

基于傅里叶变换的强度调制型光谱偏振分析仪

袁银麟¹ 郑小兵¹ 吴浩宇¹ 孟凡刚¹ 康 晴¹ 陈立刚² 李健军¹ 邹 鹏¹

(¹ 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)
² 滨州学院, 山东 滨州 256603

摘要 为了获得更高精度的目标光谱偏振特性, 结合现有的标准探测器技术与偏振探测技术原理, 研制了一种光谱偏振分析仪。采用连续等角度间隔旋转检偏器对目标信号进行强度调制, 通过傅里叶级数算法能够显著降低检偏器定位误差引起的偏振度测量不确定度。利用优化设计的测量主光路和大动态范围线性优良的标准陷阱探测器, 保证了偏振度测量精度。利用可更换窄带滤光片实现了光谱偏振度测量。经实验验证, 在 0.1~0.99 偏振度的范围内, 光谱偏振分析仪的测量不确定度为 0.15%。

关键词 光谱学; 偏振; 定标; 陷阱探测器; 高精度

中图分类号 TN312.8 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.1223001

A Intensity Modulated Spectro-Polarimetric Analyzer Based on Fourier Transformation

Yuan Yinlin¹ Zheng Xiaobing¹ Wu Haoyu¹ Meng Fangang¹ Kang Qing¹
Chen Ligang³ Li Jianjun¹ Zou Peng¹

(¹ Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)
² Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603, China)

Abstract For high-precision measurement of target polarization information, a high-precision spectro-polarimetric analyzer is developed, which combines existing high-precision standard detectors technology with polarization detecting theory. By continuous and equiangular rotation of the polarizer, Fourier progression algorithm is used to calculate degree of polarization and it can greatly reduce uncertainty caused by angular error of polarizer. Optimum design of main optical path and fine linear standard trap detector with large dynamic range ensures the measurement precision. A set of alternate narrow-band filters are used to achieve degree of polarization measurement of continuous spectrum. The test results show that the degree of polarization is from 0.1 to 0.99, and the measurement uncertainty of spectro-polarimetric analyzer is below 0.15%.

Key words spectroscopy; polarization; calibration; trap detector; high-precision

OCIS codes 230.5440; 030.5620; 040.5160; 070.4560; 080.2740; 120.0280

1 引 言

在散射、反射和透射电磁辐射的过程中, 空间粒子、地球表面和大气中的目标会产生与其自身性质相关的特征偏振信息。通过测量目标的偏振信息来

反演目标特性的偏振遥感技术日益得到广泛应用^[1-4]。为了准确获取目标的偏振信息, 校正或消除传感器自身产生的偏振信号, 需要开展高精度偏振定标, 评价传感器对不同偏振状态目标辐射的响

收稿日期: 2014-06-06; 收到修改稿日期: 2014-07-18

基金项目: 国家 863 计划(2013AA7031068A)、中科院重点项目(KGFZD-125-13-006)

作者简介: 袁银麟(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事先进辐射定标光源技术及偏振定标方面的研究。

E-mail: ylyuan@aiofm.ac.cn

导师简介: 郑小兵(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光学精确测量的先进方法与仪器、卫星传感器的高精度定标等方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

应特性^[5-7]。

理论上遥感器的偏振响应特性可以用 Mueller 矩阵进行完备和量化的描述,因而偏振定标的主要技术内容是确定遥感器的 Mueller 矩阵,并对定标结果进行精度验证。通过观测输出为自然光或完全线偏振光的参考光源,可由遥感器的输出求解其 Mueller 矩阵。通过观测偏振度已知且连续可调的参考光源,可对偏振定标结果进行精度验证^[8]。中国科学院安徽光学精密机械研究所基于玻片堆起偏的原理,研制出一种可调偏振度定标光源(VPOLS),其主要由积分球辐射源和玻璃平板盒体组成,通过旋转内部玻璃平板的角度,实现了偏振度在 0~0.35 范围内的连续调节。在 VPOLS 输出端安装高消光比的线偏振片,可将偏振度调节范围扩展为 0~1。VPOLS 的输出偏振度精度将直接影响遥感器的偏振定标精度^[9]。

依据菲涅耳定律、玻璃平板的折射率和转动角度等参数,可以计算 VPOLS 输出偏振度的理论值^[9]。在实际使用中,理论值的计算涉及到仪器视场角和孔径角,同时受到玻璃折射率数值的准确性、玻璃平板的内部均匀性和表面平行度,以及玻璃平板安装、角度定位精度和积分球辐射源的稳定性等多种因素的影响,VPOLS 的输出偏振度与其理论计算值会有差异,且这种差异会受到实验室环境洁净度、温度以及环境杂散光等因素的影响,限制了 VPOLS 输出偏振度的精度和实际操作的重复性。

