

偏振扫描仪偏振探测实验与结果分析

朱双双^{1,2,3**}, 杨洪春^{2,3*}, 李朕阳^{2,3}, 雷雪枫^{1,2,3}, 邹鹏^{2,3}, 刘振海^{2,3}, 洪津^{2,3***}

¹ 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

² 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

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 对我国自主研发的偏振扫描仪(POSP)开展了偏振探测实验,主要包括地面实验和航空校飞实验。其中,地面实验是对天空进行扫描,可获得天空的偏振度和辐亮度数据;而航空校飞实验是对地表进行扫描,可获得地表的偏振度和辐亮度数据。为了和 POSP 获取的偏振辐射数据进行对比分析,在实验过程中同时配置了 1 台三分束同时偏振相机进行偏振探测。结果表明,2 台偏振仪器获得的偏振辐射数据具有较好的一致性,初步验证了 POSP 偏振探测实验数据的有效性,同时,实验获取的偏振辐射数据可为后期大气气溶胶参数的反演提供有效的支持。

关键词 遥感; 偏振扫描仪; 偏振测量; 辐射测量

中图分类号 P161.3; P407.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1112002

Polarization Detection Test and Result Analysis of Scanning Polarimeter

Zhu Shuangshuang^{1,2,3**}, Yang Hongchun^{2,3*}, Li Zhenyang^{2,3}, Lei Xuefeng^{1,2,3},
Zou Peng^{2,3}, Liu Zhenhai^{2,3}, Hong Jin^{2,3***}

¹ School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230026, China;

² Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui, 230031, China;

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

Abstract Polarization detection tests are carried out on China's self-developed Scanning Polarimeter (POSP), mainly including on-ground tests and in-flight tests. Among them, the on-ground tests are to scan the sky to obtain the data of polarization degree and radiation luminance of the sky, while the in-flight tests are to scan the earth's surface to obtain the data of polarization degree and radiation luminance of the earth's surface. In order to compare and analyze the data of polarization degree and radiation luminance obtained by POSP, a three-beam simultaneous polarization camera is equipped for polarization detection during polarization detection tests. The results show that the data of polarization degree and radiation luminance obtained by the two polarization instruments have good consistency, and the validity of the data obtained by POSP in polarization detection tests is preliminarily verified, which can provide an effective basis for the inversion of atmospheric aerosol parameters in the later stage.

Key words remote sensing; scanning polarimeter; polarization measurement; radiation measurement

OCIS codes 120.0280; 120.4640; 120.5410

1 引 言

气溶胶通过吸收和反射太阳辐射对全球气候和环境产生的影响受到越来越多的关注^[1-2]。近年来,基于气溶胶高精度偏振探测载荷的发展现状及气溶胶反演的应用需求,国内外学者在气溶胶辐射特性

参数的测量和仪器开发等方面开展了诸多研究工作^[3-4]。比较典型的有法国的 POLDER-3^[5-6]、3MI^[7],美国的 APS^[8-9]、HARP^[10]和 MAIA^[11]等。国内具有代表性的偏振探测仪器有中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的多角度偏振成像(DPC)^[12]和中国科学院上海技术物理研究所研制

收稿日期: 2019-06-03; 修回日期: 2019-07-03; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 王宽诚率先人才计划(GJTD-2018-15)

* E-mail: hongyang@mail.ustc.edu.cn; ** E-mail: zhuss@mail.ustc.edu.cn; *** E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

的多角度偏振探测仪(MAI)^[13]。以上仪器的共同特点是可以对大气进行偏振探测,从而获取目标的偏振数据。

偏振是电磁波的重要属性,可表征光波振动方向相对于传播方向的不对称性。利用偏振探测技术不仅可以获取目标的辐射度信息,还可以得到目标的偏振特性,将偏振信息和辐射度信息联合应用比单独利用一种辐射强度信息进行大气参数反演的精度要高很多,因此,偏振探测技术在大气参数探测领域具有比传统强度探测技术更重要的应用前景,已成为大气气溶胶研究不可或缺的有效手段^[14-15]。

偏振扫描仪(POSP)是由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的一种高精度偏振探测仪,将其搭载于卫星进行对地观测,可获取地表和大气多角度、多光谱和偏振辐射数据信息。本文通过对POSP开展地面实验和航空校飞实验,分别获取天空和地表的辐亮度和偏振度数据,在实验过程中同时配置了1台三分束同时偏振相机进行天空和地表辐亮度和偏振度数据的获取,并对2台偏振仪器的实验数据进行比对分析,初步验证POSP偏振探测实验数据的有效性。

