

# 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

康 晴<sup>1,2</sup> 李健军<sup>2</sup> 陈立刚<sup>3</sup> 吴浩宇<sup>2</sup> 袁银麟<sup>2</sup> 孟凡刚<sup>2</sup> 翟文超<sup>2</sup> 戚 涛<sup>2</sup> 郑小兵<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>安徽大学物理与材料科学学院, 安徽 合肥 230601

<sup>2</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

<sup>3</sup>滨州学院物理与电子科学系, 山东 滨州 256603

**摘要** 介绍了一种新型高精度大动态范围可调线性偏振度参考光源(VPOLs-II),在0.46~2 $\mu\text{m}$ 波段内线性偏振度调节范围达到0~0.72。VPOLs-II采用四片平板玻璃起偏的工作原理,辐射光源经过积分球和扩束器准直系统形成具有较高均匀性和平行度的入射光,再经过偏振态调节器输出不同线性偏振度的偏振光。将光谱偏振分析仪实验测量结果与理论计算值进行了比对,分析了VPOLs-II输出线性偏振度不确定度的影响因素。结果表明,线性偏振度范围0~0.72内,VPOLs-II的线性偏振度与理论预测值的差异小于 $6\times 10^{-3}$ 。在线性偏振度范围0.01~0.09和0.09~0.72内,线性偏振度的不确定度分别为8.8%~0.936%和0.936%~0.184%。这种新型参考光源可用于偏振光学遥感器的实验室偏振定标和系统级性能检测。

**关键词** 遥感;偏振遥感;偏振定标;偏振光源;线性偏振度

中图分类号 0432.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0412003

## Test and Uncertainty Analysis of Reference Source with Variable Polarization Degree and Large Dynamic Range

Kang Qing<sup>1,2</sup> Li Jianjun<sup>2</sup> Chen Ligang<sup>3</sup> Wu Haoyu<sup>2</sup> Yuan Yinlin<sup>2</sup> Meng Fangang<sup>2</sup>  
Zhai Wenchao<sup>2</sup> Qi Tao<sup>2</sup> Zheng Xiaobing<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Physics and Material Science, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>3</sup>Department of Physical and Electronic Science, Binzhou University, Binzhou, Shandong 256603, China

**Abstract** A novel type of high precision reference source with variable polarization degree at large dynamic range (VPOLs-II) is introduced. The degree of linear polarization (DOLP) adjustment range of VPOLs-II varies from 0 to 0.72 within 0.46  $\mu\text{m}$  to 2  $\mu\text{m}$ . VPOLs-II produces linear polarization rays by four parallel glass plates. Through incorporating an integrating sphere and a beam expander system to guarantee the uniformity and parallelism of the outgoing beam, VPOLs-II generates rays with different DOLP through polarization state adjuster. DOLP values of VPOLs-II are tested. The calculated DOLP values of VPOLs-II and the measured ones by the spectropolarimetric analyzer (SPOLA) are compared and the factors influencing the uncertainty of DOLP are analyzed. The results show that the measured DOLP values of VPOLs-II are coincident with the theoretical ones within a  $6\times 10^{-3}$  maximum difference when DOLP is less than 0.72. The combined uncertainty respectively is 8.8%~0.936% and

收稿日期: 2014-09-22; 收到修改稿日期: 2014-12-05

基金项目: 国家863计划(2013AA7031021)、国家自然科学基金(61275173)

作者简介: 康 晴(1988—),女,硕士研究生,主要从事光学传感器偏振定标方面的研究。E-mail: kangqing2013@163.com

导师简介: 吴浩宇(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事光辐射测量的先进方法、卫星光学传感器的高精度定标和光学遥感等方面的研究。E-mail: hywu@aiofm.ac.cn

\*通信联系人。E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

0.936%~0.184% within DOLP of 0.01~0.09 and 0.09~0.72. This novel type of reference source meets the requirements polarimetric calibration in laboratory for polarized remote sensors and systematic performance test.