根据理论计算^[10],玻璃平板的转动角度误差导致的 VPOLS 偏振度绝对不确定度为 0.00128,换算成相对不确定度约为 0.3%。如果考虑平板内部杂散光等因素,相对不确定度会更高。气溶胶、海色、云和植被遥感等应用一般要求偏振遥感器的偏振度测量不确定度小于 0.5%,这意味着偏振定标光源的不确定度应显著小于 0.5%^[11]。为了保证和提高偏振定标光源的精度,有必要采用独立的偏振度测量装置,实时检测和校准 VPOLS 的输出偏振度。

偏振度测量方法有直接测量法和调制法两大类。直接测量法采用检偏器,在不同透过轴方向(通常为 0°、60°、120°)测量入射光强,计算出目标光的偏振度。该方法原理简单,但受检偏器的透过轴方向定位精度、测量偶然性误差等因素的影响,测量精度一般在 2%左右^[12]。

调制法利用光波的振幅、频率和强度等信息,使它们按调制信号的规律变化。根据调制的方式,主要有振幅调制法、频率调制法和强度调制法。这些

调制方法均采用在光路中引入起偏、相位延迟或机械旋转以改变偏振方向的光学元件,通过测量调制信号求得斯托克斯参量。引入相位延迟光学元件的偏振度的调制法优点是快速同步获取目标光谱和偏振信息,相对于直接测量法,其测量精度有所提升。其缺点是原理复杂,引入了偏振度测量相位延迟的不确定度贡献^[13-15]。

基于振幅调制技术的静态成像光谱偏振仪和引入相位延迟光学元件的强度调制偏振光谱仪在国内仍处于研究和探索阶段^[13-14],其偏振测量精度尚无明确数值。采用频率调制方法的新型弹光调制型成像光谱偏振探测仪,其相位延迟量不确定度为 2%,带来的线偏振度测量不确定度为 1.2%^[15]。

本文结合直接测量法原理简单和测量流程直接的优点,利用强度调制法降低检偏器透过轴方向定位不确定度的特点,设计了一种高精度自动化测量的光谱偏振分析仪(SPOLA)。通过连续和等角度间隔旋转检偏器,使光强信号表达为检偏器透过轴角度的傅里叶级数,斯托克斯参数为傅里叶级数的系数,通过傅里叶逆变换获取完整的斯托克斯参数。利用陷阱探测器测量光强^[16],实现良好的线性、稳定性、极低的偏振敏感性和消杂散光特性。测量过程完全自动化,重复性好。在 0.1~0.99 的偏振度范围内,SPOLA 的测量不确定度小于 0.15%。

2 偏振度测量原理

光的偏振态可用斯托克斯矢量表示^[17]。斯托克斯矢量包含 4 个元素,即 $S=[I, Q, U, V]^T$,各元素均可用光强度表示,能够直接测量。利用斯托克斯矢量定义的偏振度表达为

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}/I, \quad (1)$$

大多数情形下,自然景物的反射光是部分偏振光,可看作是完全线偏振光和非偏振光的混合。根据研究数据,这类偏振光的斯托克斯矢量中,表征左旋和右旋偏振光强度差异的 V 分量接近于 0^[18],因而目前的偏振遥感器均不观测 V 分量。相应地,偏振度定义可简化为线偏振度的定义

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

偏振度检测基本原理如图 1 所示,目标光线沿 z 轴经可旋转检偏器检偏后,使用探测器测量其光强。

检偏器透过轴与 y 轴成 θ 角度时,其 Muller 矩阵为

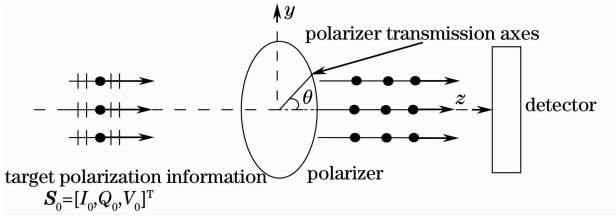


图1 偏振度检测基本原理

Fig. 1 Schematic diagram of polarization measurement

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2}t \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 t 为检偏器的透射率,待测目标偏振态斯托克斯矢量为 $\mathbf{S}_0 = [I_0, Q_0, U_0]^T$, 则经检偏器后光束的斯托克斯矢量为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I_\theta \\ Q_\theta \\ U_\theta \end{bmatrix} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_0 = \frac{1}{2}t \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