2 POSP 偏振探测原理

POSP的光学测量原理如图1所示,整个系统由正交反射镜组、前置望远棱镜、渥拉斯顿棱镜、分色聚焦组件以及红外探测器等组件组成。通过旋转正交反射镜组引入目标信号,实现多角度观测,目标信号依次经前置望远镜系统准直、渥拉斯顿棱镜偏振分束以及分色聚焦透镜分光后,聚焦在二元探测器上。该系统的探测谱段覆盖了380~2250 nm,共有9个光谱通道,根据所用探测器的类型将9个光谱通道分为2组:第一组为380,410,443,490,670,865 nm的可见/近红外(VNIR)波段;第二组为1380,1610,2250 nm的短波红外波段(SWIR)。其中380,410,443,490,670,865 nm的VNIR选用Si探测器,1380 nm及1610 nm的SWIR选用G12181型InGaAs探测器,2250 nm的SWIR选用G12183型InGaAs探测器。所有探测器在装机前均进行可靠性实验,并以可靠性实验前后探测器的相对光谱响应率变化作为探测器性能优选的依据,所用探测器的相对光谱响应率在可靠性实验前后变化均在2%以内,可以满足航天载荷应用需求。

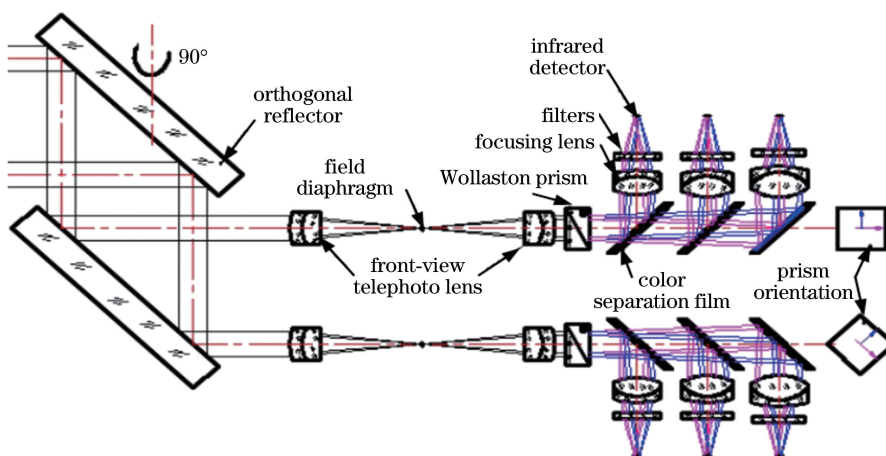


图1 POSP的光学测量原理图

Fig. 1 Optical measurement schematic of POSP

POSP的偏振测量原理是用于测量斯托克斯矢量的Pickering方法,其中渥拉斯顿棱镜作为系统的偏振解析器,一组用来解析0°和90°偏振分量,另一组相对于第一组方位互成45°安装,用来解析45°和135°偏振分量。目标信号被解析成振动方向分别为0°、45°、90°和135°的4个线偏振光,并被分色聚焦透镜聚焦在2个二元探测器上,这样每个偏振波段分别采用4个相对偏振方向(0°、45°、90°和135°)对同一目标进行扫描,从而得到4个偏振方向对应的

DN值(S_0 、 S_{45} 、 S_{90} 和 S_{135}),通过定标测量矩阵,即可解析出目标的偏振辐射测量信息(I 、 Q 、 U)。POSP偏振测量矩阵^[16]可表示为

