

星载偏振扫描仪的星上偏振定标方法

杨洪春^{1,2,3**}, 杨本永^{1,3}, 宋茂新^{1,3}, 邹鹏^{1,3}, 孙晓兵^{1,3}, 洪津^{1,2,3*}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 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 为保障偏振扫描仪长期在轨的偏振测量精度,研究了偏振扫描仪的星上偏振定标原理与方法。首先,针对分孔径和分振幅的技术特点,结合实际的误差来源,理论推导了系统探测矩阵;其次,根据仪器参数,利用已知偏振态的线偏振光和非偏振光,推导了星上偏振定标方程;然后,设计了用于星上偏振定标的线偏振定标器和非偏振定标器;最后,提出了利用已知偏振度的太阳漫射板辐射定标数据来校正偏振扫描仪的低偏振度测量精度和稳定性。所提出的星上偏振定标方法具有高精度、高频次、高效率等特点,可满足长期在轨偏振测量精度为 0.005 的应用需求。

关键词 遥感; 偏振定标; 偏振测量; 偏振扫描仪; 星上定标器

中图分类号 P407.4; P161.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1110002

Onboard Polarimetric Calibration Methods of Spaceborne Scanning Polarimeter

Yang Hongchun^{1,2,3**}, Yang Benyong^{1,3}, Song Maoxin^{1,3},

Zou Peng^{1,3}, Sun Xiaobing^{1,3}, Hong Jin^{1,2,3*}

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

²Science Island Branch of Graduate School, University 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 guarantee the long-term on-orbit polarimetric measurement accuracy of scanning polarimeter, the onboard calibration mechanism and method of scanning polarimeter are studied. First, the system detection matrix is derived according to the technical characteristics of aperture-division and amplitude-division and with the consideration of practical error sources. Second, the onboard polarimetric calibration equation is deduced according to the instrument parameters and by use of the linearly polarized light and the non-polarized light with the known polarization states. Third, the linear polarization and non-polarization calibrators are designed for the onboard polarimetric calibration. Finally, the radiometric calibration data with the known polarization degree from the onboard solar diffuser is proposed to correct the low polarimetric measurement accuracy and stability. The proposed onboard polarimetric calibration method possesses the characteristics of high precision, high frequency, high efficiency, and so on, which can satisfy the application requirement that the long-term on-orbit polarimetric measurement accuracy is 0.005.

Key words remote sensing; polarimetric calibration; polarimetry; scanning polarimeter; onboard calibrator

OCIS codes 120.0280; 150.1488; 120.5410

1 引言

偏振是光的一种固有属性^[1]。偏振探测技术可

探测光波的矢量特性,与传统强度探测技术相比,偏振探测技术具有不可比拟的优势^[2]。偏振信息在气溶胶与云遥感、大气校正、目标识别等方面具有重要

收稿日期: 2018-04-28; 修回日期: 2018-05-25; 录用日期: 2018-06-26

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(41405037)、高技术项目(CXJJ-16S005)

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

作用,故偏振遥感正成为一个快速发展的新领域^[3]。法国国家空间研究中心(CNES)研制的 POLDER 是第一个获取地球大气偏振数据的星载仪器^[4]。目前,国际上著名的星载偏振遥感仪器主要有法国的 3MI,美国的 APS、MSPI、HARP,荷兰的 SPEX 等^[5];国内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仪(DPC)^[6]、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偏振探测仪(CAPI)^[7]等。

偏振精度是偏振测量的关键因素之一,国际上普遍认为当目标偏振度为 0.2 时,偏振测量精度优于 0.005 的偏振数据具有较高的灵敏度,可显著提高气溶胶反演精度^[8]。偏振定标则是偏振信息量化应用的基础,也是仪器偏振精度的有效保证^[9]。偏振定标就是建立偏振传感器输出与已知入射光偏振态之间的定量关系,也是确定偏振传感器矢量辐射传输物理参数的过程^[10]。由于卫星发射和在轨运行所处的环境错综复杂,星载仪器性能衰变在所难免^[11],而星上偏振定标可确保星载偏振传感器在轨运行时能获取具有较高精度的数据。因为没有星上定标器,POLDER 星载仪器利用海洋耀光和云场景进行了在轨偏振定标,但其偏振定标精度只能达到 0.02^[12];APS 中安装了星上定标器,能够进行星上偏振定标,但因发射失败而未获得在轨数据^[13];中国科学院遥感应用研究所采用航空平台验证了 DPC 在轨偏振定标的原理与方法,同时也表明偏振传感器利用自然景物进行在轨偏振定标的条件苛刻,过程复杂^[14]。