**Key words** remote sensing; polarized remote sensing; polarized calibration; polarization light source; degree of polarization

**OCIS codes** 120.0280; 120.5410; 120.4800

## 1 引 言

近年来,偏振遥感作为一个新的研究领域备受关注<sup>[1]</sup>,在研究全球气候变化和环境监测等方面有着重要的应用价值<sup>[2-3]</sup>。偏振光学遥感器可获取大气中的气溶胶粒子谱分布和散射角信息<sup>[4-5]</sup>,目标物理参数的反演质量依赖于偏振定标的精度。研究表明,高精度大气气溶胶参数反演等应用要求偏振光学遥感器的偏振定标精度优于1%<sup>[6]</sup>,则实验室的偏振定标光源测量不确定度应低于1%。为了更有效地提高偏振光学遥感器的应用能力和偏振测量精度,需要对偏振光学遥感器进行实验室偏振定标工作。

实验室偏振定标是偏振光学遥感器工程研制和性能评估的重要环节之一,其目的是建立偏振光学遥感器的观测值与目标偏振态之间的关系<sup>[7]</sup>,具体体现为测量偏振光学遥感器的 Mueller 矩阵,检测偏振光学遥感器的起偏度以及偏振定标系数等性能参数<sup>[8]</sup>,验证偏振定标的结果。

实验室偏振定标通常借助于可调线性偏振度参考光源<sup>[7]</sup>。法国 POLDER<sup>[9-10]</sup>仪器在发射前开展了关于偏振参数的实验室定标,通过一个可以调节线性偏振度和偏振方向的标准偏振光源装置来实现,该装置由两片平板玻璃组成,在平板玻璃的折射率一定的情况下,通过调节两片平板玻璃的安装角度来改变光的线性偏振度,其中 850 nm 和 443 nm 波段的线性偏振度调节范围分别是 0~0.57 和 0~0.595<sup>[11]</sup>。

在国内,中国科学院安徽光学精密机械研究所开展了多角度多光谱偏振遥感相机的实验室定标工作<sup>[12-13]</sup>,研制了基于二片平板玻璃起偏的可调线性偏振度光源(VPOLS),实现对机载偏振遥感相机的实验室定标。星载偏振光学遥感器的实验室定标要求更高的线性偏振度精度<sup>[6]</sup>、线性偏振度动态范围<sup>[14-15]</sup>和测量信噪比,以提高气溶胶粒子的反演精度。VPOLS 缺点主要体现在:由于采用卤钨灯积分球作为辐射源,发散角较大<sup>[16]</sup>,辐射光源平行度低;在 490 nm 波段辐射亮度低,定标信噪比差;采用手动调节方式,调节精度和重复性受到限制;输出的线性偏振度动态范围为 0~0.35<sup>[12]</sup>,线性偏振度调节的动态范围不足。

本文结合星载偏振光学遥感器的实验室检测和定标原理,介绍了一种高精度大动态范围可调线性偏振度参考光源(VPOLS-II)的研制方案,推导了基于四片平板玻璃起偏的线性偏振度表达式,检测了不同波段、不同入射角度情况下的线性偏振度,重点分析了线性偏振度不确定度的影响因素,并利用光谱偏振分析仪(SPOLA)验证了 VPOLS-II 设计的合理性,相对于以往 VPOLS 偏振光源,VPOLS-II 具有发散角小、短波辐亮度高、自动化程度好、线性偏振度动态范围大等技术优点。

## 2 大动态范围可调线性偏振度参考光源的研制

### 2.1 总体方案

VPOLS-II 主要由入射光源和偏振态调节器两部分组成。入射光源包括:白光激光器、声光调制滤波器

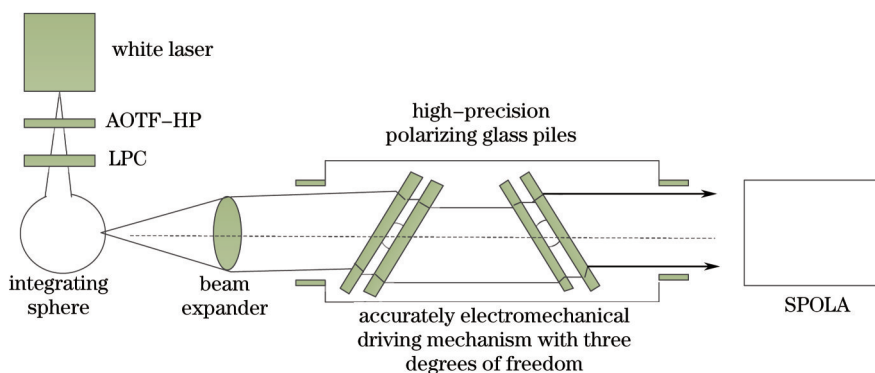


图 1 VPOLS-II 的系统框图

Fig.1 Block diagram of VPOLS-II

(AOTF-HP)、激光功率控制器(LPC)、积分球和扩束器准直系统,偏振态调节器包括:玻片堆三自由度精密转机电驱动机构和高精度起偏玻片堆,如图1所示。通过调节入射光源的输出波长以及偏振态调节器的设置参数,VPOLS-II可以输出不同波长和不同偏振参数的准直偏振光束,作为偏振光学传感器的偏振定标参考光源。利用SPOLA检测VPOLS-II的线性偏振度(DOLP)。