斯托克斯矢量的第一行表示光波总强度,即

$$I_\theta = \frac{1}{2}t(I_0 + Q_0 \cos 2\theta + U_0 \sin 2\theta). \quad (5)$$

根据光电探测器接收到的数值与检偏器透过轴 θ 的规律,这里设计了等角度间隔旋转检偏器测量法。检偏器从任意位置开始连续等角度间隔旋转 180° ,使用陷阱探测器测量透射光强。设检偏器透过轴起始角度为 α ,测量角度的总数为 $N(N \geq 3)$, 则第 i 个角度测量的结果为

$$I_{\theta_i} = \frac{1}{2}t \left[I_0 + Q_0 \cos \left(2 \frac{i\pi}{N} + \alpha \right) + U_0 \sin \left(2 \frac{i\pi}{N} + \alpha \right) \right]. \quad (6)$$

由(6)式可以看出,探测器的输出信号与检偏器的角度呈傅里叶级数关系,其中斯托克斯参数 I_0, Q_0, U_0 为傅里叶级数的系数^[19]。采用傅里叶级数系数的求解方法,可以分别求出的 I_0, Q_0, U_0 为

$$I_0 = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^N I_{\theta_i}, \quad (7)$$

$$Q_0 = \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^N I_{\theta_i} \cos 2 \frac{i\pi}{N}, \quad (8)$$

$$U_0 = \frac{2}{\pi} \sum_{i=0}^N I_{\theta_i} \sin 2 \frac{i\pi}{N}. \quad (9)$$

根据偏振度的定义(2)式求解偏振度,为

$$P = \frac{\sqrt{Q_0^2 + U_0^2}}{I_0} = 2 \sqrt{\left(\sum_{i=0}^N I_{\theta_i} \cos 2 \frac{i\pi}{N} \right)^2 + \left(\sum_{i=0}^N I_{\theta_i} \sin 2 \frac{i\pi}{N} \right)^2} \bigg/ \sum_{i=0}^N I_{\theta_i}. \quad (10)$$

(7)~(9)式表明检偏器透过轴方向初始位置 α 对偏振度测量没有影响。傅里叶级数求解偏振度仅要求检偏器透过轴方向等间隔角度定位,结构设计和控制设计易于实现。

对目标信号进行强度调制,使用傅里叶级数求解偏振度,与直接测量法相比,可降低各透过轴方向测量偶然性误差引起的测量不确定度,同时可降低检偏器透过轴方向相对角度定位精度不高引起的测量不确定度。

当检偏器透过轴方向相对角度定位出现误差时,各角度采样误差 δ_i 为

$$\delta_i = (I_{\theta_i+\epsilon_i} - I_{\theta_i}) / I_{\theta_i} = \left\{ \left[Q_0 \cos \left(2 \frac{i\pi}{N} + \alpha + 2\epsilon_i \right) + U_0 \sin \left(2 \frac{i\pi}{N} + \alpha + 2\epsilon_i \right) \right] - \left[Q_0 \cos \left(2 \frac{i\pi}{N} + \alpha \right) + U_0 \sin \left(2 \frac{i\pi}{N} + \alpha \right) \right] \right\} \bigg/ \left[I_0 + Q_0 \cos \left(2 \frac{i\pi}{N} + \alpha \right) + U_0 \sin \left(2 \frac{i\pi}{N} + \alpha \right) \right]. \quad (11)$$

当偏振度接近于1时,偏振度测量不确定度最大。偏振度测量不确定度 u 为

$$u_1 = \left\{ 2 \sqrt{\left[\sum_{i=0}^N I_{\theta_i+\epsilon_i} \cos 2 \left(\frac{i\pi}{N} \right) \right]^2 + \left[I_{\theta_i+\epsilon_i} \sum_{i=0}^N I_{\theta_i} \sin 2 \left(\frac{i\pi}{N} \right) \right]^2} - 2 \sqrt{\left[\sum_{i=0}^N I_{\theta_i} \cos 2 \left(\frac{i\pi}{N} \right) \right]^2 + \left[\sum_{i=0}^N I_{\theta_i} \sin 2 \left(\frac{i\pi}{N} \right) \right]^2} \right\} \bigg/ \sum_{i=0}^N I_{\theta_i}. \quad (12)$$

当采样角度间隔为 60° 时,即检偏器 ($0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$) 放置方式,其检偏器透过轴方向相对角度定位存在随机误差 0.05° ,带来偏振度测量的不确定度