$$\begin{bmatrix} Q/I \\ U/I \end{bmatrix} = \frac{-1}{\cos(2\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)} \begin{bmatrix} \cos 2\varepsilon_2 & -\sin 2\varepsilon_1 \\ \sin 2\varepsilon_2 & \cos 2\varepsilon_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \frac{S_0 - K_1 S_{90}}{S_0 + K_1 S_{90}} \cdot \alpha_1 - (\cos 2\varepsilon_1 \cdot q_{inst} + \sin 2\varepsilon_1 \cdot u_{inst}) \\ \frac{S_{45} - K_2 S_{135}}{S_{45} + K_2 S_{135}} \cdot \alpha_2 - (\cos 2\varepsilon_2 \cdot u_{inst} - \sin 2\varepsilon_2 \cdot q_{inst}) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: I 、 Q 和 U 为 POSP 测得的目标偏振分量信息; α_1, α_2 为实验室标定的仪器消光系数; ϵ_1, ϵ_2 为 2 块渥拉斯顿棱镜的绝对方位角偏差; K_1 为 0° 和 90° 偏振方向测量通道扣除本底后的信号之比; K_2 为 45° 和 135° 偏振方向测量通道扣除本底后的信号之比; $q_{\text{inst}}, u_{\text{inst}}$ 为仪器自身残余偏振定标系数, 可以通过仪器自身定标器数据解算; S_0, S_{45}, S_{90} 及 S_{135} 为 POSP 同一波段 4 个偏振探测通道经过扣除本底后的响应 DN 值。则目标信号的辐亮度和偏振度分别为

$$L = A^k \cdot I + B^k, \quad (2)$$

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

式中: A^k, B^k 为 k 波段的绝对辐射定标系数, 通过实验室辐射定标获取; L 为目标信号的辐亮度值; P 为目标信号的偏振度值。

3 偏振探测实验

参与偏振探测实验的 POSP 为工程样机改造产品, 其瞬时视场为 0.6° , 扫描视场为 $-38^\circ \sim 38^\circ$, 电机扫描一圈的时间为 862 ms, 采样间隔为 1.43 ms, 波段设置与星载产品保持一致。三分束同时偏振相机为 FluxData 公司的 FD-1665P, 视场为 $10^\circ \times 7.6^\circ$, 其曝光时间和增益可调。该偏振相机主要由镜头、分光棱镜、线偏振片和 CCD 组成, 目标信号通过镜头进入分光棱镜, 经分光棱镜分成 3 束振幅相同的光, 然后经过 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90° 方向的线偏振片检偏后被 3 个 CCD 探测器接收, 达到同时偏振成像的目的。波段设置为 565, 670, 763, 865, 910 nm, 并通过滤光片转轮实现波段切换。其中 670 nm 和 865 nm 为 POSP 和三分束同时偏振相机共有的光谱波段, 可以作为偏振探测实验数据对比的依据。偏振相机 3 个通道采用的是 APIR29-020 型号的偏振片, 该偏振片的光谱消光比如图 2 所示。从图 2 可以看出, 偏振片消光比在 865 nm 波段明显起伏上扬, 这导致偏振相机在该波段无法准确解析偏振信息, 所以在与 POSP 实验数据比对过程中, 仅对 2 台偏振仪器在 670 nm 波段的实验数据进行比对分析。

3.1 地面实验

POSP 偏振探测地面实验通过对天空进行扫描, 获取天空辐亮度和偏振度, 并与同时获取天空辐亮度和偏振度的三分束同时偏振相机数据进行对比。基本实验条件如下:

- a) 实验时间为 2018 年 11 月 28 日, 14:00—16:00;
- b) 天气状态为晴朗无云;
- c) 环境温度为

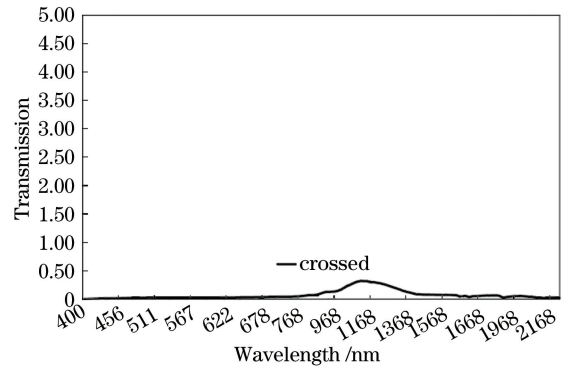


图 2 偏振片光谱消光比

Fig. 2 Spectral extinction ratio of polarizer

20°C , 湿度为 42%。

POSP 采用在轨正常工作模式获取天空偏振辐射数据。在正常采集过程中, 通过不断调整 POSP 安装基板的方位, 使 POSP 在太阳主平面内扫描并获取数据, 三分束同时偏振相机和 POSP 安装在同一基板上, 实验现场如图 3 所示。