偏振扫描仪(POSP)是一种星载多光谱、分孔径、分振幅型同时偏振探测的光学遥感仪,可用于气溶胶、云和大气细颗粒物(PM2.5)的分布和特性的探测。本文研究了 POSP 的星上定标原理与方法,首先分析了 POSP 的技术特点,探讨了偏振测量精度的主要影响因素,推导了 POSP 的测量原理和仪器矩阵;其次利用已知偏振态的线偏振光和非偏振光,给出了偏振定标方程;然后论述了线偏振定标器(LPC)和非偏振定标器(NPC)的精度需求;最后提出了太阳漫射板(SD)辐射定标数据用于偏振精度校正的可行性。

2 仪器原理

如图 1 所示,POSP 光学系统主要包括扫描反射镜组、望远透镜、视场光阑、准直透镜、Wollaston

棱镜、分色片、聚焦透镜、带宽滤光片和二元探测器。POSP 利用一对相同的望远透镜对同一目标进行测量,光束通过方位角为 45°的一对 Wollaston 棱镜进行分光,用一对二元探测器接收 4 个偏振解析方向(0°、45°、90°、135°)的光强信号,并反演得到入射光波的 Stokes 矢量的线偏振参量,如目标光强 I ,线偏振的方向和强度 U 等。POSP 采用分孔径分振幅技术来实现同时偏振探测,是经典的同时偏振探测方案之一^[15]。

POSP 系统共包含 3 对独立的光路,其中 2 对光路配置了可见光至近红外光谱的 6 个波段,采用硅二元探测器;1 对光路配置了短波红外光谱的 3 个波段,采用 InGaAs 二元探测器,并内置帕尔贴制冷单元。每对光路采用分色片和滤光片的组合来实现 3 个光谱波段分光,整个系统实现同时获取 0.38~2.25 μm 太阳反射光谱内 9 个波段的光谱偏振信息;波段设置分别为 0.38、0.41、0.443、0.49、0.67、0.865、1.38、1.61、2.25 μm ,均为气溶胶和云光学遥感的典型波段。设计要求系统的星下点分辨率为 6.4 km,全寿命周期的偏振测量精度优于 0.005。

从 POSP 的光路结构和工作原理可知:光路 1 中 Wollaston 棱镜 WP1 等效为 0°和 90°线偏振器 $\mathbf{M}_p(0^\circ)$ 和 $\mathbf{M}_p(90^\circ)$;光路 2 中 Wollaston 棱镜 WP2 与 WP1 的方位角为 45°,所以光路 2 中 WP2 的有效通道可等效为 45°和 135°线偏振器 $\mathbf{M}_p(45^\circ)$ 和 $\mathbf{M}_p(135^\circ)$ 。这 4 个通道的矢量方程为

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{M}_p(\theta) \cdot \mathbf{S}_{in}, \quad (1)$$

式中: $\mathbf{S}_{in} = [I, Q, U]^T$ 为测量目标的 Stokes 矢量; $\mathbf{S}_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为光波到达 4 个相应通道焦平面时的 Stokes 矢量。但光电探测器只对总光强敏感,故联立 4 个通道的强度方程即可得到测量方程。

在 POSP 系统中,扫描反射镜组包括两个互相垂直的相同反射镜,可对入射角为 45°的光波实现偏振补偿^[16];前置望远系统由望远透镜、视场光阑和准直透镜构成,根据菲涅尔方程,当半视场角只有 0.26°时,前置望远系统对光偏振态的影响非常小^[17]。但扫描反射镜和前置望远系统的装调误差、安装应力等因素将引起入射光波偏振态的变化,称为仪器偏振,用 q_{inst} 和 u_{inst} 表示。一对 Wollaston 棱镜的方位角偏差分别为 ϵ_1 和 ϵ_2 ,则偏振解析方向分别为 $0^\circ + \epsilon_1$ 、 $90^\circ + \epsilon_1$ 、 $45^\circ + \epsilon_2$ 和 $135^\circ + \epsilon_2$;消光比分别为 e_1 和 e_2 。考虑消光比和方位角的线偏振器件的 Mueller 矩阵^[18]可表示为