为 9×10^{-4} ^[20]。当采样角度间隔为 1° 时,检偏器透过轴方向相对角度定位存在误差为 0.05° 时,测量完全线偏振光,各角度采样误差如图2所示,带来偏

振度测量的不确定度为 9.4×10^{-5} 。由此可见,连续等间隔角度旋转测量法角度间隔设置越密,其偏振度解析精度越高。

检偏器透过轴方向相对角度定位精度取决于检偏器旋转机构。这里定制的检偏器旋转机构,其相对定位精度优于 0.005° ,带来的偏振度测量不确定度为 $u_1 < 1 \times 10^{-6}$ 。

3 光谱偏振分析仪总体设计

如图 3 所示,光谱偏振分析仪(SPOLA)由检偏器及旋转机构、测偏主光路、辅助对准光路、陷阱探测器、数据采集器和上位机组成。

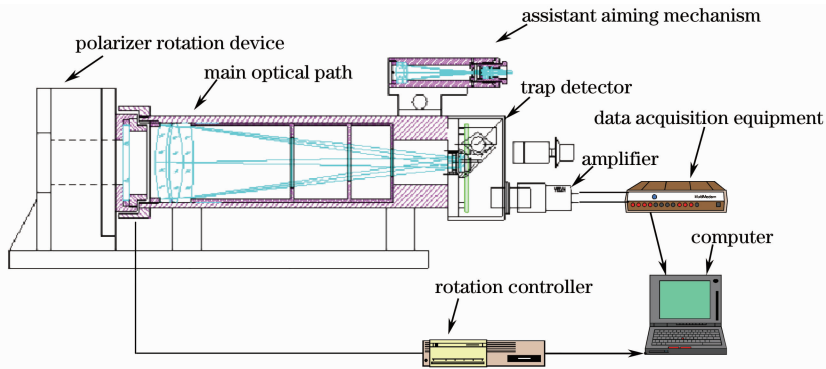


图 3 光谱偏振检测仪组成示意图

Fig. 3 Schematic diagram of SPOLA

通过辅助对准光路实现观测目标的对准后,使用检偏器和旋转机构实现(5)式所示的 θ 角连续变化下的强度调制。目标光通过测偏主光路的会聚和滤光,进入到陷阱探测器。陷阱探测器将光信号转换为电流信号,再经放大器转换为电压信号,最终通过数据采集器进行采样。

3.1 检偏器选择

检偏器设计在光路的最前端,直接对观测目标信号进行强度调制。与检偏器前存在光学元件的偏振仪器比较,可避免光学元件对目标原始偏振特性

的改变。检偏器是 SPOLA 重要元件之一,其消光比参数直接影响其测量精度。检偏器的消光比系数 κ 为检偏器相对被测偏振器转动时的最大透射光强与最小透射光强之比。检偏器消光比对偏振度测量不确定度的影响可表达为^[21]

$$u = 2/(\kappa - 1), \quad (13)$$

式中 u_2 为检偏器消光比引起的偏振度测量不确定度。

为保证 SPOLA 高测量精度,检偏器的消光比系数 κ 应大于 10^3 。这里选用检偏器的消光比系数

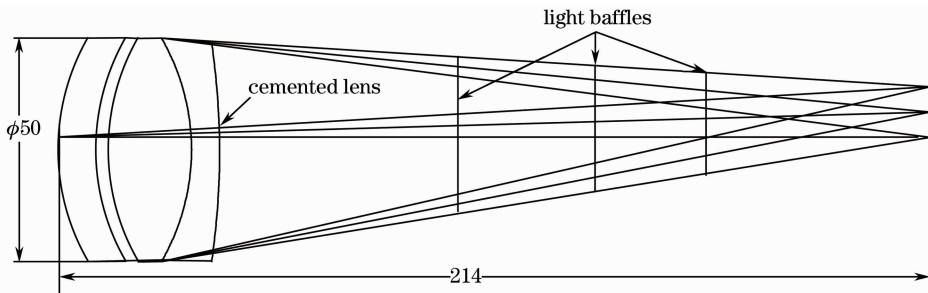


图 4 测偏主光路图

Fig. 4 Schematic diagram of main optical path

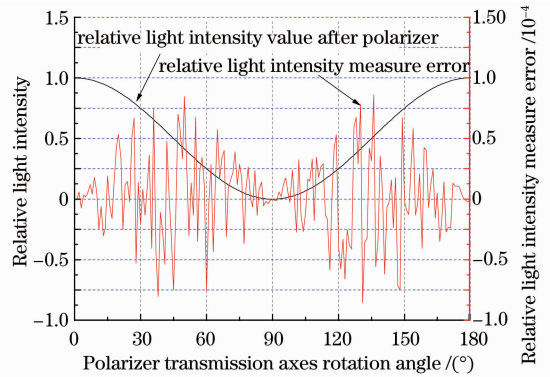


图 2 检偏器相对角度定位精度 0.05° 时各角度采样误差

Fig. 2 Various angle measured errors with relative orientation angle error of 0.05°