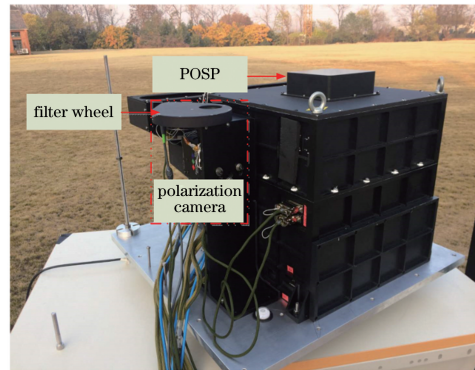


图 3 POSP 地面实验现场图

Fig. 3 Diagram of on-ground test site of POSP

地面实验结束后, 选取 POSP 和三分束同时偏振相机同时采集的天空偏振辐射数据进行处理。POSP 数据需要经过本底扣除校正、不同偏振方向通道间增益校正、仪器消光系数校正等过程, POSP 各校正系数均在仪器偏振辐射定标过程中得到^[17], 进而根据 POSP 偏振测量矩阵得到 I, Q, U 及 P 。同样, 也需对三分束同时偏振相机采集的数据进行本底扣除校正、3 个偏振通道非一致性校正和系统穆勒矩阵校正等过程, 三分束同时偏振相机各校正系数均在实验室偏振辐射定标过程中得到, 利用三分束同时偏振相机获取的天空偏振辐射数据, 可求得 I, Q, U 满足

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = [M_0 \quad M_1 \quad M_2]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_{45} \\ I_{90} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中： $[M_0 M_1 M_2]$ 为系统穆勒矩阵； I_0 、 I_{45} 和 I_{90} 为不同偏振通道扣除本底及通道非一致性校正后的响应值。

根据以上分析，可以计算出 POSP 和三分束同时偏振相机获取的天空辐亮度和偏振度，结果分别如图 4 和图 5 所示，其中图 5 为三分束同时偏振相机在 670 nm 波段的数据结果。

从图 4 中可以看出，POSP 在 670 nm 和 865 nm 通道获取的天空偏振度和辐亮度的趋势具有较好的一致性；从图 4 和图 5 可以看出，2 台偏振仪器在 670 nm 通道获取的天空偏振度和辐亮度的趋势具有较好的一致性，且天空辐亮度和偏振度缓慢变化，表明大气状态相对均匀稳定。通过对 2 台偏振仪器获取的天空偏振度和辐亮度趋势进行对

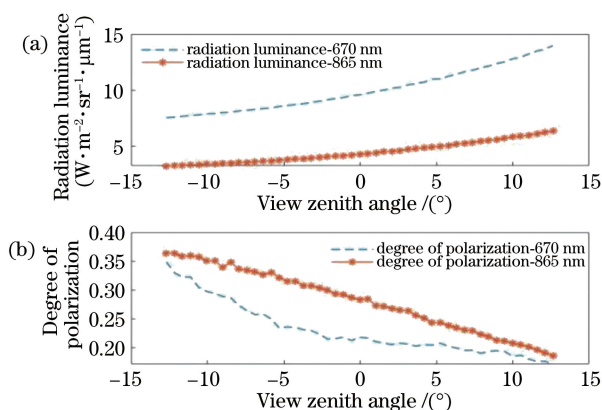


图 4 POSP 地面实验数据处理结果。

(a) 天空辐亮度；(b) 偏振度

Fig. 4 Data processing results of on-ground test of POSP.