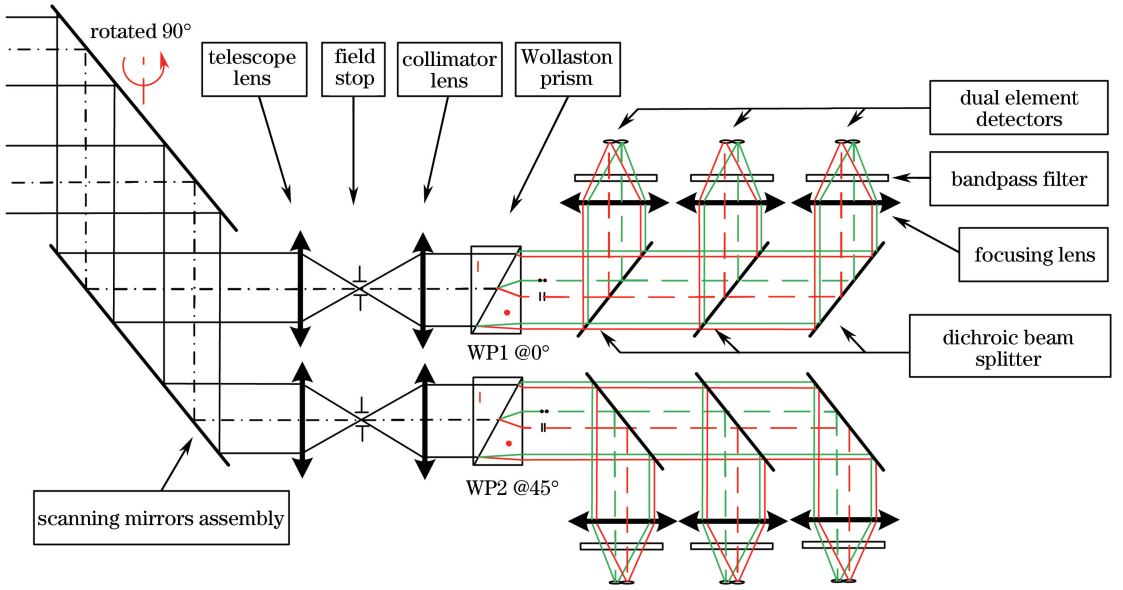


图 1 POSP 光路示意图

Fig. 1 Optical layout of POSP

$$\mathbf{M}_P(e, \alpha) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \frac{e-1}{e+1} \cos(2\alpha) & \frac{e-1}{e+1} \sin(2\alpha) \\ \frac{e-1}{e+1} \cos(2\alpha) & \cos^2(2\alpha) + 2 \frac{\sqrt{e}}{e+1} \sin^2(2\alpha) & \left(1 - 2 \frac{\sqrt{e}}{e+1}\right) \sin(2\alpha) \cos(2\alpha) \\ \frac{e-1}{e+1} \sin(2\alpha) & \left(1 - 2 \frac{\sqrt{e}}{e+1}\right) \sin(2\alpha) \cos(2\alpha) & \sin^2(2\alpha) + 2 \frac{\sqrt{e}}{e+1} \cos^2(2\alpha) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中: e 为线偏振器的消光比(用正指数表示); α 为线偏振器件的方位角。利用 Stokes-Mueller 理论, 将参数 $e_1, e_2, \epsilon_1, \epsilon_2, q_{\text{inst}}$ 和 u_{inst} 代入(1)式和(2)式中, 则 4 个通道的测量方程分别为

$$I(0^\circ + \epsilon_1) = \frac{1}{2} \left\{ I + q_{\text{inst}} Q + u_{\text{inst}} U + \frac{e_1 - 1}{e_1 + 1} [\cos(2\epsilon_1)(q_{\text{inst}} I - Q) + \sin(2\epsilon_1)(u_{\text{inst}} I - U)] \right\}, \quad (3)$$

$$I(90^\circ + \epsilon_1) = \frac{1}{2} \left\{ I + q_{\text{inst}} Q + u_{\text{inst}} U - \frac{e_1 - 1}{e_1 + 1} [\cos(2\epsilon_1)(q_{\text{inst}} I - Q) + \sin(2\epsilon_1)(u_{\text{inst}} I - U)] \right\}, \quad (4)$$

$$I(45^\circ + \epsilon_2) = \frac{1}{2} \left\{ I + q_{\text{inst}} Q + u_{\text{inst}} U + \frac{e_2 - 1}{e_2 + 1} [-\sin(2\epsilon_2)(q_{\text{inst}} I - Q) + \cos(2\epsilon_2)(u_{\text{inst}} I - U)] \right\}, \quad (5)$$

$$I(135^\circ + \epsilon_2) = \frac{1}{2} \left\{ I + q_{\text{inst}} Q + u_{\text{inst}} U - \frac{e_2 - 1}{e_2 + 1} [-\sin(2\epsilon_2)(q_{\text{inst}} I - Q) + \cos(2\epsilon_2)(u_{\text{inst}} I - U)] \right\}. \quad (6)$$

要从(3)~(6)式求解 Stokes 参量, 还应考虑 4 个通道之间的通道响应一致性。通道响应一致性的影响因素主要有视场重合度、通道相对光谱响应、光电探测器响应、暗电流以及滤光片带外响应等^[19]。假设 K_1 和 K_2 分别为光路 1 和光路 2 中两个通道的相对通道响应系数, C_{12} 为光路 1 与光路 2 之间的相对响应系数, C_0 为绝对辐射定标系数, 4 个通道经过暗电流校正的 DN 值分别记为 S_0, S_{90}, S_{45} 和 S_{135} , 则有

