

光学学报

星载偏振扫描仪发射前定标及地面验证实验

李朕阳^{1,2,3**}, 刘振海^{1,3*}, 邹鹏^{1,3}, 朱双双^{1,2,3}, 雷雪枫^{1,2,3}, 陶菲^{1,3},
提汝芳^{1,3}, 宋茂新^{1,3}, 洪津^{1,2,3***}

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, 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 高精度偏振扫描仪(POSP)采用分孔径和分振幅的同时偏振测量技术,可获取目标的高精度多光谱偏振辐射信息,其测量精度是影响载荷在轨应用的关键指标之一。仪器研制完成后,实验室条件下完成偏振和辐射定标以及测量精度的评估。为检验实验室定标结果,开展自然目标探测下的地面验证实验,使用 POSP 在晴朗天气沿太阳主平面对天空进行扫描,将获取的天空辐亮度和偏振度数据与同时刻由 CE318N 太阳-天空偏振辐射计采集的数据进行对比,并讨论影响两台仪器数据的因素。实验结果表明,两台仪器的辐亮度一致性偏差小于 4%,偏振度一致性偏差小于 0.005,具有较好的一致性,验证 POSP 实验室定标的准确性及自然目标下的探测能力,可为后续星载数据的处理和应用提供依据。

关键词 测量; 偏振扫描仪; CE318N 太阳-天空偏振辐射计; 定标; 偏振测量; 辐射测量

中图分类号 P407.4; TH744

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0312002

Prelaunch Calibration and Ground Verification Test of Spaceborne Particulate Observing Scanning Polarimeter

Li Zhenyang^{1,2,3**}, Liu Zhenhai^{1,3*}, Zou Peng^{1,3*}, Zhu Shuangshuang^{1,2,3},
Lei Xuefeng^{1,2,3}, Tao Fei^{1,3}, Ti Rufang^{1,3}, Song Maoxin^{1,3}, Hong Jin^{1,2,3***}

¹Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institute of Physical Science,
Chinese Academy of Science, 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 High precision polarization-scanner (POSP) can obtain high precision multispectral polarization-radiation information of the target by using the simultaneous polarization-measurement technology of partial aperture and partial amplitude. Its measurement accuracy is one of the key indexes affecting in-orbit application of load. After the instrument is developed, polarization and radiometric calibration and measurement accuracy evaluation are completed under laboratory conditions. To test laboratory calibration results, we carry out the natural target detection under the ground of the verification experiment. The sky is scanned along the main plane of the sun with POSP in a clear day. The data of sky radiance and polarization degree obtained are compared with the data collected by CE318N sun-sky polarization radiometer at the same time, and the factors affecting the data of the two instruments are discussed. The experimental results show that the two instruments have a good consistency, with the consistency deviation of radiance and polarization less than 4% and 0.005, respectively. The accuracy of POSP laboratory

收稿日期: 2020-06-12; 修回日期: 2020-08-15; 录用日期: 2020-09-08

基金项目: 王宽诚率先进入人才计划“卢嘉锡国际合作团队项目”(GJTD-2018-15)

* E-mail: lzhenhai@aiofm.ac.cn; ** E-mail: lizheny@mail.ustc.edu.cn; *** E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

calibration and the detection ability under natural targets are verified, which can provide a basis for the subsequent processing and application of space-borne data.

Key words measurement; polarization scanner; CE318N sun-sky polarimetric radiometer; calibration; polarization measurement; radiation measurement

OCIS codes 120.0280; 120.4640; 120.5410

1 引言

近年来,大气粒子散射具有强偏振和弱光强的特点,则偏振探测技术在气溶胶遥感领域得到了广泛的应用^[1-3]。星载偏振遥感通过获取大气散射的光谱、角度、辐射和偏振信息来量化反演大气特性参数,根据偏振测量方式的时间特性可分为同时和分时两类。多角度偏振成像传感器(POLDER)是最早的分时偏振测量星载传感器,为提升其探测能力,欧洲航天局在 POLDER 的基础上研制了新型多角度多光谱偏振成像仪(3MI),3MI 与 POLDER 相比扩展了光谱探测范围,并且提升了空间分辨率^[4-5]。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研制的多角度偏振成像仪(DPC)^[6-7],以及中国科学院上海技术物理研究所研制的多角度偏振探测仪^[8]均采用了分时偏振探测技术,其中 DPC 搭载在高分五号卫星上于 2018 年 5 月 9 日成功发射,可为高分五号卫星的其他载荷提供大气校正数据、全球大气气溶胶数据和云特性数据。基于同时偏振探测技术的典型仪器有美国的气溶胶偏振探测仪(APS)^[9]、荷兰的光谱调制型同时偏振光谱仪(SPEX)^[10]、乌克兰的多角度偏振成像仪(MSIP)和偏振扫描仪(ScanPol)等^[11]。目前,偏振遥感数据的量化应用在科学研究和环境监测等领域中的需求越来越深入,同时对星载偏振遥感在轨测量的稳定性和精度方面提出了更高的要求。

偏振传感器的精确定标是量化应用的前提,应用前需要对其性能进行全面评估。星载高精度偏振扫描仪(POSP)由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研制,其为多光谱、分孔径和分振幅的同时偏振传感器,而且配备了星上偏振和辐射定标器。由于光学遥感器获取的数据质量依赖于定标精度,因此需要对其进行系统定标,定标一般分为发射前定标和发射后定标。发射前定标是载荷研制过程中获取仪器的定标系数以及评估其测量不确定度必不可少的环节之一,但实验室中的定标设备和环境往往难以完全模拟自然场景的测试条件,从而导致测量存在偏差。为了检验及评价遥感器的实验室定标精度,需要开展相应的验证实验。

目前,发射前外场定标的方法主要有 Langley 法、辐射亮度法和基于标准探测器的反射比对法等^[12]。文献[13-15]分别采用了上述三种方法对风云二号气象卫星多通道辐射计进行外场定标并分析了误差来源,进而验证上述三种方法的可行性。海洋宽视场遥感器发射前,以太阳为辐射源对其进行太阳辐射基定标(SRBC)^[16]。中分辨率光谱成像仪搭载于风云三号气象卫星发射前,使用太阳光经过参考板的反射信号对各通道进行定标,并且比对和修正了实验室定标系数^[17]。上述实验结果均表明,通过发射前定标可检验并修正实验室定标结果,进而提升仪器的测量精度。

本文首先介绍 POSP 的工作原理,然后通过实验室定标获取定标系数并完成偏振和辐射定标精度的评估,最后针对仪器的工作模式、光谱响应特性和观测几何设计进行地面验证实验,验证 POSP 数据处理的有效性以及自然目标下的探测能力,可为后续星载数据的处理和应用提供参考和依据。

2 高精度偏振扫描仪的工作原理

2.1 POSP 的主要技术参数

POSP 采用同时偏振测量技术,探测波段覆盖紫外至短波红外谱段,具备在轨偏振定标和太阳漫反射板定标等功能,可获取高精度的偏振探测数据。POSP 在短波红外通道可以解决气溶胶综合参数反演中的地-气解耦问题,进而提高大气偏振探测精度,使用紫外偏振探测通道数据可以反演气溶胶的垂直分布参数,为整层大气颗粒物浓度向近地表面的校正提供数据。POSP 通过永磁同步电机来驱动正交扫描镜的转动,从而实现对地的扫描探测。当扫描镜转动一圈时,可依次采集暗背景、偏振定标器、对地观测、非偏振定标器和辐射定标器的数据。POSP 的主要技术指标如表 1 所示,其中 VNIR 为可见光和近红外波段,SWIR 为短波红外波段。