大于 10^5 ，其消光比系数引起偏振度测量不确定度 $u_2 < 2 \times 10^{-5}$ 。

3.2 光学设计

SPOLA 采用小孔径、小视场观测的光学设计，测偏主光路如图 4 所示，通光孔径为 $\Phi 50$ mm，焦距设计为 200 mm。使用了 3 块透镜消除色差影响，其中 2 块透镜胶合。为了降低透镜之间的内反射，除胶合面，其余透镜面镀 400~1000 nm 增透膜。测偏主光路内部安装了多道消杂光光阑，以尽可能限制和减少杂散光影响。

采用窄带干涉滤光片作为分光元件，通过更换窄带干涉滤光片的方式实现不同波长偏振度的测量。

3.3 探测器的选择

当目标光的偏振度较高时，检偏器在接近消光角度时，信号极弱，在接近透过角度时，信号强，因此检偏器旋转一周过程中有很大的信号变化范围，为了保证测量的精度，需要使用在大动态范围内具备优良线性和稳定性的探测器，来保证偏振度测量的准确性。

陷阱探测器的三片反射式陷阱结构能够保证入

射光在三片硅管探测器光敏面上依次经历 5 次反射后沿原路返回^[16]。由于第一、二片硅管的入射面相互垂直，入射角相等，在第三片硅管正入射，从而保证了陷阱探测器对入射光的偏振状态是非敏感的。利用陷阱探测器的总反射率仅为单片硅管探测器反射率的 1%，以减少系统杂散光。陷阱探测器光电转换效率和灵敏度均优于单片硅管探测器。同时陷阱探测器具备在 6 个量级的动态范围内具有良好的线性和稳定性^[16]，这里选用其作为探测元件。

根据陷阱探测器的功率响应度、系统透射率 τ 、视场立体角 Ω 、探测器面元接收面积 S_d 、窄带滤光片等效带宽 $\Delta\lambda$ 和待测目标光谱辐亮度 B ，可估算陷阱探测器接收到的光信号功率 Φ_λ 。信噪比可通过计算陷阱探测器接收到的光功率与等效噪声功率的比值得到。

$$\Phi_\lambda = \tau \times B \times \Omega \times S_d \times \Delta\lambda, \quad (14)$$

式中待测目标光的光谱辐亮度相当于地球戈壁沙漠型地表反射的光谱辐亮度，由大气层外 550 nm 处的光谱辐照度乘以 0.25 的反射率，再除以 π 得到。计算结果如表 1 所示。

表 1 SPOLA 光学信噪比计算表 ($P=0$)

Table 1 Optical signal-to-noise ratio calculation of SPOLA ($P=0$)

Parameter	Value
SPOLA system transmittance τ	0.365
Trap detector FOV Ω	1.9×10^{-5}
Trap detector receive area S_d/m^2	3.85×10^{-5}
Narrow band filter equivalent bandwidth $\Delta\lambda/nm$	6.4
Typical target spectrum radiance $B/[\mu W/(cm^2 \cdot sr \cdot nm)]$	20
Trap detector's photon-power /W	3.4×10^{-8}
Noises-equivalent power /W ^[19]	1.5×10^{-15}
Signal-to-noise ratio	2.28×10^7

陷阱探测器实现了光信号至电信号的转换，而其输出的光电流信号能否被精确测量直接影响偏振度测量的最终精度。为保障 SPOLA 良好的测量性能，这里采用多波段辐亮度标准传递探测器所设计的精密微弱电流放大电路^[22]。其电流放大电路能够探测 10^{-10} A 量级的微弱电流，同时具备 60 dB 的动态范围。电流放大电路输出的电压信号通过 6 位半数据采集器 (Agilent 34970A) 采集。

4 实验验证和不确定度评估

为了验证 SPOLA 的测量精度，SPOLA 测量 10 次 VPOLS 的输出偏振光并计算标准偏差，测量结果与 VPOLS 的理论偏振度进行对比。这里对比了 675 nm SPOLA 测量值和 VPOLS 偏振度输出理