$$I(0^\circ + \epsilon_1) = C_0 S_0, \quad (7)$$

$$I(90^\circ + \epsilon_1) = C_0 K_1 S_{90}, \quad (8)$$

$$I(45^\circ + \epsilon_2) = C_0 C_{12} S_{45}, \quad (9)$$

$$I(135^\circ + \epsilon_2) = C_0 C_{12} K_2 S_{135}. \quad (10)$$

将(7)~(10)式依次代入(3)~(6)式, 并记 $q = Q/I, u = U/I$, 整理得到关于 q 和 u 的方程可表示为

$$\alpha_1 \cdot \frac{r_1 - K_1}{r_1 + K_1} = \frac{\cos(2\epsilon_1)(q_{\text{inst}} - q) + \sin(2\epsilon_1)(u_{\text{inst}} - u)}{1 + q_{\text{inst}} q + u_{\text{inst}} u}, \quad (11)$$

$$\alpha_2 \cdot \frac{r_2 - K_2}{r_2 + K_2} = \frac{-\sin(2\varepsilon_2)(q_{\text{inst}} - q) + \cos(2\varepsilon_2)(u_{\text{inst}} - u)}{1 + q_{\text{inst}}q + u_{\text{inst}}u}, \quad (12)$$

$$\text{式中: } \alpha_1 = \frac{e_1 + 1}{e_1 - 1}; \alpha_2 = \frac{e_2 + 1}{e_2 - 1}; r_1 = \frac{S_0}{S_{90}}; r_2 = \frac{S_{45}}{S_{135}}.$$

由(11)式和(12)式可求出 q 和 u , 进而得到出目标的线偏振度 p 和偏振角 χ :

$$p = \sqrt{q^2 + u^2}, \quad p \in [0, 1], \quad (13)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{u}{q}\right), \quad \chi \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right). \quad (14)$$

3 偏振定标原理

由第 2 节可知, 仪器偏振 $q_{\text{inst}}, u_{\text{inst}}$ 和 Wollaston 棱镜的方位误差 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 与装调相关, 按照文献[20]的方法在实验室中完成标定。根据偏振定标理论, 偏振遥感仪偏振系数的标定通常采用非偏振光(或光源的偏振度很小, 如云层)和完全线偏振光(或光源的偏振度很大, 如耀光)作为偏振定标的标准源。当 POSP 的标准源为非偏振光时, 其偏振态可记为 q_{cal}^0 和 u_{cal}^0 , 探测器输出的有效 DN 值分别记为 $S_0^0, S_{90}^0, S_{45}^0$ 和 S_{135}^0 ; 当 POSP 的标准源为完全线偏振光时, 其偏振态可记 q_{cal}^1 和 u_{cal}^1 , 探测器输出的有效 DN 值分别记为 $S_0^1, S_{90}^1, S_{45}^1$ 和 S_{135}^1 。并将 $r_1^0 = S_0^0/S_{90}^0, r_1^1 = S_0^1/S_{90}^1, r_2^0 = S_{45}^0/S_{135}^0, r_2^1 = S_{45}^1/S_{135}^1$ 代入(11)式和(12)式, 可得到偏振定标方程:

$$K_1 = \frac{1}{2}(r_1^0 - r_1^1) \frac{A + B}{A - B} +$$

$$\sqrt{r_1^0 r_1^1 + \frac{1}{4}(r_1^0 - r_1^1)^2 \left(\frac{A + B}{A - B}\right)^2}, \quad (15)$$

$$K_2 = \frac{1}{2}(r_2^0 - r_2^1) \frac{C + D}{C - D} +$$

$$\sqrt{r_2^0 r_2^1 + \frac{1}{4}(r_2^0 - r_2^1)^2 \left(\frac{C + D}{C - D}\right)^2}, \quad (16)$$

$$\alpha_1 = A \cdot \frac{r_1^1 + K_1}{r_1^1 - K_1}, \quad (17)$$

$$\alpha_2 = C \cdot \frac{r_2^1 + K_2}{r_2^1 - K_2}, \quad (18)$$

式中:

$$A = \frac{\cos(2\varepsilon_1)(q_{\text{inst}} - q_{\text{cal}}^1) + \sin(2\varepsilon_1)(u_{\text{inst}} - u_{\text{cal}}^1)}{1 + q_{\text{inst}}q_{\text{cal}}^1 + u_{\text{inst}}u_{\text{cal}}^1};$$

$$B = \frac{\cos(2\varepsilon_1)(q_{\text{inst}} - q_{\text{cal}}^0) + \sin(2\varepsilon_1)(u_{\text{inst}} - u_{\text{cal}}^0)}{1 + q_{\text{inst}}q_{\text{cal}}^0 + u_{\text{inst}}u_{\text{cal}}^0};$$

$$C = \frac{-\sin(2\varepsilon_2)(q_{\text{inst}} - q_{\text{cal}}^1) + \cos(2\varepsilon_2)(u_{\text{inst}} - u_{\text{cal}}^1)}{1 + q_{\text{inst}}q_{\text{cal}}^1 + u_{\text{inst}}u_{\text{cal}}^1};$$

$$D = \frac{-\sin(2\varepsilon_2)(q_{\text{inst}} - q_{\text{cal}}^0) + \cos(2\varepsilon_2)(u_{\text{inst}} - u_{\text{cal}}^0)}{1 + q_{\text{inst}}q_{\text{cal}}^0 + u_{\text{inst}}u_{\text{cal}}^0}.$$