(a) Radiation luminance; (b) degree of polarization

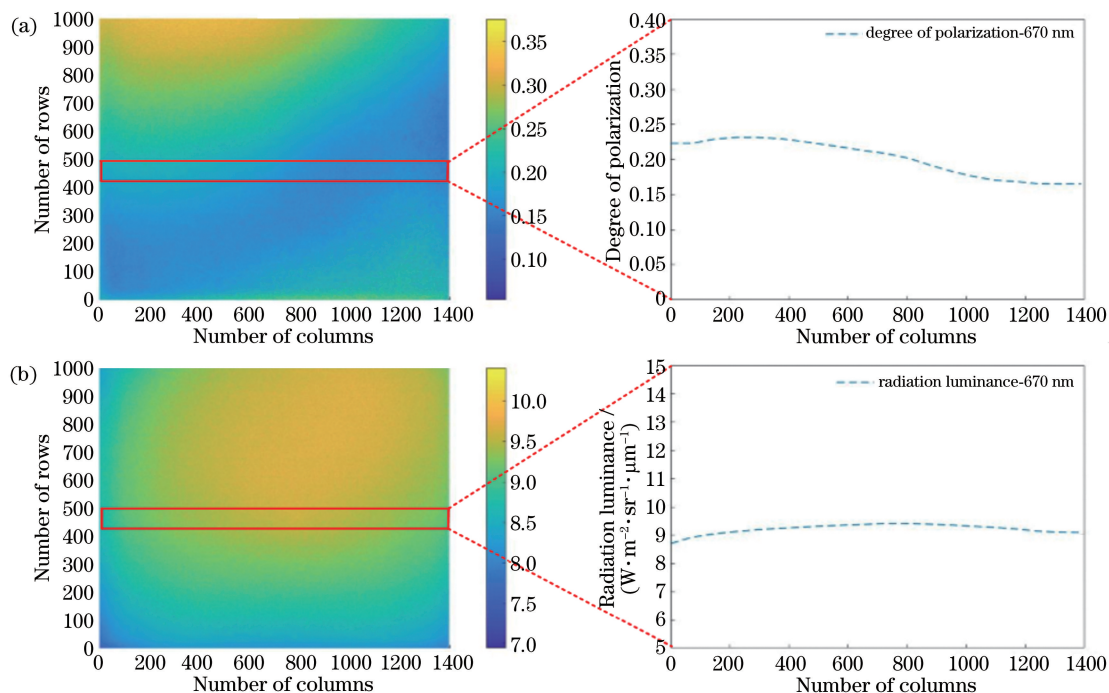


图 5 三分束同时偏振相机地面实验数据处理结果。(a) 天空偏振度；(b) 天空辐亮度

Fig. 5 Data processing results of on-ground test of three-beam simultaneous polarization camera.

(a) Degree of polarization of the sky; (b) radiation luminance of the sky

比，可以初步定性验证 POSP 地面实验数据的有效性。

3.2 航空校飞实验

航空校飞实验通过把 POSP 和三分束同时偏振相机搭载在同一飞机上进行对地观测，实验地点设在山海关地区，飞行区域在北纬 $38.92^{\circ} \sim 41.12^{\circ}$ 、东经 $119^{\circ} \sim 121^{\circ}$ 之间，航空校飞路线上串联了内陆、沿海及海洋等不同典型地表。航空校飞实验分别于 2019 年 3 月 4 日、3 月 9 日、3 月 11 日、3 月 18 日和 3 月 19 日共获取了 5 个架次近 20 h 的飞行数据，每

个架次重复实验航线飞行 2 次，天气状况覆盖多云、晴天和轻度雾霾，航高根据不同天气状况分别设置为 3, 4, 5 km。

航空校飞平台主要包括 POSP、三分束同时偏振相机、定姿定位 POS 系统以及其他辅助设备。其中，POSP 采用在轨正常工作模式进行地表偏振辐射数据获取；三分束同时偏振相机通过滤光片转轮切换，可实现不同光谱波段的分时探测；定姿定位 POS 系统用来获取 POSP 和三分束同时偏振相机的高精度姿态角度、定位坐标及航高航速等信息，用

于后续辅助数据处理;其他辅助设备主要用于实验数据的获取和存储等。

航空校飞实验结束后,首先通过平台姿态数据匹配,选取飞行平台稳定飞行时的数据,然后通过 POSP 和三分束同时偏振相机地面实验数据处理方法,分别计算了 2 台偏振仪器获取的地表辐亮度和偏振度,选取在 2019 年 3 月 11 日 POSP 和三分束同时偏振相机获取的海陆交界地表数据进行计算,结果如图 6 和图 7 所示,其中图 7 为三分束同时偏振相机在 670 nm 波段的数据结果。

从图 6 中可以看出, POSP 在 670 nm 和 865 nm 通道获取的地表偏振度和辐亮度的趋势具有较好的一致性,但在观测角为 $-15^{\circ} \sim -5^{\circ}$ 的范围内, POSP 在 670 nm 波段偏振度波动较大,且与

