

# 星载偏振扫描仪星上偏振定标器

杨洪春<sup>1,2,3\*\*</sup>, 洪津<sup>1,3\*</sup>, 邹鹏<sup>1,3</sup>, 宋茂新<sup>1,3</sup>, 杨本永<sup>1,3</sup>, 刘振海<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

<sup>3</sup>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** 为了满足偏振扫描仪的偏振测量精度要求, 提出一种利用偏振扫描仪星上偏振定标器精确测量标准偏振态数值的方法。首先介绍了偏振扫描仪的技术特点、测量原理和偏振定标模型; 其次结合仪器特性, 将地球反照光+线偏振定标器/非偏振定标器作为在轨偏振定标的偏振态标准源; 然后分别设计了专用的线偏振定标器和非偏振定标器; 最后利用马吕斯定律确定线偏振定标器的偏振态数值, 将星下点数据筛选出线偏振度小于 0.4 的下垫面反射光作为非偏振定标器的有效光源, 以获得符合要求的非偏振光。所设计的定标器符合全光路、全孔径、端到端的要求, 可保障长期在轨偏振测量精度为 0.005。

**关键词** 测量; 偏振定标; 偏振定标器; 偏振扫描仪; 偏振测量; 气溶胶

**中图分类号** P407.4; P161.3

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201939.0912005

## Onboard Polarization Calibrators of Spaceborne Particulate Observing Scanning Polarimeter

Yang Hongchun<sup>1,2,3\*\*</sup>, Hong Jin<sup>1,3\*</sup>, Zou Peng<sup>1,3</sup>, Song Maoxin<sup>1,3</sup>,  
Yang Benyong<sup>1,3</sup>, Liu Zhenhai<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

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

**Abstract** To achieve high polarization measurement accuracy of a particulate observing scanning polarimeter (POSP), onboard polarization calibrators are designed and a novel measurement method for their polarization state value is studied. First, the instrument overview, measurement principle, and polarization calibration model of the POSP are introduced. Second, based on the instrument characteristics, we proposed earthshine combined linear polarization calibrator (LPC) or non-polarization calibrator (NPC), two types of standard polarization state sources, and then design the LPC and NPC in detail. Finally, Marius's law is used to determine the polarization state value of the LPC. Data from observations of the satellite nadir are utilized to choose a underlying surface with a degree of linear polarization less than 0.4 as the effective light source for NPC. The two calibrators meet the requirements of full path, full aperture, and end-to-end calibration, ensuring the long-term polarization measurement accuracy of 0.005.

**Key words** measurement; polarization calibration; polarization calibrator; scanning polarimeter; polarization measurement; aerosols

**OCIS codes** 120.0280; 150.1488; 120.5410

## 1 引 言

大气气溶胶和云具有复杂的物理光学特性,

是影响直接辐射效应和间接辐射效应不确定性评估的重要因素<sup>[1]</sup>。相较于传统的强度信息,多角度偏振信息对气溶胶和云的散射辐射更敏感,根

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-05-14; 录用日期: 2019-05-31

基金项目: 高分辨率对地观测系统专项(30-Y20A19-9007-15/17)、国家自然科学基金(41875042)、王宽诚率先人才计划“卢嘉锡国际合作团队项目”(GJTD-2018-15)

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

据多角度偏振信息可获得粒子形状、粒径大小等参数<sup>[2]</sup>。由于偏振信息具有矢量特性,偏振探测在气溶胶与云遥感、大气校正、海洋遥感、目标识别等方面的应用具有显著优势<sup>[3]</sup>。国际上最著名的星载偏振遥感器是法国国家空间研究中心(CNES)研制的 POLDER 系列(1996—2013),可获得全球大气气溶胶的偏振和辐射信息,在大气反演和气候变化评估中发挥了重要作用,因此偏振探测在大气遥感领域受到广泛关注<sup>[4]</sup>。欧洲空间局(ESA)继承了 POLDER 的设计理念,发展了新一代多角度多光谱多偏振成像仪(3MI),并将其搭载在第二代欧洲气象卫星(MetOp-SG)上<sup>[5]</sup>。此外,美国的 APS<sup>[6]</sup>、HARP<sup>[7]</sup>、MSPI<sup>[8]</sup>,荷兰的 SPEX<sup>[9]</sup>,日本的 SGLI<sup>[10]</sup>都是近 10 年研制的经典偏振遥感器。国内在轨的偏振遥感器主要有中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的云与气溶胶探测仪(CAPI)<sup>[11]</sup>,中国科学院上海技术物理所研制的多角度偏振探测仪(MAI)<sup>[12]</sup>和中国科学院安徽光学精密机械所研制的多角度偏振成像仪(DPC)<sup>[13-14]</sup>。

偏振扫描仪(POSP)是我国研究人员设计的新一代光学偏振遥感器,用于获取全球大气气溶胶、云和细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)的综合参数。偏振精度可用于衡量偏振仪器测量性能,决定了遥感信息和综合参数反演的精度。相关研究表明,采用偏振精度优于 0.005 的偏振测量数据,可极大提高气溶胶参数的反演精度<sup>[15]</sup>。星载遥感器所处的环境通常是火箭发射或卫星在轨运行时的复杂环境,为保证仪器测