当输入的非偏振光和线偏振光都非常理想时, 即非偏振光的偏振态 $q_{\text{cal}}^0 = 0, u_{\text{cal}}^0 = 0$, 线偏振光的偏振态为 $q_{\text{cal}}^1 = \cos(2\theta), u_{\text{cal}}^1 = \sin(2\theta)$, 其中 θ 为线偏振光的方位角, 则 $B = \cos(2\varepsilon_1)q_{\text{inst}} + \sin(2\varepsilon_1)u_{\text{inst}}$ 与 $D = -\sin(2\varepsilon_2)q_{\text{inst}} + \cos(2\varepsilon_2)u_{\text{inst}}$ 是仅与装调结果相关的常量, 而因子 A, C 是方位角 θ 函数。根据设计公差, 取 $\varepsilon_1 = 0.2^\circ, \varepsilon_2 = -0.2^\circ, q_{\text{inst}} = u_{\text{inst}} = 0.005$, 则 $q_{\text{cal}}^1, u_{\text{cal}}^1, A, C, \frac{A+B}{A-B}, \frac{C+D}{C-D}$ 随线偏振光方位角 θ 的变化情况如图 2 所示。由图 2 可知: 输入的线偏振光方位角最优值为 22.5° , 即 $q_{\text{cal}}^1 = u_{\text{cal}}^1 = \sqrt{2}/2$, 此时线偏振光方位角引入误差对 K_1, K_2 的求解最不敏感; 而当线偏振光的方位角为 0° 或 45° 时, 因某一个通道出现消光现象, 定标系数求解会出现较大偏差。

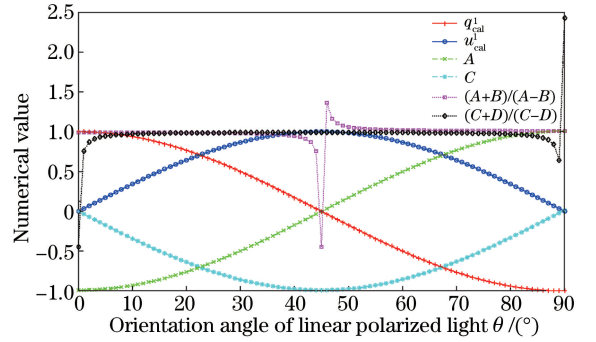


图 2 线偏振光方位角最优值的选取

Fig. 2 Selection of optimal orientation angle of linearly polarized light

在实际定标中, 输入的非偏振光常常是非理想的, 取设计公差值方位角偏差 $\varepsilon_1 = 0.2^\circ, \varepsilon_2 = -0.2^\circ$ 和仪器偏振 $q_{\text{inst}} = u_{\text{inst}} = 0.005$, 则当非偏振光偏差 $\Delta q_{\text{cal}}^0 = \Delta u_{\text{cal}}^0 = 0.002$ 时, 最大的偏振度测量误差 $\Delta p = 0.0007$ (图 3)。即当光源的偏振度小于 0.003 时, 可将其看作理想非偏振光, 其定标结果的公差小于 0.001; 当光源的偏振度大于 0.003 时, 需要测出光源实际的偏振态。同样地, 输入的线偏振光的偏振态误差也应小于 0.002。

4 星上偏振定标器

如图 4 所示, 星载 POSP 在扫描反射镜 (SMA) 的四周布置了星上定标器, 分别是 LPC、NPC、SD、SD 稳定性监测仪 (SDSM) 和暗陷阱 (DB)。其中 SD

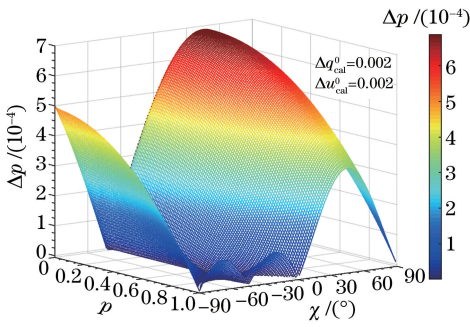


图3 当偏振定标的非偏振光有偏差时偏振测量误差的数值仿真结果

Fig. 3 Numerical simulation result of polarimetric measurement error when non-polarized light used for polarimetric calibration has a deviation