### 2.2 线性偏振度调节原理

由两片平板玻璃的起偏原理<sup>[17]</sup>,可以得到入射光透过第一片平板玻璃后的线性偏振度 $P_1$ 为

$$P_1 = (I_{//} - I_{\perp}) / (I_{//} + I_{\perp}). \quad (1)$$

对于第二、三、四片平板玻璃,设出射光的线性偏振度依次为 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ ,则总的平行振动分量和垂直振动分量的强度比值为

$$I_{//} / I_{\perp} = (1 + P_1) / (1 - P_1) \times (1 + P_2) / (1 - P_2) \times (1 + P_3) / (1 - P_3) \times (1 + P_4) / (1 - P_4) = (1 + P) / (1 - P). \quad (2)$$

四片平板玻璃的材料及倾斜角度相同,所以有 $P_1 = P_2 = P_3 = P_4$ ,即偏振态调节器出射光的总线性偏振度可以表示为

$$P = [(1 + P_1)^4 - (1 - P_1)^4] / [(1 + P_1)^4 + (1 - P_1)^4]. \quad (3)$$

### 2.3 入射光源

入射光源采用白光激光器,光谱范围覆盖0.46~2  $\mu\text{m}$ ,最大输出功率为8 W。采用AOTF-HP选择出射光的中心波长和通道带宽,其典型的带宽小于6 nm。在AOTF-HP后端放置了液晶光阀反馈控制型LPC,稳定性优于0.03%/h。功率稳定后的激光入射到直径为80 mm、出口直径为10 mm的积分球中,经积分球消偏和匀光后的出射光进入有效孔径为120 mm的扩束器准直系统,形成发散角小于0.125°的准直光束。

### 2.4 偏振态调节器

如图2所示,偏振态调节器采用四片平板玻璃起偏的工作原理,通过平板玻璃表面的多次反射,将非偏振光转换为指定线性偏振度的偏振光,并保持光束传播方向等几何性质不发生变化。

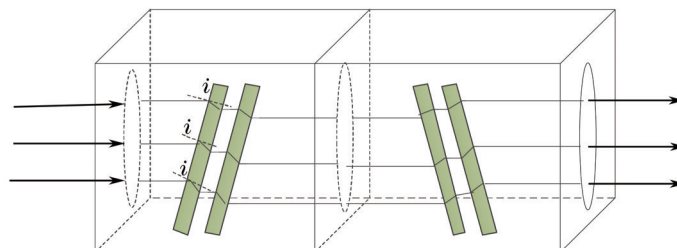


图2 偏振态调节器的原理图

Fig.2 Principle diagram of polarization state adjuster

玻片堆三自由度精密转机电驱动机构可快速实现光的偏振态调制,能精确控制平板玻璃和偏振态调节器盒体的旋转角度。偏振态调节器盒体可沿其主光轴垂直方向转动角度范围为 $\pm 180^\circ$ ,转动精度优于 $\pm 3'$ ,有效输出口径为120 mm。

高精度起偏玻片堆由四片相对放置的K9平板玻璃组成,每片平板玻璃的尺寸为420 mm $\times$ 150 mm $\times$ 50 mm,可分别绕着各自的旋转轴确定方位。平板玻璃由精密步进电机驱动,转动角度范围为 $0^\circ \sim 65^\circ$ ,转动精度优于 $\pm 5''$ 。偏振态调节器的内壁进行发黑处理,并在光路中安装光阑,以减少杂散光的影响。

## 3 线性偏振度检测与不确定度影响因素分析

### 3.1 线性偏振度检测

VPOLS-II的线性偏振度由(3)式近似推出,在化简公式的过程中利用了很多假设条件,例如假设平板玻璃之间是绝对平行的,不考虑吸收、散射、双折射等。推算出来的线性偏振度有一定的偏差,因此,利用实验室研制的SPOLA对出射光的DOLP进行检测。