2.2 POSP 的工作原理及构成

POSP 采用分孔径与分振幅结合的同时偏振测量技术,其中渥拉斯顿棱镜可以分离同一目标信号的正交偏振态特性,这是实现偏振测量的基础。POSP 的光学系统由正交反射镜组、望远系统组件、

渥拉斯顿棱镜组件、分色聚焦镜组件和滤光片及探测器组成,结构如图 1 所示。

表 1 POSP 的主要技术指标

Table 1 Main technical indicators of POSP

Project	Parameter value
Instantaneous field of view / (°)	0.52
Scanning lap time / s	0.979
Scanning rate / (r · min ⁻¹)	61.27
Integration time / ms	1.42
Field of view / (°)	-50~+50
Ground resolution / km	6.44
Polarization accuracy	<0.005
Radiation accuracy in VNIR / %	<5
Radiation accuracy in SWIR / %	<6

目标信号经过正交反射镜组和望远系统准直后入射到渥拉斯顿棱镜,信号经过渥拉斯顿棱镜后分为两束振动方向垂直的线偏振光,即 0°和 90°的线偏振光,两束线偏振光经过分色聚焦镜组件后被一对双元探测器接收,即用于可见/近红外波段测量的 Si 光电二极管探测器,以及用于短波红外波段测量

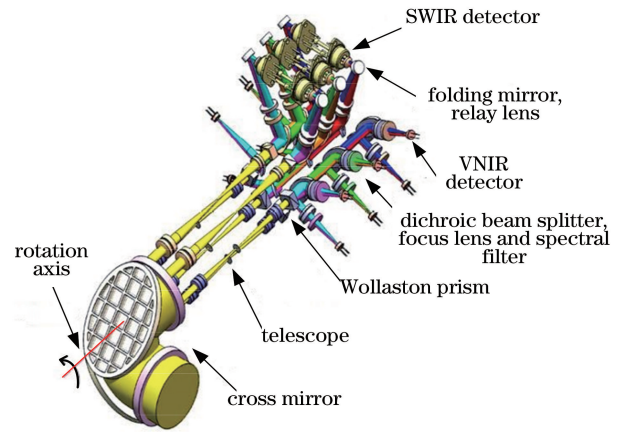


图 1 POSP 光学系统的结构

Fig. 1 Structural of POSP optical system

的 InGaAs 光电二极管探测器,短波红外通道通过精密的温控单元将探测器温度冷却至目标温度以降低热噪声和暗电流。另一条光路在空间上呈 45°安装,进而获得振动方向为 45°和 135°的线偏振光并获取 4 束线偏振光的光强,POSP 偏振测量方程^[18]可表示为

$$\begin{bmatrix} Q/I \\ U/I \end{bmatrix} = \frac{-1}{\cos(2\epsilon_1 - 2\epsilon_2)} \begin{bmatrix} \cos 2\epsilon_2 & -\sin 2\epsilon_1 \\ \sin 2\epsilon_2 & \cos 2\epsilon_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{S_0 - K_1 S_{90}}{S_0 + K_1 S_{90}} \cdot \alpha_1 \cdot \xi(p) - [\cos 2\epsilon_1 \cdot q_{inst} + \sin 2\epsilon_1 \cdot u_{inst}] \\ \frac{S_{45} - K_2 S_{135}}{S_{45} + K_2 S_{135}} \cdot \alpha_2 \cdot \xi(p) - [\cos 2\epsilon_2 \cdot u_{inst} - \sin 2\epsilon_2 \cdot q_{inst}] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: I 为探测目标的光强信息; Q 为水平和垂直线偏振分量的光强差值; U 为 +45°和 -45°线偏振分量的光强差值; ϵ_1 和 ϵ_2 为两块渥拉斯顿棱镜的方位角与理想值的偏差; S_0 、 S_{90} 、 S_{45} 和 S_{135} 为同一波段 4 个偏振通道经过暗背景校正后的响应值; α_1 和 α_2 为两台仪器的消光系数; K_1 为 0°与 90°偏振方向的系统增益比; K_2 为 45°与 135°偏振方向的系统增益比; $\xi(p)$ 为与被测目标偏振度相关的迭代因子, p 为偏振度; q_{inst} 和 u_{inst} 为仪器的自身偏振量,与正交反射镜的方位角以及反射镜的一致性相关。通过解析 I 、 Q 和 U ,可以进一步获得目标信号的辐亮度 L 、线偏振度 P 和偏振角 χ ,表达式为

$$L = (I - B^k) / A^k, \quad (2)$$

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} / I, \quad (3)$$

$$\chi = \arctan(U/Q) / 2, \quad (4)$$

式中: A^k 和 B^k 为实验室辐射定标获取的各波段绝对辐射定标系数,其中 A^k 为斜率、 B^k 为截距, k 为波段。

3 实验室定标

使用研制的仪器进行地面验证实验前,需要完成实验室定标及性能测试,再获取定标系数和实验室条件下仪器的辐射偏振测量精度。测试过程中,将 POSP 固定在高精度的二维转台上,积分球选用蓝菲公司生产的 Labsphere-1200 并将其作为辐射源,内含一盏卤素灯(稳定性优于 0.1%)和两盏等离子氙灯(稳定性优于 1.0%)并配备监视探测器,其均匀性优于 98.1%。

3.1 偏振定标

偏振定标就是建立偏振遥感输出与已知偏振态入射光间的定量关系,即求解 ϵ_1 、 ϵ_2 、 α_1 、 α_2 、 K_1 、 K_2 、 q_{inst} 和 u_{inst} 。

由积分球提供均匀光源,将已知偏振方向并固定在二维转台上的高消光比偏振片作为起偏器,等间隔转动偏振片,曲线拟合转台角度与 POSP 响应值以获取两个通道间探测器的消光角度之差,即可

得 ϵ_1 和 ϵ_2 。POSP 探测器响应值扣除本底后取峰值和谷值,两者之比即为消光比 e_1 和 e_2 , α_1 和 α_2 可表示为

$$\alpha_1 = \frac{e_1 - 1}{e_1 + 1}, \quad (5)$$

$$\alpha_2 = \frac{e_2 - 1}{e_2 + 1}. \quad (6)$$

根据分析和理论推导,入射光信号与 POSP 探测器输出的关系^[18]可以近似表示为

$$\frac{S_0 - K_1 S_{90}}{S_0 + K_1 S_{90}} = \frac{\alpha_1^{-1}(q_{\text{inst}} - q)\cos 2\epsilon_1 + (u_{\text{inst}} - u)\sin 2\epsilon_1}{\xi(\rho)}, \quad (7)$$

$$\frac{S_{45} - K_2 S_{135}}{S_{45} + K_2 S_{135}} = \frac{\alpha_2^{-1}(q_{\text{inst}} - q)\sin 2\epsilon_2 + (u_{\text{inst}} - u)\cos 2\epsilon_1}{\xi(\rho)}, \quad (8)$$

式中: q 和 u 为探测目标的偏振信息,即 $q=Q/I$ 和 $u=U/I$ 。对于 K_1 和 K_2 的定标,使用积分球作为非偏光源,由于 POSP 自身的偏振效应较弱且 $\xi(\rho) \approx 1$,则(7)式和(8)式可近似改写为

$$\frac{S_0 - K_1 S_{90}}{S_0 + K_1 S_{90}} \approx q_{\text{inst}} - q, \quad (9)$$

$$\frac{S_{45} - K_2 S_{135}}{S_{45} + K_2 S_{135}} \approx u_{\text{inst}} - u. \quad (10)$$