和SDSM用于星上辐射定标,在特定的辐射定标时刻,POSP通过SD引入太阳光建立标准辐射传递,

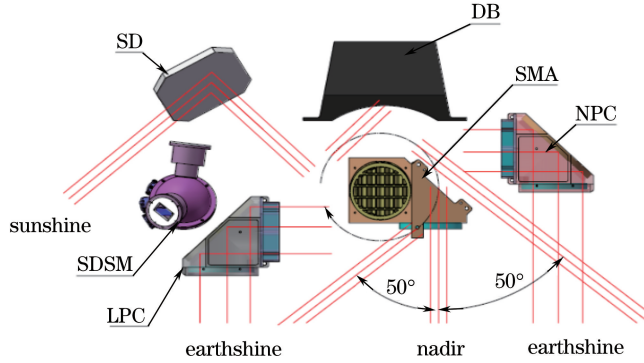


图4 POSP星上定标器布局图

Fig. 4 Layout of POSP onboard calibrators

4.1 LPC

LPC由1块铝基反射镜和6块格兰泰勒棱镜组成,将地球反照光调制成线偏振光,其所输出的偏振态为 $q_{cal}^1 = \frac{e'-1}{e'+1} \cos(2\theta)$, $u_{cal}^1 = \frac{e'-1}{e'+1} \sin(2\theta)$,其中 e' 为格兰泰勒棱镜的消光比, θ 为偏振方位角。因此LPC输出偏振态的影响因素为消光比 e' 和方位角 θ 。格兰泰勒棱镜是由两片相同方解石直角棱镜组成,中间采用空气隙结构,如图5所示。格兰泰勒棱镜利用双折射效应和全反射定律分离o光和e光,得到高消光比的线偏振光,其消光比 e' 达到了 10^5 。相关研究表明,格兰泰勒棱镜的消光比随着温度升高而有所降低^[21];当温度升高到60℃时,消光比 e' 仍大于 10^4 。当消光比从 10^5 降到 10^4 时, q_{cal}^1 与 u_{cal}^1 的变化量为 1.3×10^{-4} ,故温度低于60℃时,由于温差引起的消光比的变化对 q_{cal}^1 与 u_{cal}^1 不敏感,其数值误差可以忽略。

以进行星上绝对辐射定标;SDSM则分别观测太阳和漫射板,采用相对比值测量法修正SD的衰变。DB用于提供零辐射信号,扣除POSP系统暗噪声。LPC和NPC则用于星上偏振定标,以地球反射光为光源,分别为POSP输出已知偏振态的线偏振光和非偏振光。以地球反射光为光源具有以下优点:1)可以在观测模式下同时进行星上偏振定标;2)与观测目标有相同的动态响应和光谱范围。

POSP采用均速转动扫描反射镜的工作方式,对地扫描观测视场为 $\pm 50^\circ$ 。在对地观测工作模式下,扫描反射镜转动一周便完成对地观测、LPC、DB、NPC的数据采集。将相应数据代入偏振定标方程,即可求解偏振定标系数 K_1 、 K_2 、 α_1 和 α_2 。由于仪器在轨性能的变化缓慢,为减小随机误差,对系数 K_1 、 K_2 、 α_1 和 α_2 进行100次测量并求取平均值。

格兰泰勒棱镜方位角 θ 设计值为 22.5° 。为确保 q_{cal}^1 、 u_{cal}^1 的精度满足实验要求,需精确测量出装配后的方位角,其测量精度可达 0.05° ,对应的测量误差为 1.2×10^{-3} 。方位角的精密测量采用精密电控转台(精度和重复精度均为 0.01°)带动参考宽带偏振片(消光比为 10^4)旋转,先以步距角为 1° 采样进行粗定位,然后在响应最大值 $\pm 2^\circ$ 的范围内以步距角 0.05° 间隔采样进行精定位。在仪器天底和LPC两个位置分别采样,拟合出各自的DN值曲线,相邻峰值对应角度差即为格兰泰勒棱镜的方位角测量值。