论值，测量曲线如图 5 所示，偏振度结果如表 3 所示。

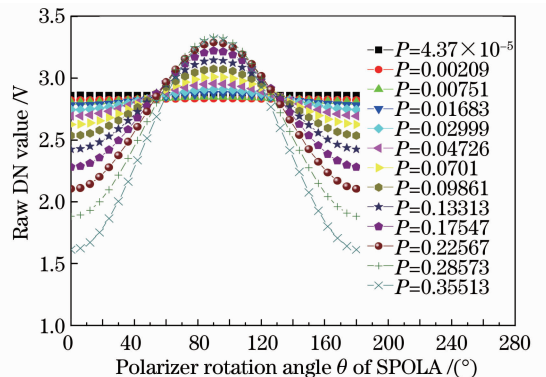


图 5 SPOLA 测量曲线图

Fig. 5 Measurement results of SPOLA

表 2 VPOLS 偏振度测量结果(675 nm)

Table 2 Degree of linear polarization measurement results of VPOLS (675 nm)

Glass plane rotation angle / (°)	Numerical calculation value a	Measured Value b	Standard deviation	Relative standard deviation (u_3)	Difference $b-a$
0	2.2433×10^{-5}	4.37×10^{-5}	2.52×10^{-5}	0.5771	2.13×10^{-5}
5	0.00205	0.00209	3.15×10^{-5}	0.01509	4×10^{-5}
10	0.00752	0.00751	5.32×10^{-5}	0.00708	-2×10^{-5}
15	0.01663	0.01683	3.34×10^{-5}	0.00198	2×10^{-4}
20	0.02971	0.02999	1.17×10^{-4}	0.0039	2.8×10^{-4}
25	0.04721	0.04726	6.57×10^{-5}	0.00139	5×10^{-5}
30	0.06975	0.0701	4.52×10^{-5}	6.44×10^{-4}	3.5×10^{-4}
35	0.09808	0.09861	3.48×10^{-5}	3.53×10^{-4}	5.3×10^{-4}
40	0.13309	0.13313	2.7×10^{-5}	2.03×10^{-4}	4×10^{-5}
45	0.17574	0.17547	4.37×10^{-5}	2.49×10^{-4}	-2.7×10^{-4}
50	0.22684	0.22567	2.32×10^{-5}	1.03×10^{-4}	-0.0012
55	0.28683	0.28573	2.8×10^{-5}	9.79×10^{-5}	-0.0011
60	0.35514	0.35513	3.445×10^{-5}	9.7×10^{-5}	-1×10^{-4}
Polarizer	0.9999	0.99953	9.49×10^{-5}	9.5×10^{-5}	4.7×10^{-4}

表 2 中 VPOLS 输出的第一列和第二列为 VPOLS 内部玻璃平板的角度和偏振度理论值,最后一行为在 VPOLS 后面添加高消光比偏振片的测量结果。SPOLA 测量值的标准偏差小于 1.2×10^{-4} 。从表 2 中可以看出,测量偏振度 0.1~0.36 输出,其 A 类不确定度小于 5×10^{-4} ,同时其 A 类不确定度随着偏振度的增加有明显下降趋势。测量添加偏振片的 VPOLS 输出其 A 类不确定度小于 9.5×10^{-5} 。因此可以评定测量偏振度 0.1~0.99 范围输出,其 A 类不确定度 $u_3 < 5 \times 10^{-4}$ 。

表 2 中 VPOLS 内部玻璃平板角度为 20° 时输出理论值与测量值之间出现较大偏差。这是 VPOLS 偶然非稳定造成的。SPOLA 一次测量时间较长,为 3 min,VPOLS 的非稳定性对偏振度测量可产生影响。这里使用 SPOLA 测量未经激光功率控制器的激光光源(其非稳定性约为 0.5%),其测量结果的标准偏差明显较大,如图 6 所示,说明了光源的稳定性对 SPOLA 测量结果的影响非常大。

使用经过高稳定性激光功率控制器(输出稳定性优于 5×10^{-4})输出的激光光源,对 SPOLA 进行 2 h 的非稳定性检测,其非稳定性 $u_4 < 9.5 \times 10^{-4}$ 。实验表明,在 VPOLS 的定标过程中,需要对其组成部件积分球辐射源的稳定性进行实时监控,以进一步提高偏振定标精度。

偏振度理论值和实测值的偏离,除了 VPOLS 自身的输出精度外,SPOLA 的偏振敏感性也是一个重要原因。一般默认光学系统接收垂直照射的任意偏振方向的偏振光,其响应系数都是相同的,而实