SPOLA<sup>[18]</sup>是一种高精度自动化测量仪器,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,Stokes 参数为傅里叶级数的系数,通过逆傅里叶变换同时获取完整 Stokes 参数。利用陷阱探测器测量光强,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 的线性偏振度范围内,SPOLA 的合成测量不确定度小于 0.15%。

实验中采用白光激光器作为入射光源,在进行线性偏振度检测时,将白光激光器安装在可调整工作平台上,调整工作台使扩束器的通光孔位于偏振态调节器通光孔的中心,并使 SPOLA 的光轴与白光激光器辐射源法线方向平行,如图 1 所示。检测 VPOLS-II 在 494、675、857、910 nm 波段光谱的线性偏振度,测量角度范围为 0°~65°,角度间隔为 5°。为了消除仪器测量随机误差,每个角度点重复测量 10 次,并将测量结果同理论计算值进行对比分析,结果如图 3 所示。

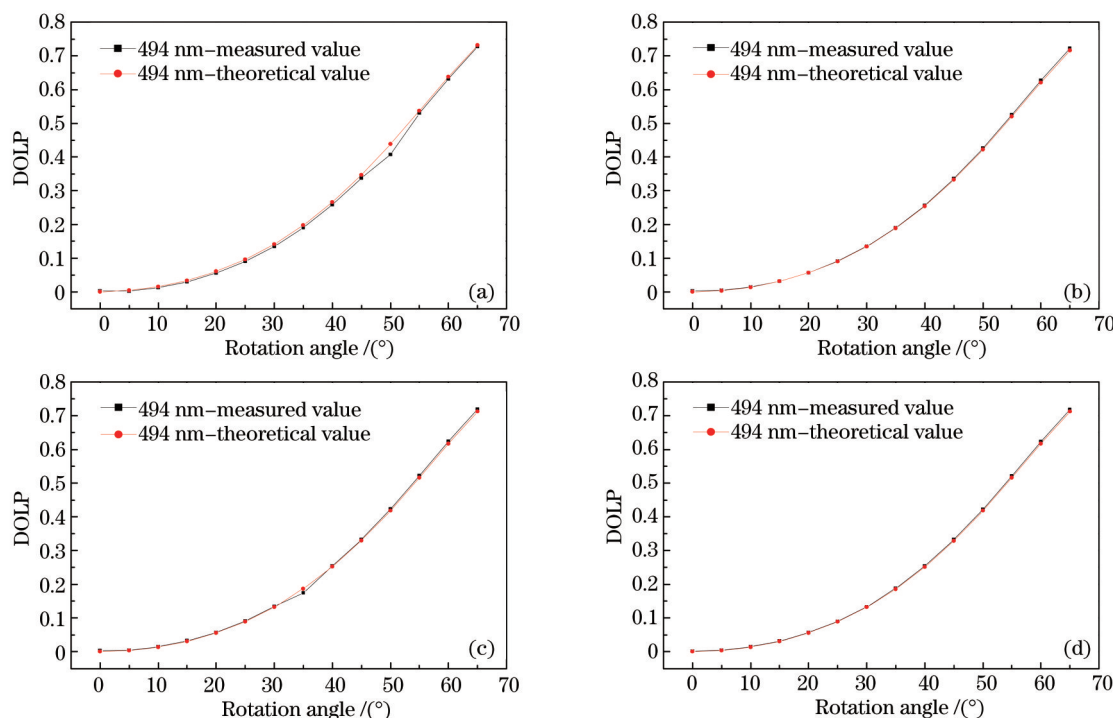


图3 VPOLS-II的线性偏振度检测结果。(a) 494 nm; (b) 675 nm; (c) 857 nm; (d) 910 nm

Fig.3 Testing results of the degree of polarization of VPOLS-II. (a) 494 nm; (b) 675 nm; (c) 857 nm; (d) 910 nm

从图3可以看出,VPOLS-II 出射光的线性偏振度随平板玻璃旋转角度的变大而增大,动态范围达到 0~0.72,在此范围内,VPOLS-II 的输出线性偏振度与理论预测值的差异小于  $6 \times 10^{-3}$ ,如表 1 所示。在 494nm 波段的线性偏振度为 0.434,此处的线性偏振度差异值比较大,这是因为白光激光器在此波段的光强小,SPOLA 测量信噪比偏低。