将非偏光源绕 POSP 的视轴旋转 90° ,此时光源的偏振度仍为 q ,偏振态则转换为 $-q$ 和 $-u$,以相同的推导方法可得

$$\frac{S'_0 - K_1 S'_{90}}{S'_0 + K_1 S'_{90}} \approx q_{\text{inst}} + q, \quad (11)$$

$$\frac{S'_{45} - K_2 S'_{135}}{S'_{45} + K_2 S'_{135}} \approx u_{\text{inst}} + u, \quad (12)$$

式中: S'_0 、 S'_{90} 、 S'_{45} 和 S'_{135} 为光源旋转 90° 后,同一波段 4 个偏振通道经过暗背景校正后的响应值。联立(9)~(12)式,可得

$$\frac{1}{2} \frac{S_0 S'_0 - K_1^2 S_{90} S'_{90}}{S_0 S'_0 + K_1^2 S_{90} S'_{90}} = \frac{q}{1 + (q^2 - q_{\text{inst}}^2)}, \quad (13)$$

$$\frac{1}{2} \frac{S_{45} S'_{45} - K_2^2 S_{135} S'_{135}}{S_{45} S'_{45} + K_2^2 S_{135} S'_{135}} = \frac{u}{1 + (u^2 - u_{\text{inst}}^2)}. \quad (14)$$

使用 POSP 对偏振度极低的光源进行测量,即 $q \approx 0$ 和 $u \approx 0$,此外假设 q_{inst} 值和 u_{inst} 值很小,由(13)式(14)式可以得到

$$K_1 \approx \sqrt{\frac{S_0 S'_0}{S_{90} S'_{90}}}, \quad (15)$$

$$K_2 \approx \sqrt{\frac{S_{45} S'_{45}}{S_{135} S'_{135}}}. \quad (16)$$

q_{inst} 和 u_{inst} 的定标思路与 K_1 和 K_2 相同,采用积分球与旋转偏振片构成偏振方位可调的线偏振光源,通过联立(9)~(12)式即可求解 q_{inst} 和 u_{inst} ,表达式为

$$q_{\text{inst}} = \frac{1}{2} \left(\frac{S_0 - K_1 S_{90}}{S_0 + K_1 S_{90}} + \frac{S'_0 - K_1 S'_{90}}{S'_0 + K_1 S'_{90}} \right), \quad (17)$$

$$u_{\text{inst}} = \frac{1}{2} \left(\frac{S_{45} - K_2 S_{135}}{S_{45} + K_2 S_{135}} + \frac{S'_{45} - K_2 S'_{135}}{S'_{45} + K_2 S'_{135}} \right). \quad (18)$$

实验室条件下,使用标准的可调偏振度光源对 POSP 的偏振测量精度进行验证,验证装置如图 2 所示,其中 VPOLS-II 为偏振态调节器。通过精确控制玻片的安装位置和电机的旋转角度,标准的可调偏振度光源可以输出接近理论偏振度的线偏振光。POSP 偏振测量精度的验证实验中,积分球输出的无偏光进入偏振态调节器后,通过调节平板玻璃的透过率和转动角可以得到相应的理论偏振度并与 POSP 的实测偏振度进行比较,进而分析 POSP 偏振测量的不确定度。

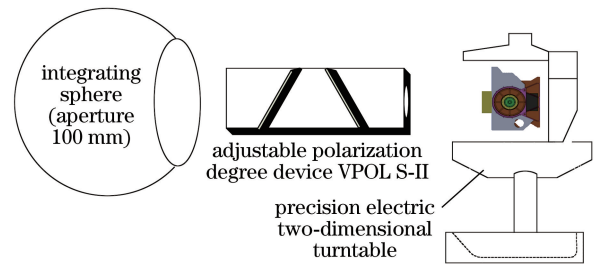


图 2 偏振测量精度的装置示意图

Fig. 2 Schematic of device for polarization measurement accuracy

康晴等^[19]采用了相对不确定度的评估方法分析 VPOLS-II 的线性偏振度合成不确定度。理论上,相对不确定度的评估方法无法对理论偏振度为零的不确定度进行评估,因此实验采用绝对不确定度的评估方法^[20]对 POSP 偏振测量精度 ΔP 的不确定度进行评估。使用偏振度测量值和测量真值的方均根误差,以及文献[19]的计算结果对 POSP 绝对偏振定标的不确定度进行评估,结果如图 3 所示。从图 3 可以看到,在 0.03~0.30 的线偏振度范围内,各波段下 POSP 偏振定标的不确定度基本在 0.0040 以内。

当玻璃片角度为 22.3° 、 28.3° 、 45.0° 和 59.0° 时, POSP 偏振精度的测试结果如图 4 所示,其中 P_M 为

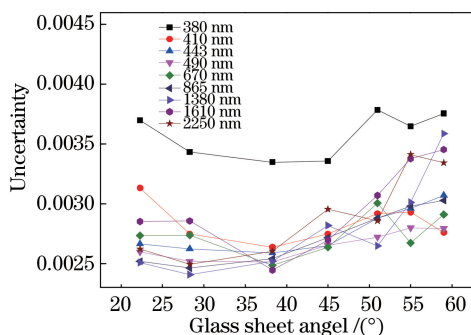


图 3 POSP 偏振定标的不确定度

Fig. 3 Uncertainty of POSP polarization calibration

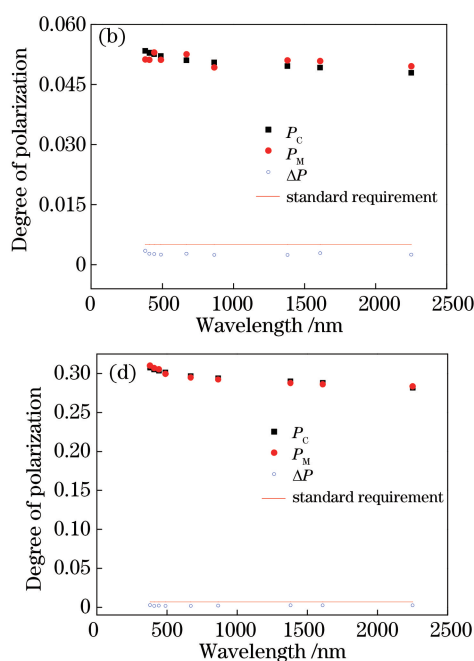
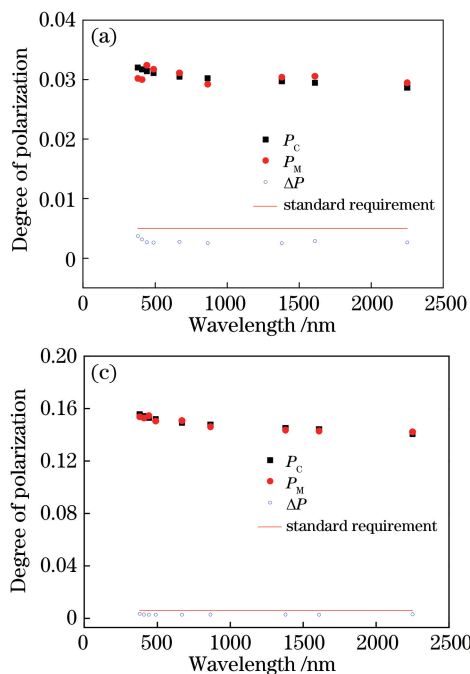