量精度和长期稳定性,遥感仪器的在轨定标不可或缺。在轨定标可分为星上定标、交叉定标和场地定标<sup>[16]</sup>;具有高精度、高频次和效率的星上定标为遥感器在轨定标的首选<sup>[17]</sup>。星载 POSP 中采用星上偏振定标为相关参数进行在轨定标,以确保 POSP 在轨运行时的测量精度和准确性<sup>[18]</sup>。本文介绍了 POSP 星载仪器和定标理论,设计出线偏振定标器(LPC)和非偏振定标器(NPC),并提出一种确定偏振态数值的方法。

## 2 仪器原理

### 2.1 仪器简介

如图 1 所示,POSP 光学系统主要包括扫描反射镜组(SMA)、望远透镜、视场光阑、准直透镜、沃拉斯顿棱镜(WP)、分色片、聚焦透镜、带通滤光片以及双元探测器。POSP 的基本原理是利用两套相同的望远系统对目标进行测量,通过一对方位角为 45°的 WP(WP1 和 WP2)对光束进行偏振分光和偏振解析,再用一对双元探测器分别接收 0°/90°和 45°/135°这 4 个偏振解析方向的光强信号,探测目标的线偏振分量。光路中采用分色片与带通滤光片的组合设计了三个光谱波段。POSP 共包含三对相似光路,对应光谱波段分别为 0.380 μm/0.443 μm/0.670 μm;0.410 μm/0.490 μm/0.865 μm;1.380 μm/1.610 μm/2.250 μm,同时获取太阳反射光谱内的 9 个探测气溶胶和云的典型波段的偏振和辐射信息。POSP 的瞬时视场设计值为 0.52°,星下点的空间分辨率为 6.4 km,偏振精度为 0.005。

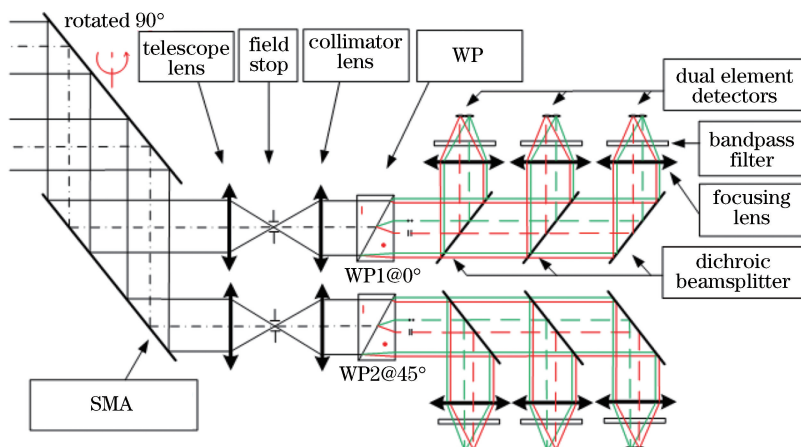


图 1 POSP 光路图

Fig. 1 Optical layout of POSP

### 2.2 测量原理

目标光波的 Stokes 矢量为  $[I \ Q \ U]^T$ , 其中  $I$  为光强,  $Q$  和  $U$  均为线偏振分量, 本研究采用归一化

参量  $q = Q/I$ ,  $u = U/I$  表示目标的线偏振分量。根据文献<sup>[19]</sup>, POSP 的测量方程可表示为

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

式中： $S_0, S_{90}, S_{45}, S_{135}$  分别为  $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ, 135^\circ$  探测器输出的有效 DN(digital number) 值； $K_1, K_2$  分别为光路 1、2 中两个偏振正交通道的相对通道响应系数； $q_{\text{inst}}, u_{\text{inst}}$  为仪器偏振； $\epsilon_1, \epsilon_2$  为 WP 的绝对方位角偏差； $\alpha_1 = (e_1 + 1)/(e_1 - 1), \alpha_2 = (e_2 + 1)/(e_2 - 1)$ ， $e_1, e_2$  为光路 1、2 的消光比，本研究的消光比定义为最大透过光强与最小透过光强之比。上述参数中， $S_0, S_{90}, S_{45}, S_{135}$  由探测器直接测量得到；系数  $q_{\text{inst}}, u_{\text{inst}}$  和  $\epsilon_1, \epsilon_2$  只与仪器装调等因素有关，可在实验室定标完成；相对通道响应系数  $K_1, K_2$  和消光系数  $\alpha_1, \alpha_2$  会随空间环境的变化而变化，由星上偏振定标来校正。

目标线偏振度  $p$  和偏振角  $\chi$  的表达式为

$$p = \sqrt{q^2 + u^2}, \quad p \in [0, 1], \quad (2)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \arctan(u/q), \quad \chi \in (-\pi/2, \pi/2). \quad (3)$$

### 2.3 定标模型

理论上，选用任意两种偏振态已知的部分线偏振光均能求解(1)式的定标系数  $K_1, K_2$  和  $\alpha_1, \alpha_2$ 。当输入光为偏振度较低的部分偏振光或者非偏振光时，其偏振态记为  $q_{\text{cal}}^0, u_{\text{cal}}^0$ ，相应探测器输出的有效 DN 值分别记为  $S_0^0, S_{90}^0, S_{45}^0, S_{135}^0$ ；当输入光为偏振度较高的部分偏振光或完全线偏振光时，其偏振态记为  $q_{\text{cal}}^1, u_{\text{cal}}^1$ ，对应的有效 DN 值分别记为  $S_0^1, S_{90}^1, S_{45}^1, S_{135}^1$ 。假设  $r_1^0 = S_0^0/S_{90}^0, r_1^1 = S_0^1/S_{90}^1, r_2^0 = S_{45}^0/S_{135}^0, r_2^1 = S_{45}^1/S_{135}^1$ ，则 POSP 的偏振定标方程<sup>[20]</sup>可表示为