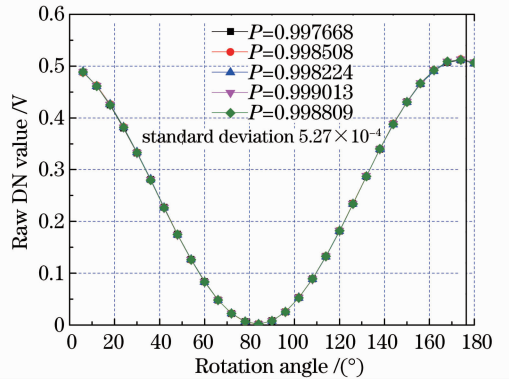


图 6 SPOLA 测量未经激光功率控制器的激光光源
Fig. 6 SPOLA measurement results of laser source without power controlling

际上光学系统的元器件存在非理想性和安装精度,其偏振敏感性如果不校正将导致遥感器辐射度精度的降低。若光学系统的线偏振敏感性为 LPS,入射光为偏振度为 P 的部分偏振光,测量值与理论值之间出现偏差,产生的偏差为 $P \times V_{LPS} / (1 + V_{LPS})$ ^[23]。经过检测,SPOLA 的偏振敏感性产生的不确定度 $u_5 < 0.1\%$,由于篇幅限制,具体测量方法和测量过程就不赘述。偏振敏感性产生的不确定度可通过测量 SPOLA 的 Mueller 矩阵进行校正^[24],在后续工作中会进一步降低偏振敏感性产生的不确定度贡献。

影响偏振度测量的另外一项重要因素为 SPOLA 的非线性。SPOLA 的非线性主要取决于陷阱探测器。陷阱探测器在 6 个量级动态范围内的非线性小于 0.12%^[13],在 1~2 个量级内非线性可

以忽略不计。因而 SPOLA 测量偏振度在 $0 \sim 0.99$ 范围内的部分偏振光,非线性引起的偏振度测量不确定 u_6 可以忽略不计。

根据偏振度的定义(2)式,偏振度反映了斯托克斯分量之间的比值关系,偏振度测量不必要溯源于绝对光谱辐射量。根据 SPOLA 的偏振测量方法,对其各关键部件参数进行测试和评估,主要包括检偏器透过轴角度相对定位不确定度,检偏器消光比,测量 A 类不确定度、偏振敏感性、非稳定性、非线性。各不确定度分量独立,得到偏振分析仪对 675 nm 光源在测量偏振度 $0.1 \sim 0.99$ 的范围内的合成不确定度为 0.15% 。

5 结 论

SPOLA 综合了直接测量法和强度调制法测量偏振度的优点,其研制使用了高精度标准探测器技术与傅里叶级数算法偏振探测技术,其检测过程完全由软件自动控制完成,并自动计算偏振度和斯托克斯矢量。VPOLS 主要用于确定遥感器的 Mueller 矩阵,并对定标结果进行精度验证,在偏振定标过程中不可或缺。使用 SPOLA 高精度实时检测和校正 VPOLS 的输出偏振度,能够进一步降低偏振定标参考光源的不确定度,满足目前遥感器的偏振定标要求。

在进一步的研究中要解决的问题是改善 SPOLA 的偏振敏感性和提高 SPOLA 自动化控制程度。通过 SPOLA 的 Mueller 矩阵校正偏振敏感性带来的不确定度,或者在结构上实现 SPOLA 的光学系统和探测器与检偏器一起旋转的方式,来消除 SPOLA 的偏振敏感性,以降低 SPOLA 的测量不确定度。目前以更换滤光片的方法实现偏振度,装调工作重复,工作量大,通过增加滤光片轮装置,可同时实现多波段的测量,提高光谱偏振自动化控制程度。

参 考 文 献

- Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002.
郝增周, 龚芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101002.
- Liu Qi, Chu Jinkui, Wang Jing, *et al.*. Research and simulation analysis of atmospheric polarization properties under water cloud condition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0301004.
刘琦, 褚金奎, 王兢, 等. 水云条件下大气偏振特性研究及其模拟分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0301004.
- Huang Honglian, Yi Weining, Qiao Yanli. Validation of