图 4 POSP 偏振精度的测试结果。(a) 22.3°; (b) 28.3°; (c) 45.0°; (d) 59.0°

Fig. 4 Test results of POSP polarization accuracy. (a) 22.3°; (b) 28.3°; (c) 45.0°; (d) 59.0°

$$I = A^k L + B^k \quad (20)$$

将 I 与积分球内置的辐亮度监测仪的数据线性拟合,即可求解 A^k 和 B^k 。POSP 辐射定标精度用其绝对辐射响应定标的不确定度 $N(\lambda)$ 来表示,包含定标源的不确定度 $N_{NCS}(\lambda)$ 、仪器非线性 $N_{NL}(\lambda)$ 的不确定度和非稳定性的不确定度 $N_{NS}(\lambda)$,表达式为

$$N(\lambda) = \sqrt{N_{NCS}^2(\lambda) + N_{NL}^2(\lambda) + N_{NS}^2(\lambda)} \quad (21)$$

通过调整积分球的输出能级来测量 POSP 各波段在不同辐亮度条件下的非线性特性,以及标准辐亮度条件下的响应非稳定性特性,POSP 各波段辐射定标的合成不确定度结果如图 5 所示,其中 $P1 \sim P4$ 代表 4 个偏振测量通道,即 $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$ 和 135° 。

POSP 的实测偏振度, P_C 为理论偏振度,实线为偏振测量精度指标要求。从图 4 可以看到,实验室条件下 POSP 偏振精度为 0.005,满足应用需求。

3.2 辐射定标

辐射定标就是通过理想非偏光源建立 POSP 探测器输出响应值与输入辐射信息之间的数学关系。目标的入射辐射信息可表示为

$$I = S_0 + K_1 S_{90} = C_{12} (S_{45} + K_2 S_{135}), \quad (19)$$

式中: C_{12} 为通道间相对辐射定标系数,即两光路中探测器的增益之比,用来表征仪器的稳定性。绝对辐射定标系数可表示为

从图 5 可以看到,实验室条件下 POSP 辐射测量精度满足应用需求。

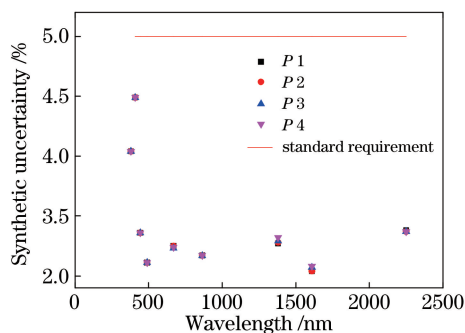


图 5 POSP 各波段辐射定标的合成不确定度

Fig. 5 Composite uncertainty of radiation calibration of POSP in various bands

4 地面实验

4.1 实验设置与数据处理

为了检验仪器实验室定标结果的有效性,开展外场观测实验并将所得结果与标准仪器的结果进行对比。目前,法国 CIMEL 公司生产的 CE318N 型全自动太阳/天空光度计是地基遥感监测的重要仪器之一,广泛应用于区域气候的研究^[21],其被美国航空航天局(NASA)的气溶胶全球监测网(AERONET)、国内的气溶胶光学特性监测网(CARSNET)以及太阳-天空辐射计观测网(SONET)等主要地面观测场所采用^[22-23]。CE318N 能够实现多波段的太阳直射辐射测量以及多波段、多角度的平纬圈、主平面天空光的扫描观测,其可以提供长期连续、参数全面和精度较高的气溶胶观测数据,可应用于卫星遥感反演的相关产品验证。此外,CE318N 的部分偏振通道波段与 POSP 相近,因此可将 CE318N 作为参照仪器并用于 POSP 地面验证实验。POSP 的地面验证实验

中,主要采用 CE318N 的天空辐亮度测量模式。CE318N 的辐亮度定标方法主要有传递定标法和实验室积分球定标法,对比实验中使用的绝对辐亮度定标系数由积分球辐射源来标定,其合成不确定度为 3%~5%;而对于 CE318N 偏振通道测量精度,根据研究文献[20,24]可知偏振定标不确定度约为 0.005。

POSP 地面验证实验通过对天空扫描可以获取天空辐亮度和偏度数据,并与同时刻采集的 CE318N 数据进行对比。选择晴朗天气进行验证实验,实验时间为 11:00 至 15:00。CE318N 采用具有偏振测量功能的太阳主平面(SPP)扫描方式,在 $-85^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 的范围内以 5° 为间隔,可以获取不同观测天顶角下天空光的偏振辐射信息。POSP 工作模式为连续扫描模式,使用水平转台来调整观测方位,以保证其与 CE318N 在同一太阳主平面内。实验过程中,CE318N 置于四层楼楼顶的固定观测点,而 POSP 置于开阔场地,两台仪器相距约为 300 m。表 2 为 POSP 和 CE318N 的光谱波段配置,P 表示偏振测量通道。

表 2 POSP 和 CE318N 的光谱波段配置

Table 2 Spectrum band configuration of CE318N and POSP

CE318N		POSP		Primary function
Center wavelength /nm	Bandwidth /nm	Center wavelength /nm	Bandwidth /nm	
340 P	10			Ozone measurement
380 P	10	380 P	20	Aerosol storey height
		410 P	20	Aerosol storey height
		443 P	20	Ocean color
440 P	10			Ocean color
		490 P	20	Ocean color, cloud
500 P	10			Ocean color, cloud
		670 P	20	Aerosol, ocean color
675 P	10			Aerosol, ocean color
		865 P	40	Aerosol, ocean color
870 P	10			Aerosol, ocean color
937	10			Total water vapor of
				Atmospheric column
1020	10			cloud
		1380 P	40	Cirrus recognition
		1610 P	60	Dust aerosol, ground
				atmosphere decoupling
1640 P	10			Dust aerosol
		2250 P	80	Ground atmosphere decoupling

从表 2 可以看到,POSP 与 CE318N 的中心波长和带宽均存在偏差。天空辐亮度及偏振度随着角度变化明显,因此实验开始前对两台仪器特别是 POSP 的安装水平度进行检验,并校正其时间系统。

由于 POSP 无法跟踪太阳方位并且无法实时保持扫描主平面与太阳主平面的一致,为了实现与 CE318N 观测条件的匹配,实验过程中每间隔约 2 min 对 POSP 进行一次太阳主平面方位的修正。

POSP 采用连续扫描模式,通过后期测量时间的匹配处理,能够最小化由观测条件不一致引入的误差。

数据采集结束后,POSP 采用固定包长传输观测原始数据,数据处理流程如下。

1) 提取并校正原始数据,包括通道本底的平均处理和扣除、通道增益校正以及对通道的直流恢复基准点漂移进行评价及校正。

2) 校正后的数据通过观测几何解算以获取每个扫描点对应的观测几何,使用时间经纬度信息以计算太阳天顶角和方位角。

3) 根据实验室定标获取的仪器偏振和辐射定标系数,并采用(1)式来获得各扫描点下所有波段的 I 、 Q 和 U 。

4) 计算不同观测角度下的天空辐亮度和线偏振度。

CE318N 根据经纬度、时间和四象限仪来自动寻找太阳所在的位置,采用滤光片和偏振片组件切换的方式实现偏振及多光谱的分时测量。设任意波段 i 通过每组三个偏振片测量的辐射信号分别为 L_{P1} 、 L_{P2} 和 L_{P3} ,则入射光的辐亮度 L_i 和线偏振度

$P_i^{[20]}$ 分别为

$$L_i = 2(L_{P1} + L_{P2} + L_{P3})/3, \quad (22)$$

$$P_i =$$

$$\frac{2\sqrt{L_{P1}^2 + L_{P2}^2 + L_{P3}^2 - L_{P1}L_{P2} - L_{P2}L_{P3} - L_{P1}L_{P3}}}{L_{P1} + L_{P2} + L_{P3}}. \quad (23)$$