$$K_1 = \frac{1}{2} (r_1^0 - r_1^1) \frac{A+B}{A-B} + \sqrt{r_1^0 r_1^1 + \frac{1}{4} (r_1^0 - r_1^1)^2 \left( \frac{A+B}{A-B} \right)^2}, \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} (r_2^0 - r_2^1) \frac{C+D}{C-D} + \sqrt{r_2^0 r_2^1 + \frac{1}{4} (r_2^0 - r_2^1)^2 \left( \frac{C+D}{C-D} \right)^2}, \quad (5)$$

$$\alpha_1 = A \cdot \frac{r_1^1 + K_1}{r_1^1 - K_1}, \quad (6)$$

$$\alpha_2 = C \cdot \frac{r_2^1 + K_2}{r_2^1 - K_2}, \quad (7)$$

式中： $A, B, C, D$  均为参数，其表达式分别为

$$A = \frac{\cos(2\epsilon_1)(q_{\text{inst}} - q_{\text{cal}}^1) + \sin(2\epsilon_1)(u_{\text{inst}} - u_{\text{cal}}^1)}{1 + q_{\text{inst}} q_{\text{cal}}^1 + u_{\text{inst}} u_{\text{cal}}^1}, \quad (8)$$

$$B = \frac{\cos(2\epsilon_1)(q_{\text{inst}} - q_{\text{cal}}^0) + \sin(2\epsilon_1)(u_{\text{inst}} - u_{\text{cal}}^0)}{1 + q_{\text{inst}} q_{\text{cal}}^0 + u_{\text{inst}} u_{\text{cal}}^0}, \quad (9)$$

$$C = \frac{-\sin(2\epsilon_2)(q_{\text{inst}} - q_{\text{cal}}^1) + \cos(2\epsilon_2)(u_{\text{inst}} - u_{\text{cal}}^1)}{1 + q_{\text{inst}} q_{\text{cal}}^1 + u_{\text{inst}} u_{\text{cal}}^1}, \quad (10)$$

$$D = \frac{-\sin(2\epsilon_2)(q_{\text{inst}} - q_{\text{cal}}^0) + \cos(2\epsilon_2)(u_{\text{inst}} - u_{\text{cal}}^0)}{1 + q_{\text{inst}} q_{\text{cal}}^0 + u_{\text{inst}} u_{\text{cal}}^0}. \quad (11)$$

为使偏振定标过程简单便捷，POSP 中采用非偏振光和完全线偏振光作为标准偏振态光源。这两种入射光为理想光源时，对应的偏振态分别为  $q_{\text{cal}}^0 = 0, u_{\text{cal}}^0 = 0$  和  $q_{\text{cal}}^1 = \cos(2\theta), u_{\text{cal}}^1 = \sin(2\theta)$ ，其中  $\theta$  为线偏振光的方位角，研究认为，方位角为  $\theta = (2n+1) \cdot 22.5^\circ (n=0, 1, 2, 3)$  的完全线偏振光为最优光源。

仪器偏振  $q_{\text{inst}}, u_{\text{inst}}$  是由正交反射镜的非对称性引起的，装调结果显示其值小于 0.001。在入射光为理想的非偏振光源情况下，(4) 式和 (5) 式中  $B, D$  的数值非常小，因子  $\frac{A+B}{A-B}, \frac{C+D}{C-D}$  可直接取值为 1，则有

$$K_1 = S_0^0/S_{90}^0, \quad (12)$$

$$K_2 = S_{45}^0/S_{135}^0. \quad (13)$$

## 3 星上偏振定标器

### 3.1 总体设计

POSP 星上偏振定标既要遵循全光路、全孔径、端到端的设计原则，又要满足高频次、高效率、高精度的定标要求。根据 POSP 扫描反射镜匀速旋转和瞬时视场小的特点，将定标器放置在定标光路的最前端，分布在扫描反射镜的周围。星上偏振定标光源没有选择常见的太阳光或标准灯，而是选择了地

球反射光。虽然太阳光作为自然光,是理想的非偏振光,但若通过扫描反射镜将其直接引入光路时,相应定标器的设计会非常复杂,且偏振定标器受太阳光频繁照射,其性能衰减或损伤不可避免,而且定标频次低;标准灯不仅难以覆盖  $0.380\sim 2.250\ \mu\text{m}$  波段的光谱,而且难以满足可靠性高、寿命长的要求。选择地球反射光作为偏振定标光源,其优点有:1) POSP 星上偏振定标与地球扫描观测的光谱响应和动态范围非常一致;2) 扫描反射镜转动一周,可同时获得偏振定标与对地观测数据。POSP 星上偏振定标系统的布局如图 2 所示,星下点地球反射光分别经过非偏振定标器和线偏振定标器偏转  $90^\circ$  后进入扫描反射镜,POSP 扫描反射镜每转动一周( $T=0.98\ \text{s}$ )就能获得一组偏振定标数据。