表 1 VPOLS-II 的线性偏振度测量值与理论值的差异

Table1 Diversities between measured DOLP values and theoretical ones of VPOLS-II

Wavelength /nm	Rotation angle of parallel glass plate/(°)							
	0	10	20	30	40	50	60	65
	Diversities							
494	0.00194	-0.00259	-0.00366	-0.00483	-0.00557	-0.02690	-0.00230	-0.00114
675	0.00272	-0.00022	-0.00103	-0.00212	-0.00259	-0.00197	0.00008	0.00085
857	0.00345	0.00028	-0.00050	-0.00150	-0.00197	-0.00143	0.00029	0.00085
910	0.00157	0.00005	-0.00064	-0.00170	-0.00225	-0.00181	0.00011	0.00038

### 3.2 线性偏振度不确定度的影响因素分析

#### 3.2.1 平板玻璃折射率

线性偏振度计算(3)式中玻璃折射率  $n$  值的大小同波长有关,波长越长折射率越小。平板玻璃折射率的

准确性是影响线性偏振度定标的重要因素,通常其数值由 Sellmeier 公式<sup>[19]</sup>计算得到。

由(2)式对平板玻璃折射率  $n$  求偏导,可得

$$\Delta P_1(n) = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial P_1} \Delta P_1\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial P_2} \Delta P_2\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial P_3} \Delta P_3\right)^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial P_4} \Delta P_4\right)^2}, \quad (4)$$

式中  $\Delta P_1$  和  $\Delta P_2$ 、 $\Delta P_3$ 、 $\Delta P_4$  分别为四片平板玻璃的线性偏振度变化,  $\Delta P_1 = dP_1/dn_1 \cdot \Delta n_1$ 、 $\Delta P_2 = dP_2/dn_2 \cdot \Delta n_2$ 、 $\Delta P_3 = dP_3/dn_3 \cdot \Delta n_3$ 、 $\Delta P_4 = dP_4/dn_4 \cdot \Delta n_4$  ( $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_2$ 、 $\Delta n_3$ 、 $\Delta n_4$  分别为四片平板玻璃的折射率变化)。

由 Snell 公式和(2)式可以得出平板玻璃产生的线性偏振度对折射率的微分关系  $dP_1/dn_1$  (或  $dP_2/dn_2$ 、 $dP_3/dn_3$ 、 $dP_4/dn_4$ ), 即单片平板玻璃的线性偏振度精度  $\Delta P_1$  (或  $\Delta P_2$ 、 $\Delta P_3$ 、 $\Delta P_4$ ) 与折射率变化  $\Delta n_1$  (或  $\Delta n_2$ 、 $\Delta n_3$ 、 $\Delta n_4$ ) 之比。由(2)式可得

$$P = P_A / (1 + P_B), \quad (5)$$

式中  $P_A = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_1 P_2 P_3 + P_1 P_2 P_4 + P_1 P_3 P_4 + P_2 P_3 P_4$ ,  $P_B = P_1 P_2 + P_1 P_3 + P_1 P_4 + P_2 P_3 + P_2 P_4 + P_3 P_4 + P_1 P_2 P_3 P_4$ 。

$\partial P/\partial P_1$ 、 $\partial P/\partial P_2$ 、 $\partial P/\partial P_3$  和  $\partial P/\partial P_4$  可以通过(5)式分别对  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  微分得到

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial P_1} = \frac{(1 + P_2 P_3 + P_2 P_4 + P_3 P_4)(1 + P_B) - (P_2 + P_3 + P_4 + P_2 P_3 P_4) P_A}{(1 + P_B)^2} \\ \frac{\partial P}{\partial P_2} = \frac{(1 + P_1 P_3 + P_1 P_4 + P_3 P_4)(1 + P_B) - (P_1 + P_3 + P_4 + P_1 P_3 P_4) P_A}{(1 + P_B)^2} \\ \frac{\partial P}{\partial P_3} = \frac{(1 + P_1 P_2 + P_1 P_4 + P_2 P_4)(1 + P_B) - (P_1 + P_2 + P_4 + P_1 P_2 P_4) P_A}{(1 + P_B)^2} \\ \frac{\partial P}{\partial P_4} = \frac{(1 + P_1 P_2 + P_1 P_3 + P_2 P_3)(1 + P_B) - (P_1 + P_2 + P_3 + P_1 P_2 P_3) P_A}{(1 + P_B)^2} \end{cases}. \quad (6)$$

对同一种平板玻璃,四片平板玻璃产生的线性偏振度对折射率的微分相同,即

$$\frac{dP_1|_n}{dn_1} = \frac{dP_2|_n}{dn_2} = \frac{dP_3|_n}{dn_3} = \frac{dP_4|_n}{dn_4}. \quad (7)$$