LPC除了提供标准偏振态 q_{cal}^1 与 u_{cal}^1 外,还作为线偏振度测量的标尺($p=1$),用于评价POSP在轨偏振测量精度。

4.2 NPC

NPC由1块铝基反射镜和6块改进型Lyot退偏器组成。该退偏器由2块晶轴夹角为 45° 的石英

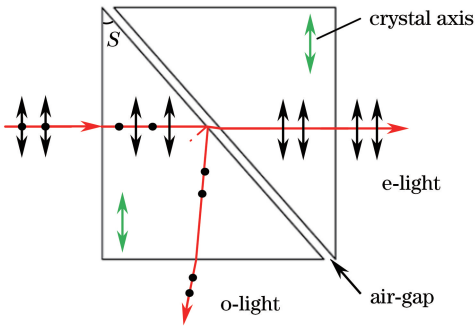


图 5 格兰泰勒棱镜示意图

Fig. 5 Schematic of Glan-Taylor prism

晶体光楔组成,退偏器的楔角为 2° ,总厚度为 12 mm,有效通光口径为 12 mm,结构简单,性能稳定。其退偏性能用退偏度 D 表示,因此出射光的残余偏振度 $p_{res} = (1 - D) \times p_{in}$,其中 p_{in} 为入射光的偏振度。由于空间维和光谱维的伪退偏的叠加,改进型 Lyot 退偏器在 POSP 近紫外至短波红外的 9 个工作波段上的退偏度均可达 0.99。在星上偏振定标时,星下点地球反照光平行入射 NPC,星下点的偏振态为 q_n 和 u_n ,则输出偏振态为 $q_{cal}^0 = (1 - D)q_n, u_{cal}^0 = (1 - D)u_n$ 。采用上一次定标系数先求出星下点的偏振态 q_n, u_n 和 p_n ,然后采用迭代法得出 q_{cal}^0 与 u_{cal}^0 ,一般情况下,迭代一次即可满足要求, q_{cal}^0 与 u_{cal}^0 的数值误差小于 0.002。

当下垫面的线偏振度小于 0.1 时(例如云或积雪),经 NPC 光可以看作是理想的非偏振光,此时偏振态 $q_{cal}^0 \approx 0, u_{cal}^0 \approx 0$,可作为星上偏振定标的非偏振光源。当下垫面的线偏振度较大时(例如海洋或森林),其线偏振度为 0.3~0.6,根据星下点和 NPC 输出光的偏振度,通过逆向迭代,可求出 NPC 的退偏度,评估其退偏性能是否衰变。

4.3 SD

SD 用于 POSP 的星上绝对辐射定标,由聚四氟乙烯(PTFE)材料制作而成,它在太阳反射波段的光谱平坦性较好,可见近红外波段的反射率达到 99%,朗伯特特性良好^[22-23]。近年来研究发现,当入射角和观测角较小时,朗伯特特性良好;但当入射角和散射角较大时,SD 表现出一定的偏振特性。Noble 等^[24]指出漫射板具有很强的退偏性及微弱的双向衰减和延迟性。Svensen 等^[25]研究了聚四氟乙烯漫射板的偏振特性,并给出了入射角与观测角在同一平面内的 Mueller 矩阵 M_{SD} ^[26]。

$$M_{SD} = \begin{pmatrix} 1 & -pk_2 - k_4 & 0 & -k_5 \\ -pk_2 + \frac{k_4}{2} & p^2 + k_4 & -pk_2^2 & pk_2k_3 \\ -k_5 & -pk_2^2 & p^2 - k_4 & pk_2 \\ 0 & -pk_2k_3 & -pk_2 & p^2k_1 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

式中: m 为辐射强度相关量; $p = \frac{1}{22} |(\theta_o + \theta_i)^3|$, θ_i 为入射角, θ_o 为观测角;当入射波长为 532 nm 时, $k_1 = 0.67, k_2 = 0.17, k_3 = 0.45, k_4 = 0.04, k_5 = 0.03$ 。

辐射定标时,在卫星轨道预定地点和时刻,通过 SD 将太阳光引入仪器,定标频次为每月一次,定标时太阳光的入射角 θ_i 、POSP 观测角 θ_o 和观测方位角 ϕ 均为已知。入射太阳光是理想非偏振光,根据实验室测量的漫射板 Mueller 矩阵 $M_{SD}(\theta_i, \theta_o, \phi)$ 和偏振双向反射分布函数 p_{BRDF} ^[27-28],POSP 观测到的漫射板出射光的偏振度和偏振态均是已知的。各波段的偏振度有所不同,为 0.02~0.03。SD 星上辐射定标获取的数据具有已知的偏振信息,则:1)可用于 POSP 在轨时低偏振度测量精度的校正;2)与 LPC 的数据一起代入偏振定标方程,求解定标系数;3)利用漫射板的良好朗伯特特性校正配对光路对应的格兰泰勒棱镜或退偏器之间的一致性。

5 结 论

根据偏振光学理论,推导了系统的探测矩阵,明确了偏振定标系数;根据系数的物理含义,利用完全线偏振光和非偏振光作为已知偏振态的标准源,详细分析了星上偏振定标的原理与方法。设计了 LPC 和 NPC,采用地球反照光为光源,为 POSP 提供已知偏振态的标准源。LPC 采用格兰泰勒棱镜作为线偏振光起偏器,精确测量方位角且测量精度为 0.05° ,则 q_{cal}^1 和 u_{cal}^1 的数值误差小于 0.002。NPC 采用改进型 Lyot 退偏器,退偏度可达 0.99,通过与星下点偏振态迭代, q_{cal}^0, u_{cal}^0 的数值误差小于 0.002。当下垫面的偏振度小于 0.1 时,NPC 输出非偏振光的偏振态 $q_{cal}^0 \approx 0, u_{cal}^0 \approx 0$,此数据可用于星上偏振定标;当下垫面的偏振度较大时,可通过逆向迭代评估 NPC 的退偏性能。SD 的偏振特性较弱,是观测角度的函数,可用于星上偏振系数的求解和偏振精度的校正。星载 POSP 利用两种星上偏振定标器和