### 3.2 线偏振定标器

线偏振定标器可将地球反照光源调制成已知偏振态的线偏振光源。线偏振器采用双折射晶体型的格兰泰勒棱镜,相对于二向色性偏振片或线栅偏振器,其消光比更高,光谱波段更宽,抗光损伤阈值高,是一种优良的线偏振器<sup>[21]</sup>。格兰泰勒棱镜的晶体材料选择方解石(calcite),其双折射率大于偏硼酸钡晶体( $\alpha$ -BBO)的双折射率,而其在近紫外波段的透过率明显高于钽酸钪晶体(YVO<sub>4</sub>)。格兰泰勒棱镜由两块相同的单轴晶体三角形棱镜组成,中间为空气隙,利用晶体的双折射效应可将入射光分离为

表 1 结构角为  $39.5^\circ$  时,各波段入射视场角的数值

Table 1 Values of field angle calculated at each waveband when structure angle is  $39.5^\circ$

CWL / $\mu\text{m}$	0.380	0.410	0.443	0.490	0.670	0.865	1.380	1.610	2.250
Angle of e-ray incidence / $^\circ$	3.47	3.64	3.78	3.93	4.23	4.38	4.52	4.56	4.64
Angle of o-ray incidence / $^\circ$	5.31	4.99	4.71	4.41	3.80	3.48	3.01	2.82	2.20

POSP 的三条光路中 WP 偏振解析方位如图 3 所示,其中实心双箭头表示 WP 偏振分光的平行分量( $0^\circ$ 或  $45^\circ$ ),空心双箭头表示垂直分量( $90^\circ$ 或  $135^\circ$ ),其配对光路的平行分量呈  $45^\circ$ 。在仪器坐标系  $O$ -XYZ 中,可见近红外波段的  $0^\circ$  偏振方位与 Y 轴的夹角为  $22.5^\circ$ ,而短波红外波段的  $0^\circ$  偏振方位与 +Z 轴的夹角为  $22.5^\circ$ 。POSP 偏振定标的线偏振光方位与各通道的  $0^\circ$  偏振方位的夹角为  $22.5^\circ$ ,而且扫描反射镜将图 3 所示的坐标系空间旋转了  $90^\circ$ ,线偏振定标器中格兰泰勒棱镜的布局如图 4 所示。

线偏振定标器由一块铝基反射镜(未在图 4 中标出)和 6 块格兰泰勒棱镜组成,双箭头表示格

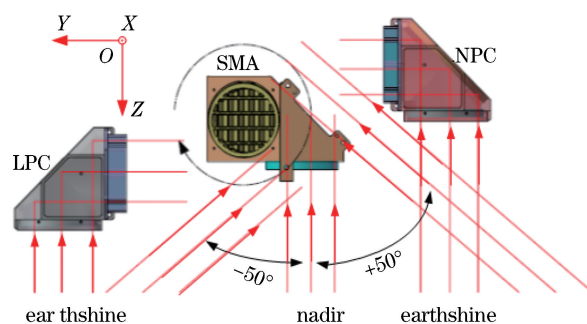


图 2 POSP 星上偏振定标器布局图

Fig. 2 Layout of POSP onboard polarization calibrators

兰泰勒棱镜的光轴方向,即线偏振光的振动方向;其中用于可见近红外波段定标的线偏振光沿 Z 轴传播,而用于短波红外波段的线偏振光沿 X 轴传播。格兰泰勒棱镜的口径设计综合考虑了视场大小、采样数量以及像旋的影响,确保在连续匀速旋转扫描反射镜的工况下获得三个有效采样定标数据,棱镜尺寸分别为  $18\ \text{mm}\times 21\ \text{mm}\times 18\ \text{mm}$  和  $23\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}\times 20\ \text{mm}$ (对应于图 4 的  $X\times Z\times Y$ )。

o 光和 e 光,当入射到晶体-空气界面时,o 光的入射角大于其全反射临界角,o 光全反射逃逸,而 e 光的入射角小于全反射临界角,e 光透射进入光路。根据色散公式和全反射公式,在  $0.380\sim 2.250\ \mu\text{m}$  波段的光谱上,e 光的最小全反射角临界值为  $41.83^\circ$ ,o 光的最大全反射角临界值为  $38.14^\circ$ ,格兰泰勒棱镜的结构角须介于  $38.14^\circ$  与  $41.83^\circ$  之间。另外,格兰泰勒棱镜的入射光角度范围通常较小,随着入射角度的增大,格兰泰勒棱镜的消光比会下降。本研究选择的结构角为  $39.5^\circ$ ,此时各谱段的入射视场角范围如表 1 所示,可以看出上入射角(e 光入射角)随中心波长(CWL)的增大而增大,下入射角(o 光入射角)随中心波长的增大而减小,满足 POSP 要求格兰泰勒棱镜入射角的视场角为  $2^\circ$  的设计需求。