因为  $P_1(n) = P_2(n) = P_3(n) = P_4(n)$ , 由(7)式可知:

$$\frac{\partial P}{\partial P_1}|_n = \frac{\partial P}{\partial P_2}|_n = \frac{\partial P}{\partial P_3}|_n = \frac{\partial P}{\partial P_4}|_n. \quad (8)$$

由于各平板玻璃的折射率变化  $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_2$ 、 $\Delta n_3$ 、 $\Delta n_4$  相同且为  $\Delta n$ , 那么(4)式可以简化为

$$\Delta P_1(n) = \sqrt{4 \left( \frac{\partial P}{\partial P_1} \frac{dP_1}{dn_1} \Delta n \right)^2} = 2 \left| \frac{\partial P}{\partial P_1} \frac{dP_1}{dn_1} \Delta n \right|. \quad (9)$$

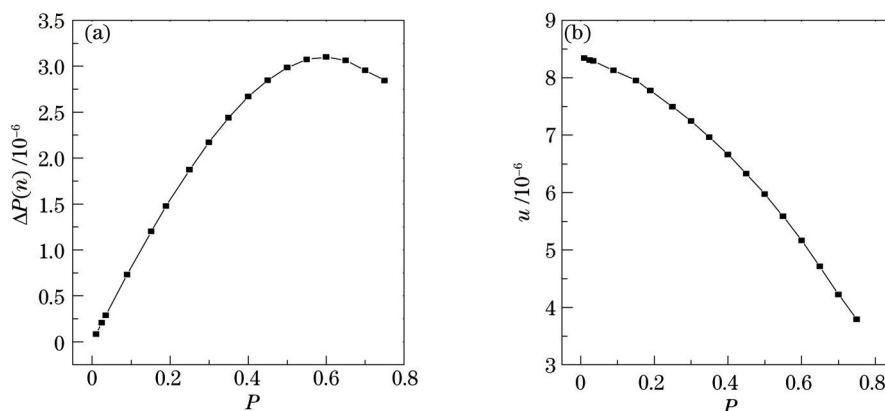


图4 (a) 平板玻璃折射率产生的线性偏振度变化; (b) 平板玻璃折射率产生的线性偏振度不确定度

Fig.4 (a) Variety of DOLP by refractive index; (b) uncertainty of DOLP by refractive index

平板玻璃折射率对线性偏振度产生的不确定度为

$$u_1 = \frac{\Delta P_1(n)}{P}. \quad (10)$$

(9)式中折射率误差  $\Delta n$  是平板玻璃的各项因素共同产生的,依照 Schott 玻璃厂家提供的技术资料<sup>[20]</sup>,折射率最大变化为  $1 \times 10^{-4}$ ,结果如图 4 所示。

由图 4(a)可知,在线性偏振度范围 0~0.72 内,随着线性偏振度的增大,平板玻璃折射率产生的线性偏振度变化呈先增加后减小的趋势,在线性偏振度为 0.6 左右,线性偏振度变化最大,达到  $3.1 \times 10^{-6}$ ;由图 4(b)可知,在线性偏振度范围 0~0.72 内,平板玻璃折射率产生的线性偏振度不确定度随线性偏振度的增大而减小,最小值达到  $3.88 \times 10^{-6}$ 。

### 3.2.2 平板玻璃的吸收

VPLS-II 的线性偏振度 (3) 式在推算过程中没有考虑平板玻璃的吸收,实际上随着光束穿过玻璃的路径的增加,光量被吸收得越多。由朗伯比尔定律可以计算平板玻璃的吸收系数  $\alpha$ 。

假设考虑玻璃的吸收,则透过第一片平板玻璃后的线性偏振度为

$$P'_1 = \{ \sin^2(i+r) \cdot \sin^2(i-r) [2 \sin^2(i+r) - 2(1-\alpha)^2 \sin^2(i-r) + (\alpha^2 - 2\alpha) \sin^2(i+r) \sin^2(i-r)] / \\ \{ 2 \sin^4(i+r) - 2(1-\alpha)^2 \sin^4(i-r) + 2 \sin^2(i+r) \cdot \sin^2(i-r) [(1-\alpha)^2 \sin^2(i-r) - \sin^2(i+r)] - \\ (\alpha^2 - 2\alpha) \sin^4(i+r) \sin^4(i-r) \} \}, \quad (11)$$