SD 进行星上偏振定标,其特点为精度高、频次高、效率高,保障仪器长期在轨偏振测量精度为 0.005 的应用需求。该方法也可为同类偏振遥感器的星上偏振定标提供参考。下一步工作是设计实验验证星上偏振定标精度,与实验室偏振定标的结果进行比较分析。

参 考 文 献

[1] Gu X F, Cheng T H, Li Z Q, *et al.* Atmospheric aerosol polarized remote sensing [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015: 8.
顾行发, 程天海, 李正强, 等. 大气气溶胶偏振遥感 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015: 8.

[2] 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.

[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] 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] 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.

[6] 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.

[7] Zhang J Q, Shao J B, Yan C X. Cloud and aerosol polarimetric imager [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9142: 91420X.

[8] 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.

[9] Wang H, Sun X B, Hong J, *et al.* Review of air-borne and space-borne polarized remote sensing of aerosol over land [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2015, 10(2): 186-196.
王涵, 孙晓兵, 洪津, 等. 航空/航天偏振遥感陆地上空气溶胶研究进展 [J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(2): 186-196.

[10] Fan H M, Kang Q, Qiu Z W, *et al.* Polarization calibration method of multi-spectral aperture-divided simultaneous detection system [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0228001.
范慧敏, 康晴, 裘桢炜, 等. 多光谱分孔径同时探测系统偏振定标方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0228001.

[11] 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. 高精度卫星光学遥感辐射定标技术 [J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5): 36-43.

[12] Toubbe B, Bailleul T, Deuze J L, *et al.* In-flight calibration of the POLDER polarized channels using the Sun's glitter [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1): 513-524.

[13] Peralta R J, Nardell C A, Cairns B, *et al.* Aerosol polarimetry sensor for the Glory Mission [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6786: 67865L.

[14] 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.

[15] Deslis A, Petroy S B, Kampe T U. Optical design and analysis of a polarimeter for space applications [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5523: 63-73.

[16] Chen L G, Hong J, Qiao Y L, *et al.* Simulation study on depolarization for imperfect orthogonal mirrors [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(4): 633-638.
陈立刚, 洪津, 乔延利, 等. 非理想正交反射镜消偏性能的模拟研究 [J]. 应用光学, 2008, 29(4): 633-638.

[17] Qiu Z W, Hong J. Retardance characteristics analysis of lens in polarization remotesensors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 806-811.
裘桢炜, 洪津. 偏振遥感器镜头相位延迟特性分析 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 806-811.

[18] Goldstein D. Polarized light: revised and expanded [M]. New York: Marcel Dekker, Inc., 2003:

- 49-78.
- [19] Kang Q, Yuan Y L, Li J J, *et al.* Filtration and precision verification of optical filters on atmospheric synchronous corrector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0312003.
康晴, 袁银麟, 李健军, 等. 大气同步校正仪的滤光片筛选方法与精度验证实验研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0312003.
- [20] 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.
- [21] Li H X, Wu F Q, Su F F. The effect of temperature on the polarizing prisms [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(3): 266-270.
李红霞, 吴福全, 苏富芳. 偏光棱镜温度特性的研究[J]. *激光技术*, 2004, 28(3): 266-270.
- [22] Yang B Y, Zhang L M, Shen Z G, *et al.* Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(8):1851-1858.
杨本永, 张黎明, 沈政国, 等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1851-1858.
- [23] Yang B Y, Zhang L M, Yang B Y, *et al.* Space stability measurement and analysis of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 3026-3030.
杨本永, 张黎明, 杨宝云, 等. 光学传感器星上定标漫射板空间稳定性测试与分析[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 3026-3030.
- [24] Noble H, Lam W S, Smith G, *et al.* Polarization scattering from a Spectralon calibration sample [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 6682: 668219.
- [25] Svensen O, Kildemo M, Maria J, *et al.* Mueller matrix measurements and modeling pertaining to Spectralon white reflectance standards [J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15045-15053.
- [26] Kildemo M, Maria J, Ellingsen P G, *et al.* Parametric model of the Mueller matrix of a Spectralon white reflectance standard deduced by polar decomposition techniques [J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18509-18524.
- [27] Wang X, Zou X F, Jin W Q. Study of polarization properties of radiation reflected by roughness objects [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(11): 1327-1331.
王霞, 邹晓风, 金伟其. 粗糙表面反射辐射偏振特性研究[J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(11): 1327-1331.
- [28] Zhang Y J, Wang X, He S. Polarization properties of rough surfaces based on polarized bi-directional reflectance distribution function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0329002.
章延隽, 王霞, 贺思. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙表面偏振特性[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0329002.