### 3.3 非偏振定标器

非偏振定标器中利用退偏器将地球反照光源调制为偏振度为 0 的非偏光源,其结构与线偏振定标器相同,布局上呈镜像关系。退偏器选用改进型

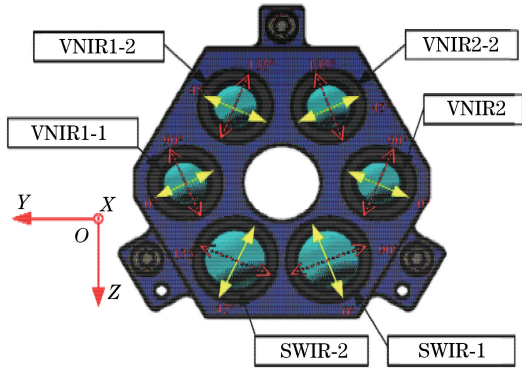


图 3 POSP 偏振解析方位示意图

Fig. 3 Schematic of POSP polarization analytic orientation

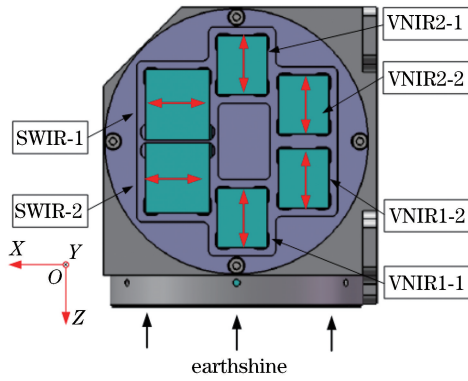


图 4 线偏振定标器的线偏振光方位示意图

Fig. 4 Schematic of linear polarized light orientation of LPC

Lyot 退偏器,由两块晶轴夹角为  $45^\circ$  的石英晶体光楔组成,楔角为  $\beta$ ,晶体的中心厚度分别为  $d_1$  和  $d_2$ ,通常取  $d_2=2d_1$ ,结构如图 5 所示。两块晶体的相位延迟量分别为  $\delta_1=2\pi\Delta n(d_1-a\cdot\tan\beta)/\lambda$ ,  $\delta_2=2\pi\Delta n(d_2+a\cdot\tan\beta)/\lambda$ ,  $\Delta n=n_e-n_o$  为双折射率,  $\lambda$  为入射光的波长,  $a$  为半径。根据矩阵光学原理, Lyot 退偏器的 Mueller 矩阵<sup>[22-23]</sup>可表示为

$$\mathbf{M}_{\text{Lyot}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_2 & \sin \delta_1 \sin \delta_2 & -\cos \delta_1 \sin \delta_2 \\ 0 & 0 & \cos \delta_1 & \sin \delta_1 \\ 0 & \sin \delta_2 & -\sin \delta_1 \cos \delta_2 & \cos \delta_1 \cos \delta_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

偏振光经过石英晶体光楔退偏器,被调制成具有不同延迟量的偏振光,在空间维和光谱维上进行叠加,输出非偏振光。图 6 所示为水平线偏振光经过通光口径为 20 mm 的 Lyot 退偏器后输出光偏振态在空间上的分布情况。

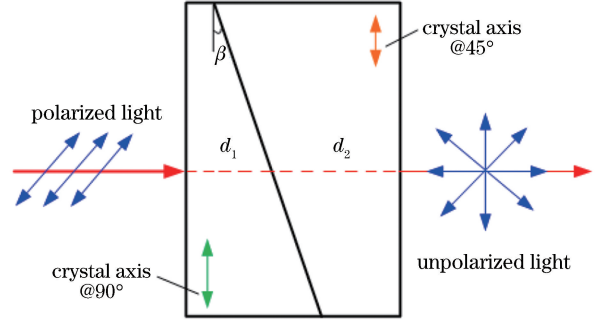


图 5 改进型 Lyot 退偏器示意图

Fig. 5 Schematic of modified Lyot depolarizer

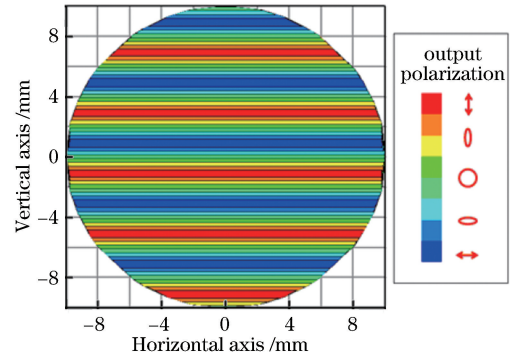


图 6 水平线偏振光经过退偏器后的空间分布示意图

Fig. 6 Spatial distribution of horizontal polarized light passing through modified Lyot depolarizer

输入方位角为  $\phi$  的线偏振光的 Stokes 矢量为  $\mathbf{S}_i = [1 \cos(\phi) \sin(\phi) 0]^T$ , 输出光的 Stokes 矢量为  $\mathbf{S}_o = [I' Q' U' V']^T$ , 则有

$$\mathbf{S}_o = \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} \int_{A_a} \mathbf{M}_{\text{Lyot}} d\mathbf{S} d\lambda \cdot \mathbf{S}_i, \quad (15)$$

式中:  $A_a$  为退偏器的实际通光区域;  $\Delta\lambda$  为光谱带宽。

输出光的 Stokes 矢量的参量分别为

$$I' = 2a \Delta\lambda, \quad (16)$$

$$Q' = \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} a \sin(2\phi) \cos \left[ \frac{2\pi\Delta n}{\lambda} (d_2 - d_1) \right] \text{sinc} \left( \frac{2\pi\Delta n}{\lambda} 2a \tan \beta \right) d\lambda + \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} 2a \cos(2\phi) \cos \left( \frac{2\pi\Delta n}{\lambda} d_2 \right) \text{sinc} \left( \frac{2\pi\Delta n}{\lambda} a \tan \beta \right) d\lambda - \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} a \sin(2\phi) \cos \left[ \frac{2\pi\Delta n}{\lambda} (d_2 + d_1) \right] d\lambda, \quad (17)$$

$$U' = \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} 2a \sin(2\phi) \cos\left(\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}d_1\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}a \tan \beta\right) d\lambda, \quad (18)$$

$$V' = \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} a \sin(2\phi) \sin\left[\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}(d_2 - d_1)\right] \operatorname{sinc}\left(\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}2a \tan \beta\right) d\lambda + \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} 2a \cos(2\phi) \sin\left(\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}d_2\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}a \tan \beta\right) d\lambda - \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} a \sin(2\phi) \sin\left[\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}(d_2 + d_1)\right] d\lambda. \quad (19)$$