4.2 光谱匹配

两台仪器的光谱响应曲线如图 6 所示。从图 6 可以看到,两台仪器的光谱响应函数曲线存在较大差别,数据对比前需对两台传感器的响应通道进行光谱匹配。利用 MODTRAN 辐射传输软件模拟实验条件下的大气光谱曲线 $L_M(\lambda)$,结合 POSP 与 CE318N 对应通道的光谱响应函数 $f_{POSP}(\lambda)$ 、 $f_{CE318N}(\lambda)$ 和光谱范围 $\Delta\lambda$ 计算光谱匹配因子 k ,表达式为

$$k = \frac{\int_{\Delta\lambda} L_M(\lambda) \cdot f_{POSP}(\lambda) d\lambda / \int_{\Delta\lambda} f_{POSP}(\lambda) d\lambda}{\int_{\Delta\lambda} L_M(\lambda) \cdot f_{CE318N}(\lambda) d\lambda / \int_{\Delta\lambda} f_{CE318N}(\lambda) d\lambda}. \quad (24)$$

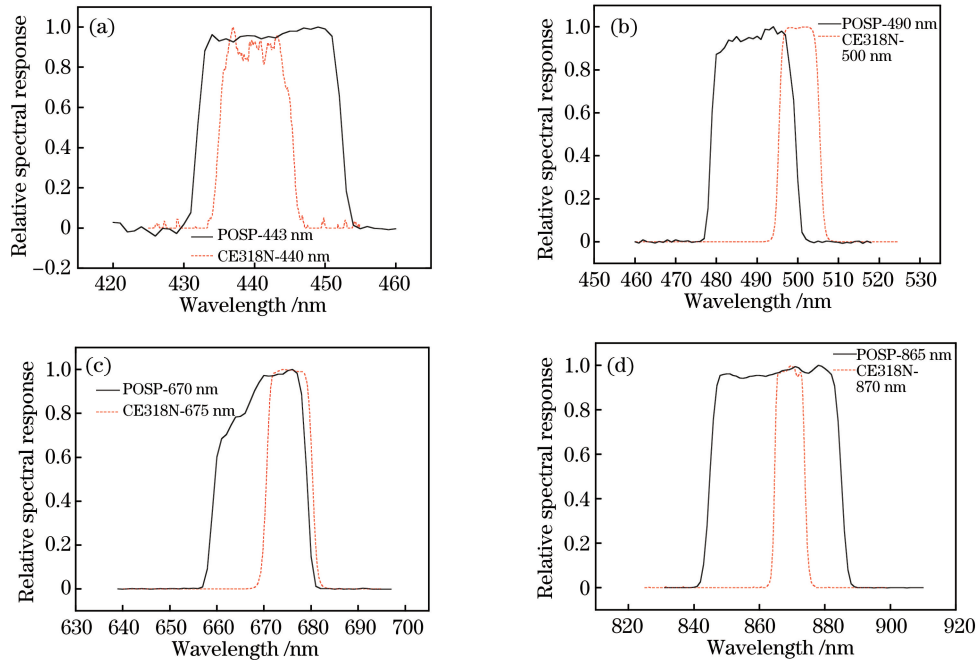


图 6 POSP 在不同通道下的光谱响应曲线。(a) 443 nm;(b) 490 nm;(c) 670 nm;(d) 865 nm

Fig. 6 Spectral response curves of POSP at different channels. (a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 670 nm; (d) 865 nm

(24)式可用于修正 POSP 各通道获取的辐亮度^[25]。计算 k 值需综合考虑采样时间、观测几何和光谱范围等影响因素,结果如表 3 所示。从表 3

可以看到,在波长为 490 nm 处的差异性最大,这与两台仪器在该通道的光谱响应函数的最大差异有关。

表 3 POSP 在不同通道下的光谱匹配结果
Table 3 Spectral matching results of POSP at different channels

POSP channel /nm	k
443	1.0435
490	1.0554
670	1.0166
865	1.0286

4.3 数据对比

POSP 中的扫描镜沿太阳主平面作周期性旋转扫描,并在 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 的天顶角范围内采集数据,采集间隔为 0.52° ,扫描周期约为 1 s。CE318N 视场角为 1.3° ,沿太阳主平面以 5° 为间隔,在 $-85^\circ \sim 85^\circ$ 的天顶角范围内获取天空光的偏振辐射信息。因 POSP 的观测天顶角并未与 CE318N 完全对应,且 POSP 的采集频率高,采样间隔较密,因此将 POSP 的测量值在观测天顶角上线性插值以匹配 CE318N。为了避免周围地物及太阳直射的影响,

选取两台仪器在观测天顶角范围为 $\pm 35^\circ$ 的偏振度和辐亮度数据进行对比。实验时间为 12:15 至 14:30,两台仪器在观测天顶角为 0° 的 7 次测量数据对比结果如图 7 所示,其中横坐标为测量次数,观察太阳天顶角在 $52.11^\circ \sim 63.45^\circ$ 的范围内变化。从图 7 可以看到,晴朗天空下,太阳主平面内的辐亮度随着波长的增加而降低,且具有较小辐亮度的天空区域偏振度较大。以 CE318N 的测量结果为基准,辐亮度差异 $\Delta L = (L_{\text{POSP}} - L_{\text{CE318N}}) / L_{\text{CE318N}}$,偏振度差异 $\Delta P = P_{\text{POSP}} - P_{\text{CE318N}}$,计算两台仪器获取辐亮度和偏振度的偏差,结果如图 7(c)和图 7(d)所示。从图 7(c)和图 7(d)可以看到,POSP 与 CE318N 在对应波段的辐亮度测量偏差在 5% 以内,偏振度偏差小于 0.006。通过多次测量结果的对比,两台仪器测量的辐亮度和偏振度偏差较为稳定,说明验证实验具有较高的可信度。

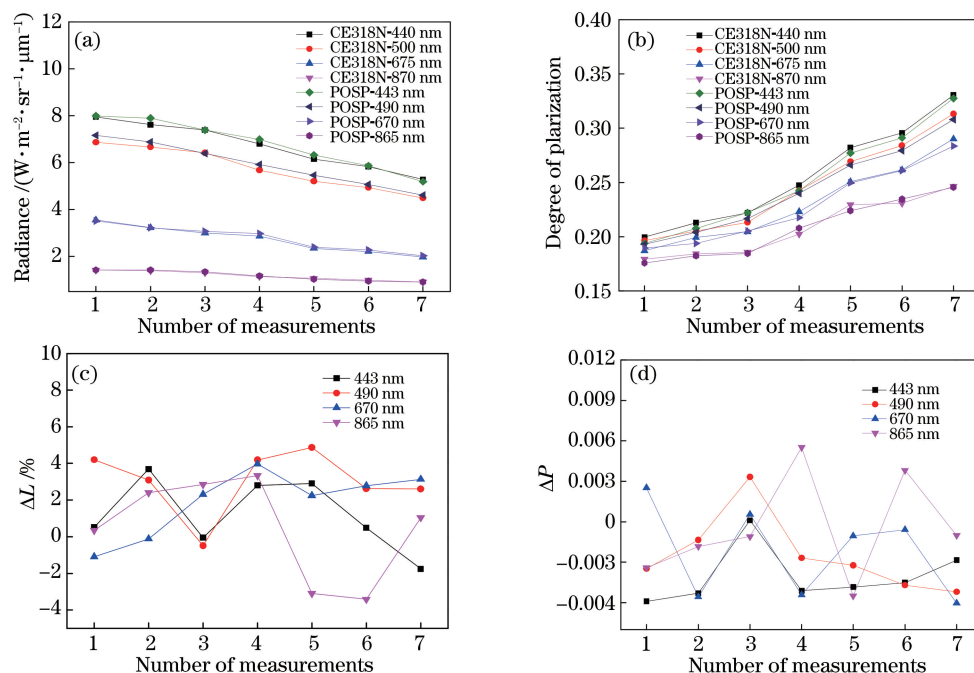


图 7 0° 观测天顶角的数据对比结果。(a) 辐亮度;(b) 偏振度;(c) ΔL ;(d) ΔP

Fig. 7 Data comparison results of 0° observation zenith angle. (a) Radiance; (b) degree of polarization; (c) ΔL ; (d) ΔP

