 847-875.
- [12] Li Z Q, Philippe G, Luc B, *et al.* Method to intercalibrate sunphotometer constants using an integrating sphere as a light source in the laboratory[J]. Applied Optics, 2015, 52(11): 2226-2234.
- [13] Li K T, Li Z Q, Li D H, *et al.* Transfer method to calibrate the normalized radiance for a CE318 Sun/sky radiometer[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(4): 041001.
- [14] Schmid B, Wehrli C. Comparison of sunphotometer calibration by use of the Langley technique and the standard lamp[J]. Applied Optics, 1995, 34(21): 4500-4512.
- [15] Qian H H, Ye Q H, Meng B H, *et al.* The polarized radiometric theoretical error of spaceborne directional polarimetric camera[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(4): 1558-1565.
钱鸿鹄, 叶擎昊, 孟炳寰, 等. 星载多角度偏振成像仪偏振辐射测量的理论误差分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(4): 1558-1565.
- [16] Keith P, Deeph C, David F, *et al.* Restoration and frequency analysis of smeared CCD images[J]. Applied Optics, 1999, 38(8): 1343-1347.
- [17] Zhang M M, Meng B H, Qian H H, *et al.* Research on correction method of stray light in directional polarimetric 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.
- [18] Lesser M P. Improving CCD quantum efficiency[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2198: 782-793.
- [19] Chen F, Zheng X B. Influence of spectrum non-matching on calibration precision of remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(3): 415-419.
陈风, 郑小兵. 光谱非匹配对光学遥感器定标精度的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 415-419.