(15)~(17)式含有 sinc 函数项和三角函数积分项。当 sinc 函数的自变量  $2\pi\Delta n \cdot a \cdot \tan \beta/\lambda$  足够大时, sinc 的函数值趋于零,即通光半径  $a$  或楔角  $\beta$  取值要足够大。当 sinc 函数取零时,(15)~(17)式可简化为

$$Q' = - \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} a \sin(2\phi) \cos\left[\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}(d_2 + d_1)\right] d\lambda, \quad (20)$$

$$U' = 0, \quad (21)$$

$$V' = - \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} a \sin(2\phi) \sin\left[\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}(d_2 + d_1)\right] d\lambda. \quad (22)$$

POSP 只能测量线偏振分量,而大气散射光中圆偏振分量很小,可以忽略,所以本研究只考虑经过退偏器后的残余线偏振度。任意线偏振光经退偏器后的线偏振度为

$$P = \sqrt{Q'^2 + U'^2} / I' = \left| \frac{1}{2} \sin(2\phi) \frac{\int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} \cos\left(\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}3d_1\right) d\lambda}{\Delta\lambda} \right|. \quad (23)$$

由(23)式可知,当线偏振光的入射方位角  $\phi = \pi/4$  或  $3\pi/4$  时,残余线偏振度最大;当  $\phi = 0, \pi/2, \pi$  时,残余线偏振度为零。故在设计仿真中,取  $\phi = \pi/4$ 。选取合适的  $d_1$ ,使得  $P$  趋于零,具体的设计值见表 2。其中退偏器通光直径由 POSP 的光学系统决定,可见近红外波段的通光直径为 12 mm,短波红外波段的通光直径为 18 mm。另外,当自变量

$2\pi\Delta n \cdot a \cdot \tan \beta/\lambda$  足够大时,为了控制 o 光与 e 光的出射分离角,取  $\beta = 2^\circ$ 。从表 2 可以看到:当入射光为  $45^\circ$  方位角的线偏振光时,仿真出的各波段的残余线偏振度  $P$  均小于 0.01;当线偏振光以其他方位入射时,所计算出的残余线偏振度会更小。为了获得三个有效采样数据,退偏器的口径大小与格兰泰勒棱镜相同。表 2 中,FWHM 为半峰全宽,Thickness 为退偏器的厚度。

## 4 偏振态数值的确定方法

### 4.1 线偏振定标器输出偏振态

线偏振定标器输出的线偏振光的偏振态为  $q_{\text{cal}}^1 = \cos(2\theta)(e-1)/(e+1)$ ,  $u_{\text{cal}}^1 = \sin(2\theta)(e-1)/(e+1)$ ,  $e$  为格兰泰勒棱镜的消光比,  $\theta$  为偏振方位角。格兰泰勒棱镜方位角  $\theta$  的设计值为  $22.5^\circ$ ,理想的偏振态为  $q_{\text{cal}}^1 = u_{\text{cal}}^1 = \sqrt{2}/2$ 。在实际应用中,  $q_{\text{cal}}^1$ 、 $u_{\text{cal}}^1$  数值误差要求为 0.002。影响偏振  $q_{\text{cal}}^1$ 、 $u_{\text{cal}}^1$  数值误差的因素是消光比  $e$  和方位角  $\theta$ 。格兰泰勒棱镜的消光比  $e$  达到  $10^5$ ,在使用过程中,即使降低温度或者力学环境对消光比的影响,格兰泰勒棱镜的消光比仍大于  $10^4$  量级,其对  $q_{\text{cal}}^1$ 、 $u_{\text{cal}}^1$  数值误差的影响小于  $10^{-4}$ ,故可以忽略消光比变化的影响,即  $q_{\text{cal}}^1 = \cos(2\theta)$ ,  $u_{\text{cal}}^1 = \sin(2\theta)$ 。为了实现  $q_{\text{cal}}^1$ 、 $u_{\text{cal}}^1$  数值误差小于 0.002,偏振方位角  $\theta$  的误差应小于  $0.06^\circ$ 。实验室常用的偏振方位角测量方法是步进旋转大口径偏振片,测量并拟合消光曲线,其测量精度为  $0.02^\circ$ ,

表 2 Lyot 改进型退偏器设计参数

Table 2 Design parameters of modified Lyot depolarizer

CWL / $\mu\text{m}$	0.380	0.410	0.443	0.490	0.670	0.865	1.380	1.610	2.250
FWHM / $\mu\text{m}$	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.040	0.040	0.060	0.080
Diameter / mm	12	12	12	12	12	12	18	18	18
Thickness / mm	14.70	14.70	14.70	14.70	14.70	14.70	15.49	15.49	15.49
Angle of wedge / ( $^\circ$ )	2								
$P$	0.0015	0.0045	0.0034	0.0003	0.0070	0.0012	0.0046	0.0063	0.0011