地面验证实验将实验室偏振度的动态测量范围由 $0 \sim 0.3$ 扩展至 $0 \sim 0.5$,多次测量中最大天空偏振度及其对应的最小辐亮度和最小偏振度及其对应的最大辐亮度测量结果如图 8 和图 9 所示。从图 8 和图 9 可以看到,POSP 与 CE318N 观测的天空偏振度与辐亮度曲线整体趋势具有较好的一致性。POSP 测量值线性插值后,各观测角度与 CE318N 在对比波段的偏振度偏差基本在 0.006 以内,辐亮

度偏差基本小于 6%,多次测量的对比结果基本一致。天空辐亮度和偏振度曲线趋于稳定后变化缓慢,说明大气状态相对均匀稳定。

两台仪器的天空辐亮度和偏振度存在固有偏差,选取图 8(b)和图 9(b)中 CE318N 偏振辐射数据按照 POSP 的采样时刻进行插值并与 POSP 测量值进行线性拟合,数据之间的一致性用方均根(RMS)来表示。对于偏振度数据,采用 ΔP 的方均根值,对于辐

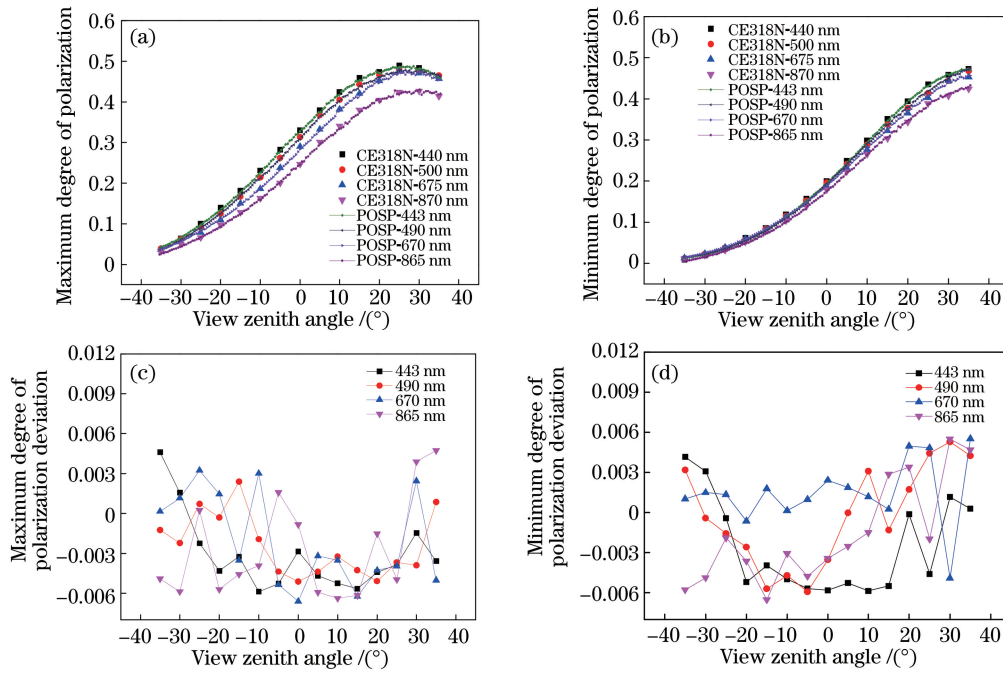


图 8 天空偏振度的处理结果。(a)最大偏振度;(b)最小偏振度;(c)最大偏振度偏差;(d)最小偏振度偏差
 Fig. 8 Processing results of degree of polarization in sky. (a) Maximum degree of polarization; (b) minimum degree of polarization; (c) maximum degree of polarization deviation; (d) minimum degree of polarization deviation

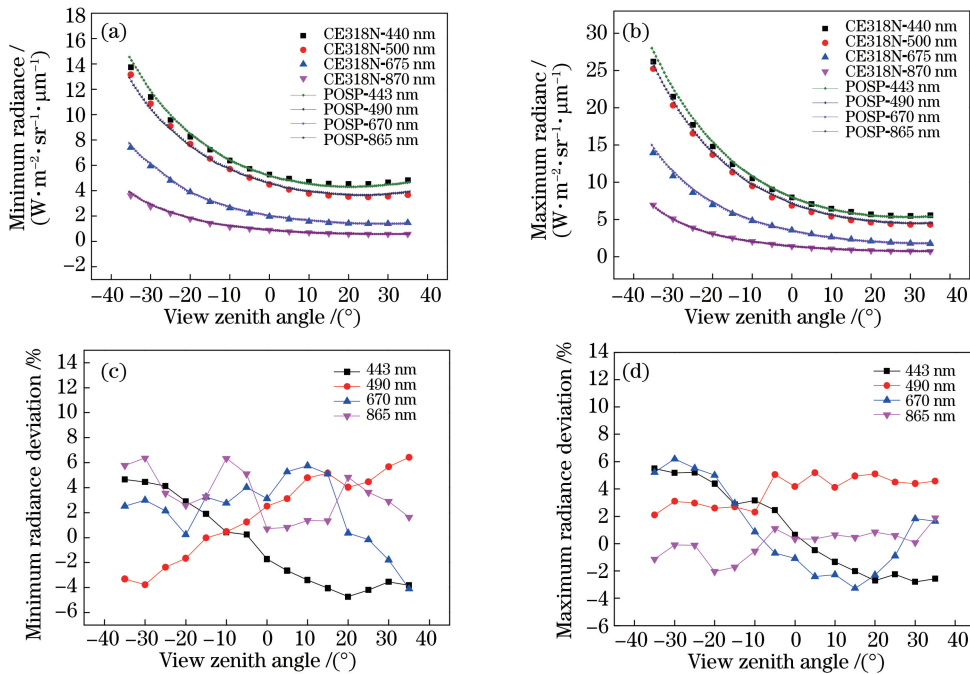


图 9 天空辐亮度的处理结果。(a)最小辐亮度;(b)最大辐亮度;(c)最小辐亮度偏差;(d)最大辐亮度偏差
 Fig. 9 Processing results of sky radiance. (a) Minimum radiance; (b) maximum radiance; (c) minimum radiance deviation; (d) maximum radiance deviation

亮度数据,采用 ΔL 的方均根值。443, 490, 670, 865 nm 4 个 POSP 通道的偏振度和辐亮度数据的一致性对比结果如图 10 和图 11 所示,其中实线表示二者数据的拟合关系,辐亮度单位为 $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$,

线性拟合的参数、方均根值和拟合系数 R^2 在图中已列出。从图 10 和图 11 可以看到,不同探测通道的 POSP 与 CE318N 偏振度和辐亮度数据的一致性水平存在差异,两台仪器的相关系数都很大,即 R^2 均大于

0.99, 线性拟合斜率接近于 1; 辐亮度数据的 RMS 在 1%~4% 之间变化, 其中在 490 nm 通道的偏差方均根值最大; 两台仪器的偏振度一致性偏差均小于