则偏振态调节器出射光的总线性偏振度为

$$P' = [(1+P'_1)^4 - (1-P'_1)^4] / [(1+P'_1)^4 + (1-P'_1)^4]. \quad (12)$$

平板玻璃吸收对线性偏振度产生的变化为

$$\Delta P_2 = P - P'. \quad (13)$$

平板玻璃吸收对线性偏振度产生的不确定度为

$$u_2 = \frac{\Delta P_2(i)}{P}. \quad (14)$$

平板玻璃吸收对线性偏振度产生的变化和不确定度结果如图 5 所示。

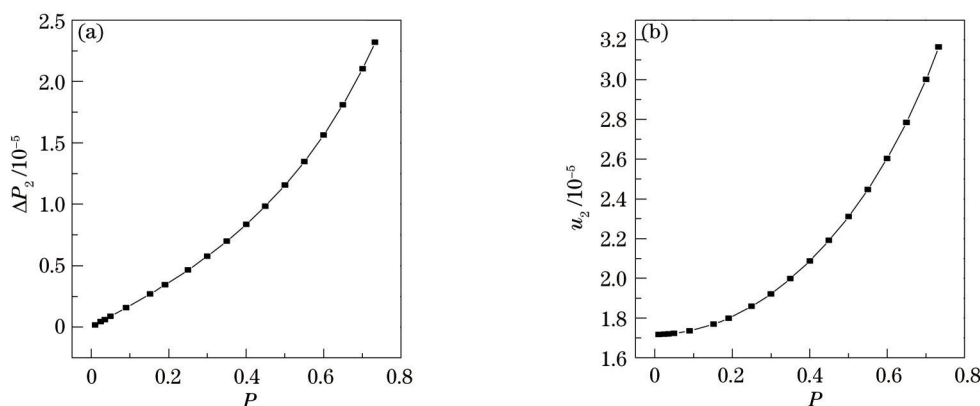


图 5 (a) 平板玻璃吸收产生的线性偏振度变化; (b) 平板玻璃吸收产生的线性偏振度不确定度

Fig.5 (a) Variety of DOLP by absorption; (b) uncertainty of DOLP by absorption

由图 5(a)可知,在线性偏振度范围 0~0.72 内,平板玻璃吸收产生的线性偏振度变化随线性偏振度的增加而逐渐变大,最大值达到  $2.3 \times 10^{-5}$ ;由图 5(b)可知,在线性偏振度范围 0~0.72 内,平板玻璃吸收产生的线性偏振度不确定度也随线性偏振度的增大而逐渐变大,最大值达到  $3.13 \times 10^{-5}$ 。

### 3.2.3 角度误差

安装与调节平板玻璃会产生一定的角度误差,这是影响线性偏振度的另一个重要因素。由 (3) 式对入射角  $i$  求偏导,可得

$$\Delta P_3(i) = \sqrt{4 \left( \frac{\partial P}{\partial P_1} \frac{dP_1}{di_1} \Delta i \right)^2} = 2 \left| \frac{\partial P}{\partial P_1} \frac{dP_1}{di_1} \Delta i \right|, \quad (15)$$

角度误差对线性偏振度产生的不确定度为

$$u_3 = \frac{\Delta P_3(i)}{P}, \quad (16)$$

式中角度误差  $\Delta i$  是平板玻璃的安装和调节共同产生的,依照角位置定位试验直接试验法中的综合试验法<sup>[21]</sup>可以保证各平板玻璃角度误差低于  $\Delta i = 5'' \approx 0.0014^\circ$ ,结果如图6所示。