可满足测量要求,具体方法见文献[24]。

POSP 中线偏振定标器出射的线偏振光与 WP (可看作水平和垂直两个偏振分析器)的关系满足马吕斯定律。图 7 为线偏振光与一对 WP 解析方位的示意图,透射光强  $I_0 = A_0^2$ 、 $I_{90} = A_{90}^2$  分别与入射光强  $I_1 = A_1^2$  之间满足:  $I_0 = I_1 \cos^2 \varphi_1$ ,  $I_{90} = I_1 \sin^2 \varphi_1$ , 故有

$$\tan^2 \varphi_1 = I_{90}/I_0 = S_{90}/S_0, \quad (24)$$

$$\tan^2 \varphi_2 = I_{135}/I_{45} = S_{135}/S_{45}, \quad (25)$$

式中:  $A_1$ 、 $A_2$  分别表示 WP1、WP2 对应的格兰泰勒棱镜生成线偏振光的振幅;  $A_0$ 、 $A_{90}$ 、 $A_{45}$ 、 $A_{135}$  分别表示线偏振光经过 WP1、WP2 后的振幅;  $I_0$ 、 $I_{90}$ 、 $I_{45}$ 、 $I_{135}$  为相应线偏振光的光强;  $S_0$ 、 $S_{90}$ 、 $S_{45}$ 、 $S_{135}$  为相应的有效灰度值。

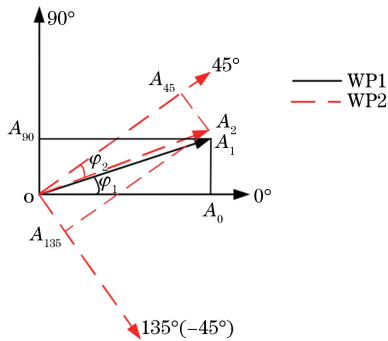


图 7 格兰泰勒棱镜与 WP 的方位关系示意图

Fig. 7 Schematic of orientation relationship between Glan-Taylor polarizer and WP

使用格兰泰勒棱镜与 WP 的  $0^\circ$  解析方位的夹角(局部坐标系)来表征偏振态  $q_{cal}^1$ 、 $u_{cal}^1$ , 即 WP1 与格兰泰勒棱镜的夹角  $\theta_1 = \varphi_1$ , WP2 与格兰泰勒棱镜

的夹角  $\theta_2 = 45^\circ + \epsilon - \varphi_2$ , 其中  $45^\circ + \epsilon$  是 WP1 与 WP2 实际测量的方位夹角。WP1 光路输入的线偏振光的偏振态为  $q_{cal1}^1 = \cos(2\theta_1)$ ,  $u_{cal1}^1 = \sin(2\theta_1)$ ; WP2 光路输入线偏振光的偏振态为  $q_{cal2}^1 = \cos(2\theta_2)$ ,  $u_{cal2}^1 = \sin(2\theta_2)$ 。该方法的测量误差主要来源于角度传感器的定位误差, 该角度误差为  $\pm 30''$ , 则偏振态引入的误差小于 0.001。因无需外部精密旋转台设备, POSP 在力学、空间环境等实验前、实验中、实验后进行测试和验证, 非常便捷, 每次测试条件一致, 可以实现载荷的全过程定标。

#### 4.2 非偏振定标器输出偏振态

非偏振定标器的输出光的偏振态为  $q_{cal}^0 = 0$ ,  $u_{cal}^0 = 0$ , 其数值误差需求为 0.002。退偏度  $D_d$  常用来表征非偏振定标器的退偏性能, 退偏器出射光的残余线偏振度  $P = (1 - D_d) \cdot P_{in}$ ,  $P_{in}$  为入射光的偏振度, 由表 2 可知, 各波段的退偏度  $D_d$  大于 0.99。为实现偏振态的数值误差小于 0.002, 残余线偏振度需小于 0.0028, 入射光源的线偏振度小于 0.4。对于大部分的地球反照光而言, 其线偏振度小于 0.4。表 3 所示为典型下垫面地球反照光的线偏振度, 该数据来源于 POLDER 传感器的 670 nm 波段<sup>[25]</sup>。当下垫面是积雪或者云层时, 线偏振度小于 0.1; 当下垫面是沙漠、平原或城市时, 线偏振度为 0.1~0.3; 当下垫面是海洋时, 线偏振度为 0.2~0.6。海洋的线偏振度较大, 其观测的散射角较大, 而非偏振定标器的入射光均来自于星下点, 不易产生较大的线偏振度。不同类型的下垫面的反照比高低不等, 可以很好地覆盖 POSP 的动态范围。

表 3 典型下垫面的线偏振度和反照率

Table 3 Degree of linear polarization (DOLP) and albedo of typical underlying surfaces

Surface	Snow	Cloud	Desert	Flatland	Forest	Ocean
DOLP	~0.03	~0.08	~0.1	0.17-0.27	0.32-0.45	0.21-0.59
Albedo	80%-96%	45%-87%	~52%	11%-30%	6%-11%	3%-7%

POSP 在轨对地观测时, 非偏振定标器观测时刻比星下点观测时刻早 0.245 s, 在这段时间内卫星向前飞行了约 1.8 km, 一般认为, 10 km 以内的大气散射是比较均匀的, 可以用星下点观测数据来判断非偏振定标器下垫面的线偏振度是否满足要求。当线偏振度小于 0.4 时, 非偏振定标器的观测数据可以用于偏振定标; 反之, 则将其剔除。相比于庞大的偏振定标数据量, 剔除这一小部分数据不会对测量结果造成较大影响。