0.005, 说明 POSP 与 CE318N 偏振度和辐亮度数据的一致性较强, 验证了 POSP 的实验室定标系数的有效性和自然光目标下偏振辐射的探测能力。

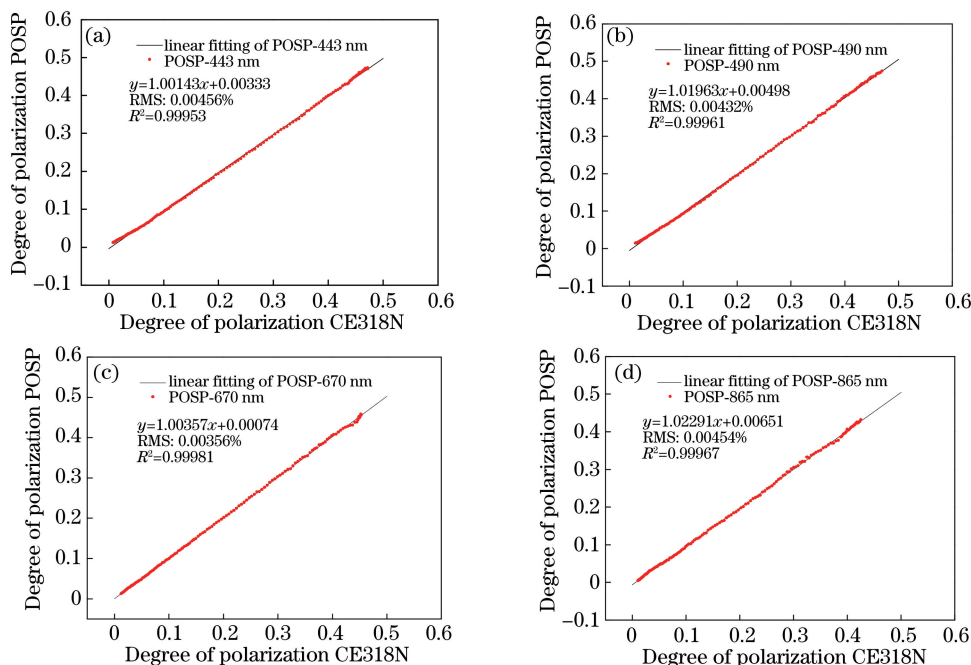


图 10 POSP 与 CE318N 在不同通道下偏振度一致性的对比结果。(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 670 nm; (d) 865 nm
Fig. 10 Comparison results of polarization degree consistency between POSP and CE318N in different channels.

(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 670 nm; (d) 865 nm

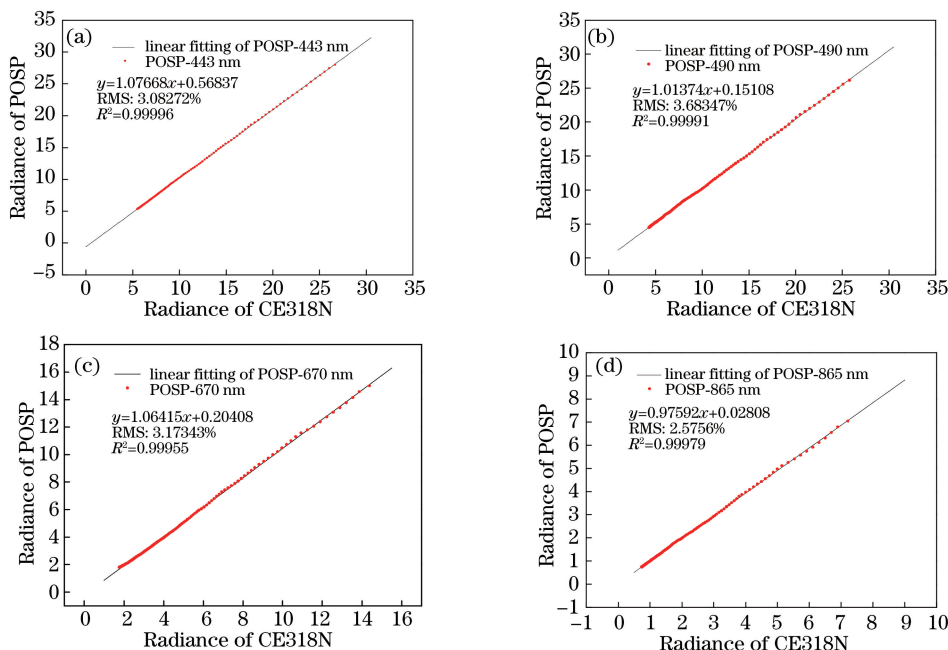


图 11 POSP 与 CE318N 在不同通道下辐亮度一致性的对比结果。(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 670 nm; (d) 865 nm
Fig. 11 Comparison results of radiance consistency between POSP and CE318N in different channels.

(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 670 nm; (d) 865 nm

数据处理过程中, 光谱非匹配对两台仪器的辐亮度对比结果的影响较大。以 490 nm 通道为例,

比较校正前后两台仪器的一致性, 线性拟合结果如图 12 所示, 其中实线表示斜率为 1, 截距为 0 的标

准参考线。从图 12 可以看到,光谱匹配后的拟合结果更接近于标准参考线,即拟合斜率更接近于 1,此次测量校正前的偏差方均根值达到 8%,校正后明显减小,进一步表明两台仪器的辐亮度对比偏差对光谱非匹配较为敏感以及匹配因子的有效性。由于采用线性光谱匹配因子,校正后拟合线周围的离散点并不会减少,因此不影响 R^2 的计算结果。从得到的结果可以推断 POSP 在其余通道测量的辐亮度也具有相似结果。

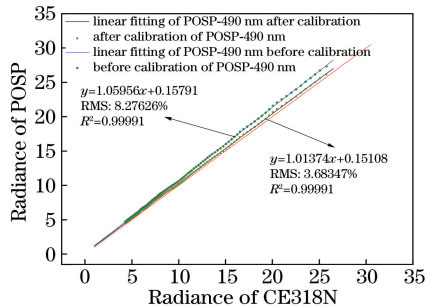


图 12 在 490 nm 通道光谱匹配前后的线性拟合结果
Fig. 12 Linear fitting results before and after spectral matching in 490 nm channel

4.4 偏差分析

由 4.1~4.3 节可知,不同遥感器间的偏振度和辐亮度数据存在的对比偏差与对应通道光谱匹配因子、空间匹配和观测几何等因素有关。POSP 与 CE318N 同时对天空进行扫描观测需要严格的时间一致性和稳定的大气环境,两台仪器均采用统一的时间基准,POSP 的采样频率远大于 CE318N,通过 CE318N 的采样时刻来寻找与之相匹配的 POSP 数据并进行比对,时间非一致引起的测量偏差基本可以忽略。POSP 的扫描电机指向精度优于 $3'$,考虑到晴朗天空的均匀性较好,两台仪器的指向非匹配引起的偏差对测量结果的影响较小,此时主要考虑光谱非匹配的影响。使用 MODTRAN 模型的大气参数来模拟计算遥感器入瞳的辐亮度,缺少同步测量的大气参数会影响大气顶层辐亮度的模拟计算和光谱匹配因子的计算结果,其不确定度约为 $1\% \sim 2\%$ ^[25],通过多次测量结果的比对,验证了光谱匹配因子具有稳定性和有效性。此外,两台仪器的地面测试位置有 300 m 的距离差,则大气传输介质的差异可能会导致偏振度和辐亮度测量结果存在偏差。