- retrieving aerosol optical parameters over the sea using airborne directional polarized camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0601004.
黄红莲, 易维宁, 乔延利. 基于航空偏振相机的海上气溶胶光学特性反演与验证[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0601004.
- Zhu Jin, Wang Xianhua, Pan Banglong. Study on polarization spectral feature of suspended sediment in the water body [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1913-1917.
朱进, 王先华, 潘邦龙. 水体悬浮泥沙的偏振光谱特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(7): 1913-1917.
- Gu Xingfa, Chen Xingfeng, Cheng Tianhai, *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.
- Sun Xiaobing, Qiao Yanli, Hong Jin. Review of polarization remote sensing techniques and application in the visible and infrared [J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2010, 5(3): 175-189.
孙晓兵, 乔延利, 洪津. 可见和红外偏振遥感技术研究进展及相关应用综述[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 175-189.
- Chen Ligang, Meng Fangang, Yuan Yinlin, *et al.*. Project of calibration method for polarization camera [J]. *Journal of Atmospheric and Environment Optics*, 2010, 5(3): 227-231.
陈立刚, 孟凡刚, 袁银麟, 等. 偏振相机的光学定标方案研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 227-231.
- Song Maoxin, Sun Bin, Sun Xiaobing, *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.
- Ligang Chen, Fanggang Meng, Yinlin Yuan, *et al.*. High-precision variable polarization light source [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 29: 1835-1839.
- B D Thierry, A Yves, J M Laherrere. Pre-flight calibration of the POLDER instrument [C]. *SPIE*, 1993, 2553: 218-231.
- Robert Frouin, Pierre-Yves Deschamps, Richard Rothschild, *et al.*. MAUVE/SWIPE: an imaging instrument concept with multi-angular, -spectral, and -polarized capability for remote sensing of aerosols, ocean color, clouds, and vegetation from space [C]. *SPIE*, 2006, 6406: 64060E.
- Song Zhiping, Hong Jin, Qiao Yanli, *et al.*. A new method to measure the degree of the linear polarization of optical radiation from the targets [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(5): 759-762.
宋志平, 洪津, 乔延利, 等. 一种目标光辐射线偏振度测量新方法[J]. *半导体光电*, 2008, 29(5): 759-762.
- Wang Xinquan, Xiangli Bin, Huang Min, *et al.*. Static imaging spectropolarimeter [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(5): 689-692.
王新全, 相里斌, 黄旻, 等. 静态成像光谱偏振仪[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(5): 689-692.
- Song Zhiping, Hong Jin, Qiao Yanli. System design of intensity modulation spectropolarimeter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(11): 2325-2331.
宋志平, 洪津, 乔延利. 强度调制偏振光谱仪的系统设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(11): 2325-2331.
- Chen Youhua, Wang Zhaoba, Wang Zhibin, *et al.*. The research of polarized information detection for photo-elastic modulator-based imaging spectropolarimeter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 63(6): 060702.
陈友华, 王召巴, 王志斌, 等. 弹光调制型成像光谱偏振仪中的高精度偏振信息探测研究[J]. *物理学报*, 2013, 63(6): 060702.

- 16 Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, Zhang Junping, *et al.*. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(6): 749–752.
郑小兵, 吴浩宇, 章骏平, 等. 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱响应率标准探测器[J]. *光学学报*, 2002, 21(6): 749–752.
- 17 Zhang Sanhui. *University Physics 4* [M]. (2nd edition). Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 215–245.
张三慧. *大学物理 4* [M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2002. 215–245.
- 18 Qiao Yanli, Yang Shizhi, Luo Ruizhi, *et al.*. Research on polarized spectral monitoring for remote sensing of earth [J]. *High Technology Letters*, 2001, 7: 36–39.
乔延利, 杨世植, 罗睿智, 等. 对地遥感中的光谱偏振探测方法研究[J]. *高技术通讯*, 2001, 7: 36–39.
- 19 Leng Jianhua. *Fourier Transform* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 16–22.
冷建华. *傅里叶变换* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 16–82.
- 20 Chen Ligang, Hong Jin, Qiao Yanli, *et al.*. Accuracy analysis on a sort of polarized measurement in remote sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(10): 2384–2387.
陈立刚, 洪津, 乔延利, 等. 一种高精度偏振遥感探测方式的精度分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(10): 2384–2387.
- 21 Feng Bin, Shi Zelin, Ai Rui, *et al.*. Computational model for polarization degree of air light under condition of near-horizontal observation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 704–712.
冯斌, 史泽林, 艾锐, 等. 近水平观测条件下大气背景光偏振度的计算模型[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 704–712.
- 22 Zou Peng, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, *et al.*. Development of multi-band standard transfer detector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0404002.
邹鹏, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 多波段辐亮度标准传递探测器的研制[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0404002.
- 23 Pan Ling. *Study of Polarization Calibration Method* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004. 13–28.
潘玲. *基于可调偏振度辐射源的偏振定标方法研究* [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004. 13–28.
- 24 Eugene Waluschka. Sensitivity of VIIRS polarization measurements [J]. *SPIE*, 2010, 7807: 780704.

栏目编辑: 韩峰