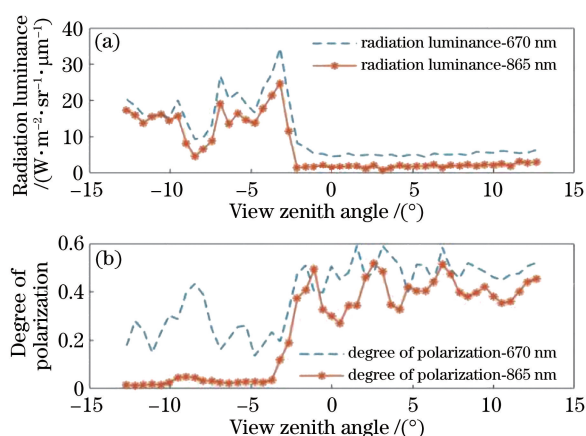


图 6 POSP 航空校飞实验数据处理结果。

(a) 天空辐亮度; (b) 偏振度

Fig. 6 Data processing results of in-flight test of POSP.

(a) Radiation luminance; (b) degree of polarization

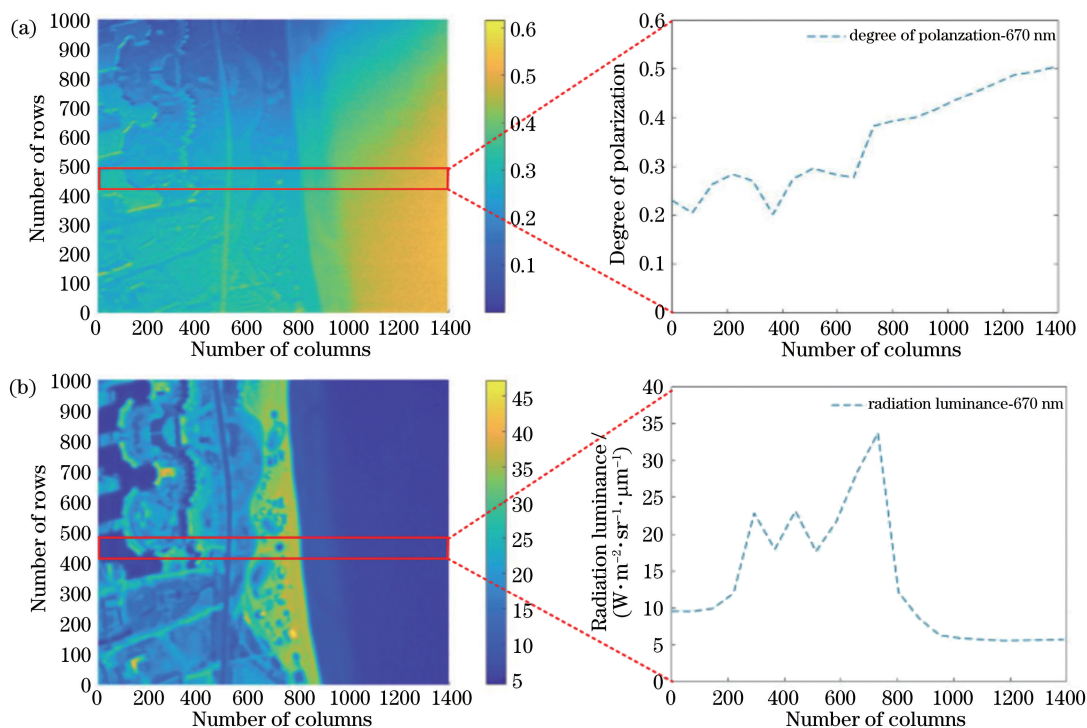


图 7 三分束同时偏振相机航空校飞实验数据处理结果。(a)地表偏振度; (b)地表辐亮度

Fig. 7 Data processing results of in-flight test of three-beam simultaneous polarization camera.

(a) Degree of polarization of the earth's surface; (b) radiation luminance of the earth's surface

865 nm 波段存在较大的偏差,其原因是 POSP 的 670 nm 波段受到航飞过程中飞机的电磁干扰。在后续数据应用过程中,需要对 POSP 的 670 nm 波段数据进行去噪处理,以提高探测数据的质量。从图 6 和图 7 中可以看出,2 台偏振仪器在 670 nm 通道获取的地表偏振度和辐亮度趋势具有较好的一致性,且海洋具有较低的反射率和较高的偏振度的特性,而陆地具有较高的反射率和较低的偏振度的特