此外, 积分球光源出射光的线偏振度小于

0.001, 也是比较理想的非偏振光。因此在实验室偏振定标时, 积分球光源可以直接代替非偏振定标器。

## 5 结 论

基于偏振定标理论和 POSP 的特点, 采用地球反照光+线偏振定标器/非偏振定标器作为 POSP 星上偏振定标的标准偏振定标源。设计了线偏振定标器和非偏振定标器, 理论上给出了偏振态数值的确定方法。线偏振定标器中使用方解石晶体格兰泰勒棱镜, 根据方位角、采样数量、分孔径等优化棱镜

参数;在轨对地观测时,采用马吕斯定律确定线偏振光的方位角,从而确定线偏振定标器的偏振态。非偏振定标器中使用石英晶体改进型 Lyot 退偏器,空间维和光谱维的叠加积分使得各波段的退偏度均优于 0.99;在轨运行时,根据星下采样点的测量数据来选取线偏振度小于 0.4 的下垫面,并将所选下垫面反射光作为非偏振定标器的入射光源,确保非偏振光偏振态数值误差满足要求。POSP 星上偏振定标具有高精度、高频次、高效率的特点,以保障在轨运行的偏振辐射测量精度。

## 参 考 文 献

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2014: synthesis report [R]. New York: IPCC, 2014.
- [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] Gu X F, Cheng T H, Li Z Q. Atmospheric aerosol polarized remote sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.  
顾行发,程天海,李正强.大气气溶胶偏振遥感[M].北京:高等教育出版社,2015.
- [4] Deschamps P Y, Breon F M, Leroy M, *et al.* The POLDER mission: instrument characteristics and scientific objectives [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(3): 598-615.
- [5] Fougnie B, Marbach T, Lacan A, *et al.* The multi-viewing multi-channel multi-polarisation imager-overview of the 3MI polarimetric mission for aerosol and cloud characterization[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 219: 23-32.
- [6] Mishchenko M I, Cairns B, Kopp G, *et al.* Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the glory mission[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2007, 88(5): 677-692.
- [7] Kokhanovsky A A, Davis A B, Cairns B, *et al.* Space-based remote sensing of atmospheric aerosols: the multi-angle spectro-polarimetric frontier [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 145: 85-116.
- [8] Diner D J, Xu F, Garay M J, *et al.* The Airborne Multiangle SpectroPolarimetric Imager (AirMSPI): a new tool for aerosol and cloud remote sensing [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, 6(8): 2007-2025.
- [9] Van Harten G, Snik F, Rietjens J H H, *et al.* Prototyping for the Spectropolarimeter for Planetary EXploration (SPEX): calibration and sky measurements [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8160: 81600Z.
- [10] Sano I, Nakata M, Mukai S, *et al.* Algorithm for aerosol retrieval based on radiance and polarimetry for SGLI [J]. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 2010, 38(Part 8): 380-385.
- [11] Zhang J Q, Shao J B, Yan C X. Cloud and aerosol polarimetric imager [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 9142: 91420X.
- [12] Guo J J, Yao Z G, Han Z G, *et al.* Airborne experiment of TG-2 multi-angle polarization imager for cloud phase identification [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2018, 33(3): 439-448.  
郭俊杰,姚志刚,韩志刚,等. TG-2 多角度偏振成像仪云相态识别机载验证试验 [J]. *遥感技术与应用*, 2018, 33(3): 439-448.
- [13] 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.
- [14] Zhang M M, Meng B H, Luo D G, *et al.* Measurement precision verification and deviation analysis of spaceborne directional polarimetric camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0812004.  
张苗苗,孟炳寰,骆冬根,等.星载多角度偏振成像仪测量精度验证与偏差分析 [J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0812004.
- [15] 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.
- [16] Zheng X B. High-accuracy radiometric calibration of satellite optical remote sensors [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 36-43.  
郑小兵.高精度卫星光学传感器辐射定标技术 [J]. *航天返回与遥感*, 2011, 32(5): 36-43.
- [17] 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): 165-172.  
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):



- 165-172.
- [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] 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.
- [20] Yang H C, Yang B Y, Song M X, *et al.* Onboard polarimetric calibration methods of particulate observing 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.
- [21] Mu T K, Zhang C M, Li Q W, *et al.* The polarization-difference interference imaging spectrometer-II: optical design and analysis [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(11): 110705.  
穆廷魁, 张淳民, 李祺伟, 等. 差分偏振干涉成像光谱仪 II. 光学设计与分析 [J]. *物理学报*, 2014, 63(11): 110705.
- [22] Chen F, Xu P M. Depolarizer design for broadband imaging grating spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0422002.  
陈芳, 徐彭梅. 宽谱段成像光栅光谱仪消偏器的设计 [J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0422002.
- [23] Tian J W, Xue Q S, Lu F X, *et al.* Design and analysis of depolarizer for space-borne grating-dispersion type spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0313001.  
田杰文, 薛庆生, 鲁凤芹, 等. 星载光栅色散型光谱仪消偏器的设计与分析 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0313001.
- [24] Li S, Qiu Z W. Polarization orientation calibration of simultaneous imaging polarimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 4100-4104.  
李双, 裘桢炜. 同时偏振成像仪检偏方位校正研究 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 4100-4104.
- [25] Song W, Qu Z Q. Study of polarimetries of the earth-like exoplanet [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2016, 57(2): 165-180.  
宋伟, 屈中权. 类地行星偏振特性研究 [J]. *天文学报*, 2016, 57(2): 165-180.