对比实验类似于辐射标准的传递过程,CE318N 的辐射定标联合不确定度为 $3\% \sim 5\%$,偏振定标不确定度约为 0.005。以 CE318N 测量结果为基准,随着仪器的运行,其性能必然会有不同程度

的衰减,此时需定期重新定标,此外两台仪器的溯源标准和定标方法的不同会导致两者的测量结果存在固有偏差。

影响仪器对比偏差的因素除了大气环境、仪器光谱特性和自身测量不确定度等固有化差异外,数据处理的方法和仪器的安装稳定性等对对比结果也会造成影响。由于 CE318N 的采样频率和观测角度并未与 POSP 完全对应,在数据对比过程中采用插值法对获取的偏振度和辐亮度数据进行处理,可以完成两者在相同观测角和采样点的对比,但这可能会引入新的偏差。实际处理应用中,需要考虑这些因素。此外,两台仪器的绝对辐亮度测量结果存在固有偏差,将两台仪器获取的天空偏振度和辐亮度数据进一步转换为气溶胶光学厚度等数据并对其进行对比,这还有待进一步研究。

5 结 论

POSP 采用分孔径和分振幅结合的同时偏振探测技术,其具备多光谱的全偏振探测能力,可用于探测大气细颗粒物、气溶胶/云和水汽等。首先介绍 POSP 的探测原理,根据偏振测量方程明确偏振定标系数,利用完全线偏振光源和非偏振光源作为已知偏振态的标准光源,分析 POSP 实验室定标原理并完成定标,实验室条件下 POSP 的辐射测量精度优于 5% ,偏振测量精度优于 0.005,验证实验室定标系数的有效性。针对仪器的工作模式、光谱响应特性和观测几何设计并完成自然目标下的地面验证实验,晴朗天气下在 443,490,670,865 nm 4 个通道中比较 POSP 和 CE318N 的辐亮度和偏振度的一致性。通过多次测量结果的对比,POSP 的辐亮度一致性偏差小于 4% ,偏振度一致性偏差小于 0.005,具有较好的一致性,说明实验室定标系数具有有效性。POSP 地面验证实验是在考虑不同仪器的观测模式、空间响应和通道光谱特性的基础上进行的,可为后续星载数据的处理和应用提供参考和依据。仪器测量对比方法对非成像光学遥感器和成像式遥感器均适用,而成像式与非成像遥感器间的对比需考虑视场匹配及像元合并等问题,可为类似的星载遥感器定标及不同类型仪器间联合比对提供思路。

参 考 文 献

- [1] Fang W, Qiao Y L, Zhang D Y, et al. Threshold optimization in cloud detection by polarized

- multichannel remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1228005.
- 方薇, 乔延利, 张冬英, 等. 偏振多通道遥感云检测的阈值优化[J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1228005.
- [2] Dubovik O, Li Z Q, Mishchenko M I, et al. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: instruments, methodologies, results, and perspectives[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 224: 474-511.
- [3] Guo H, Gu X F, Xie D H, et al. A review of atmospheric aerosol research by using polarization remote sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(7): 1873-1880.
- 郭红, 顾行发, 谢东海, 等. 大气气溶胶偏振遥感研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(7): 1873-1880.
- [4] Manolis I, Grabarnik S, Caron J, et al. The MetOp second generation 3MI instrument[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8889: 88890J.
- [5] Tanré D, Bréon F M, Deuzé J L, et al. Remote sensing of aerosols by using polarized, directional and spectral measurements within the a-train: the PARASOL mission [J]. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 2011, 4(2): 2037-2069.
- [6] Weng J W, Yuan Y L, Zheng X B, et al. Method for measuring response non-uniformity of polarization channels in directional polarization camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 0828001.
- 翁建文, 袁银麟, 郑小兵, 等. 多角度偏振成像仪偏振通道响应非一致性测量方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 0828001.
- [7] Weng J W, Yuan Y L, Zheng X B, et al. Correction method for 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.
- [8] Yin D K. Multi-angle polarization detection technology[J]. *Infrared*, 2019, 40(1): 1-6.
- 殷德奎. 多角度偏振探测技术[J]. *红外*, 2019, 40(1): 1-6.
- [9] Peralta R J, Nardell C, Cairns B, et al. Aerosol polarimetry sensor for the Glory Mission [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6786: 67865L.
- [10] Hasekamp O P, Fu G L, Rusli S P, et al. Aerosol measurements by SPEXone on the NASA PACE mission: expected retrieval capabilities[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 227: 170-184.
- [11] Milinevsky G, Oberemok Y, Syniavskiy I, et al. Calibration model of polarimeters on board the aerosol-UA space mission[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 229: 92-105.
- [12] Wang M, He M Y, Zhang S P, et al. Calibration methods of visible-near infrared channel-type satellite radiometric sensor[J]. *Remote Sensing Information*, 2014, 29(1): 114-120.
- 王敏, 何明元, 张水平, 等. 通道式可见光近红外卫星遥感器辐射定标方法综述[J]. *遥感信息*, 2014, 29(1): 114-120.
- [13] Chen F C, Chen G L, Zhan L S. Visible outfield calibration for FY-2 multi-channel scan radiometer [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(2): 295-298.
- 陈福春, 陈桂林, 詹丽珊. FY-2 多通道扫描辐射计的可见光外场定标[J]. *量子电子学报*, 2005, 22(2): 295-298.
- [14] Luo J, Yi W N, Peng N N. Visible light calibration of FY-2 scanning radiometer based on method of radiation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(8): 68-71.
- 罗军, 易维宁, 彭妮娜. 辐亮度法的 FY-2 扫描辐射计可见光定标[J]. *光电工程*, 2007, 34(8): 68-71.
- [15] Zhou L, Peng N N, Zhang L M, et al. Detector based field radiometric calibration for the visible band of multi-channel scanning radiometer of satellite FY-2-05 [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2007, 22(1): 20-25.
- 周磊, 彭妮娜, 张黎明, 等. 基于标准探测器的 FY-2 (05)星扫描辐射计可见通道外场定标[J]. *遥感技术与应用*, 2007, 22(1): 20-25.
- [16] Barnes R A, Eplee R E, Patt F S, et al. Changes in the radiometric sensitivity of SeaWiFS determined from lunar and solar-based measurements [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(21): 4649-4664.
- [17] Sun L, Guo M H, Xu N, et al. On-orbit response variation analysis of FY-3 MERSI reflective solar bands based on Dunhuang site calibration [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1869-1877.
- 孙凌, 郭茂华, 徐娜, 等. 基于敦煌场地定标的 FY-3 MERSI 反射太阳波段在轨响应变化分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(7): 1869-1877.
- [18] Song M X, Sun B, Sun X B, et al. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1153-1158.
- 宋茂新, 孙斌, 孙晓兵, 等. 航空多角度偏振辐射计的偏振定标[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1153-1158.

- [19] 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.
- [20] Li Z Q, Blarel L, Podvin T, et al. Calibration of the degree of linear polarization measurement of polarized radiometer using solar light [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(8): 1249-1256.
- [21] 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(8): 9791-9806.
- [22] Li Z Q, Blarel L, Podvin T, et al. Transferring the calibration of direct solar irradiance to diffuse-sky radiance measurements for CIMEL Sun-sky radiometers [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(10): 1368-1377.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Zhou G H, Jiang H, Zhao H J, et al. Imaging spectrometry radiometric cross-calibration based on precise spectral response matching [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(12): 3416-3421.
周冠华, 姜禾, 赵慧洁, 等. 基于精确光谱响应匹配的星载成像光谱仪交叉辐射定标 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(12): 3416-3421.