性。通过对 2 台偏振仪器获取的地表偏振度和辐亮度趋势进行对比,可以初步定性验证 POSP 航空校飞实验数据的有效性。

4 实验结果分析

POSP 通过旋转电机实现目标采样,以获取目标偏振辐射信息。三分束同时偏振相机通过画幅式成像获取目标偏振辐射信息。POSP 的电机扫描视

场为 $-38^{\circ}\sim 38^{\circ}$,三分束同时偏振相机在 POSP 的扫描方向上的视场为 $-5^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 。当 2 台偏振仪器对同一目标进行偏振辐射信息获取时,三分束同时偏振相机在 POSP 的扫描方向上的视场近似可以覆盖 19 个 POSP 采样点,此时可以认为三分束同时偏振相机在 POSP 的扫描视场方向上的区域与 19 个 POSP 采样点具有近似相同的观测几何。因此可以通过对 2 台偏振仪器相同观测几何的区域数据进行比对分析,来定量判定 POSP 偏振探测数据的有效性。数据对比结果用 2 台偏振仪器获取的相同观测几何区域数据的辐亮度偏差 ΔL 和偏振度偏差 ΔP 表示,即

$$\Delta L = \frac{\bar{L}_{\text{POSP}} - \bar{L}_{\text{PC}}}{\bar{L}_{\text{PC}}}, \quad (5)$$

$$\Delta P = \bar{P}_{\text{POSP}} - \bar{P}_{\text{PC}}, \quad (6)$$

式中: \bar{L}_{POSP} 、 \bar{P}_{POSP} 分别为与三分束同时偏振相机具有相同观测几何的 19 个 POSP 采样点的辐亮度和

偏振度测量结果的平均值; \bar{L}_{PC} 、 \bar{P}_{PC} 分别为三分束同时偏振相机在 POSP 扫描视场方向的辐亮度和偏振度测量结果的平均值。

以三分束同时偏振相机数据为参考,在对 POSP 数据进行比对分析过程中,偏振相机的测量误差是值得考虑的因素,在此以偏振相机偏振度测量结果的不确定度来表征偏振相机的测量误差。在实验室中,通过偏振相机对相同偏振态的光进行多次测量,以测量结果的标准偏差来衡量偏振相机偏振度的测量不确定度,最后得出偏振相机偏振度的测量不确定度为 0.001。

通过以上分析,选择 2 台偏振仪器对同一目标获取的偏振辐射测量数据,分别计算 2 台偏振仪器具有相同观测几何区域的偏振度和辐亮度,并根据(5)、(6)式计算出 2 台偏振仪器获取的相同观测几何区域数据的辐亮度偏差 ΔL 和偏振度偏差 ΔP 。2 台偏振仪器实验数据的对比结果如表 1 所示。

表 1 POSP 和三分束同时偏振相机偏振探测实验数据对比结果

Table 1 Data comparison of polarization detection test of POSP and three-beam simultaneous polarization camera

Parameter	Mean of radiation luminance /		Mean of polarization		ΔL / %		ΔP
	(W · m ⁻² · sr ⁻¹ · μm ⁻¹)		degree		670 nm	865 nm	
	670 nm	865 nm	670 nm	865 nm	670 nm	865 nm	670 nm
On-ground test of POSP	9.661	4.732	0.206	0.241	2.753	2.243	0.011
On-ground test of three-beam simultaneous polarization camera	9.402	4.840	0.196	—			
In-flight test of POSP	14.934	7.196	0.328	0.096	4.562	4.206	0.017
In-flight test of three-beam simultaneous polarization camera	14.283	7.511	0.345	—			

从表 1 可以看出,相对于三分束同时偏振相机的天空和地表偏振辐射测量结果,POSP 在地面实验和航空校飞实验获取的 670 nm 通道的平均偏振度偏差均在 0.02 以内。考虑三分束偏振相机偏振度的测量不确定度为 0.001,POSP 在地面实验和航空校飞实验获取的 670 nm 通道的平均偏振度偏差均在 0.02 以内;在地面实验中获取的 670 nm 和 865 nm 通道的平均辐亮度偏差在 0.03 以内,而在航空校飞实验中获取的 670 nm 和 865 nm 通道的平均辐亮度偏差在 0.05 以内。航空校飞实验中 POSP 与三分束同时偏振相机获取的辐亮度偏差比地面实验的辐亮度偏差大 0.02 左右,这可能是 2 台偏振仪器像元配准误差导致观测几何不一致及飞机飞行过程中的不稳定导致偏航等因素引起的。

通过对以上偏振探测实验数据进行分析,可以看出 2 台偏振仪器对天空和地表扫描过程获取的目

标偏振度和辐亮度具有较好的一致性,说明 POSP 和三分束同时偏振相机在外场自然目标下偏振测量模型的正确性和偏振定标模型的准确性,初步验证了 POSP 偏振探测实验获取数据的有效性。

5 结 论

通过对 POSP 的地面实验和航空校飞实验数据进行处理分析,分别解析出了天空和地表量化的辐亮度和偏振度数值,并在偏振探测实验中配置了 1 台三分束同时偏振相机,以获取天空和地表偏振辐射的数据。通过对 POSP 和三分束同时偏振相机获取的辐亮度和偏振度数据进行比对分析得出,相对于三分束同时偏振相机获取的目标偏振度和辐亮度数据,POSP 获取的与三分束同时偏振相机具有相同观测几何的天空和地表偏振度偏差在 0.02 以内,辐亮度偏差在 0.05 以内。结果表明,2 台偏振仪

器获得的辐亮度和偏振度数据具有较好的一致性,初步验证了 POSP 偏振探测实验数据的有效性。此外,实验获取的偏振辐射数据可为后期大气气溶胶参数的反演提供有效的支持,有助于 POSP 数据反演算法的开发与优化。

参 考 文 献

- [1] Coakley J A, Jr, Cess R D, Yurevich F B. The effect of tropospheric aerosols on the Earth's radiation budget: a parameterization for climate models [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, 40(1): 116-138.
- [2] Schwartz S E, Arnold F, Blanchet J P, *et al.* Group report: connections between aerosol properties and forcing of climate [J]. *Aerosol Forcing of Climate*, 1995: 251-280.
- [3] Zhang J Q, Xue C, Gao Z L, *et al.* Optical remote sensor for cloud and aerosol from space: past, present and future [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 679-698.
张军强, 薛闯, 高志良, 等. 云与气溶胶光学遥感仪器发展现状及趋势 [J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 679-698.
- [4] Fan X H, Chen H B, Xia X A. Progress in observation studies of atmospheric aerosol radiative properties in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(2): 477-498.
范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌. 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展 [J]. *大气科学*, 2013, 37(2): 477-498.
- [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] Andre Y, Laherrere J M, Bret-Dibat T, *et al.* Instrumental concept and performances of the POLDER instrument [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2572: 79-90.
- [7] Manolis I, Grabarnik S, Caron J, *et al.* The MetOp second generation 3MI instrument [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8889: 88890J.
- [8] Peralta R J, Nardell C, Cairns B, *et al.* Aerosol polarimetry sensor for the glory mission [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6786: 67865L.
- [9] Persh S, Shaham Y J, Benami O, *et al.* Ground performance measurements of the glory aerosol polarimetry sensor [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7807: 780703.
- [10] Neilsen T L, Martins J V, Fish C S, *et al.* The Hyper-Angular Rainbow Polarimeter (HARP) CubeSat observatory and the characterization of cloud properties [C]//AGU Fall Meeting Abstracts, December 15-19, 2014, San Francisco, USA. New York: AGU, 2014.
- [11] Liu Y, Diner D J. Multi-angle imager for aerosols [J]. *Public Health Reports*, 2017, 132(1): 14-17.
- [12] 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.
- [13] Yin D K. Multi-angle polarization detection technology [J]. *Infrared*, 2019, 40(1): 1-6, 23.
殷德奎. 多角度偏振探测技术 [J]. *红外*, 2019, 40(1): 1-6, 23.
- [14] Sun X B, Hong J, Qiao Y L. Investigation of measurements of polarized properties of atmospheric scattering radiation [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(1): 111-115.
孙晓兵, 洪津, 乔延利. 大气散射辐射偏振特性测量研究 [J]. *量子电子学报*, 2005, 22(1): 111-115.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Yang H C, Yang B Y, Song M X, *et al.* Onboard polarimetric calibration methods of spaceborne scanning polarimeter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(11): 1110002.
杨洪春, 杨本永, 宋茂新, 等. 星载偏振扫描仪的星上偏振定标方法 [J]. *中国激光*, 2018, 45(11): 1110002.