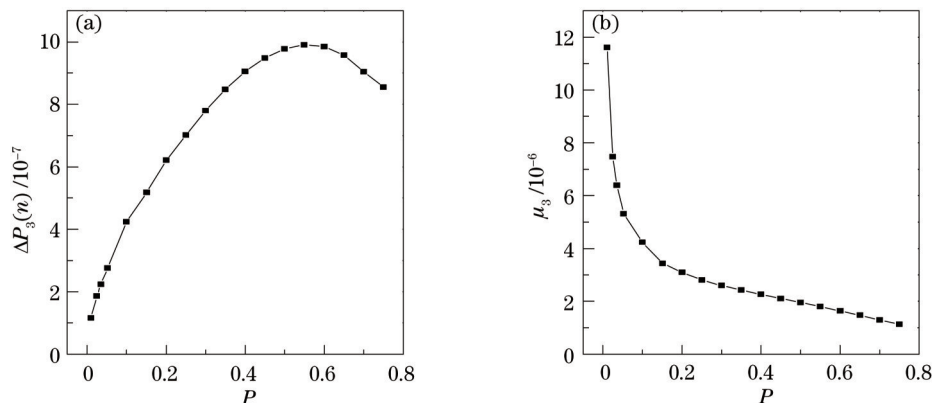


图6 (a)角度误差产生的线性偏振度变化;(b)角度误差产生的线性偏振度不确定度

Fig.6 (a) Variety of DOLP by angle error; (b) uncertainty of DOLP by angle error

由图6(a)可知,在线性偏振度范围0~0.72内,随着线性偏振度的增加,角度误差产生的线性偏振度变化先增大后减小,在线性偏振度为0.55左右,线性偏振度变化最大,达到  $9.91 \times 10^{-7}$ ;由图6(b)可知,在线性偏振度范围0~0.72内,角度误差产生的线性偏振度不确定度随线性偏振度的增大而减小,最小值达到  $1.24 \times 10^{-6}$ 。

### 3.2.4 参考光源非稳定性

一般定标或测试仪器有一定的测试时间,其测量一次线性偏振度的时间越短,光源的光强变化越小,其线性偏振度测量精度越高。光源的非稳定性表征其光强随时间偏离的程度<sup>[22]</sup>,通常固定仪器测量条件,以一定的间隔持续测量一段时间。对入射光源进行测量,并对测量结果进行归一化处理,如图7所示。经分析可知,入射光源在1 min、30 s、5 s内的非稳定性分别小于0.1%、0.05%和0.01%。

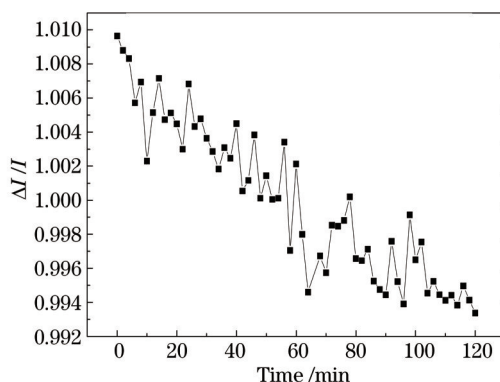


图7 参考光源的非稳定性

Fig.7 Instability of reference light source

光强的相对变化可描述为

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{mean}}}, \quad (17)$$

式中  $\Delta I/I$  表示光强的相对变化,  $V_{\max}$  表示仪器测量最大值,  $V_{\min}$  为仪器测量最小值,  $V_{\text{mean}}$  为仪器测量平均值。

部分偏振光(入射光强为1,理论线性偏振度为  $P$ ,偏振角为  $0^\circ$ )经过三个方向的检偏器(偏振方向为  $0^\circ$ 、

60°、120°)<sup>[23]</sup>后的光强信号与入射光强之间的关系<sup>[24]</sup>为

$$\begin{cases} I_0 = I(0^\circ) = 0.5(1 + P) \left( 1 \pm \frac{\Delta I_0}{I} \right) \\ I_1 = I(60^\circ) = 0.5(1 - 0.5P) \left( 1 \pm \frac{\Delta I_1}{I} \right) \\ I_2 = I(120^\circ) = 0.5(1 - 0.5P) \left( 1 \pm \frac{\Delta I_2}{I} \right) \end{cases} \quad (18)$$

光源的非稳定性产生的线性偏振度为

$$P' = \frac{2\sqrt{(I_0 \cos 0^\circ + I_1 \cos 120^\circ + I_2 \cos 240^\circ)^2 + (I_0 \sin 0^\circ + I_1 \sin 120^\circ + I_2 \sin 240^\circ)^2}}{I_0 + I_1 + I_2}, \quad (19)$$

即

$$P' = \frac{\sqrt{(2I_0 - I_1 - I_2)^2 + (\sqrt{3}I_1 - \sqrt{3}I_2)^2}}{I_0 + I_1 + I_2}, \quad (20)$$

入射光源非稳定性对线性偏振度产生的不确定度为

$$u_4 = \frac{\Delta P_4}{P} = \frac{P - P'}{P}. \quad (21)$$

入射光源的非稳定性对线性偏振度产生的误差和对 VPOLS-II 线性偏振度产生的不确定度,如图 8 所示。

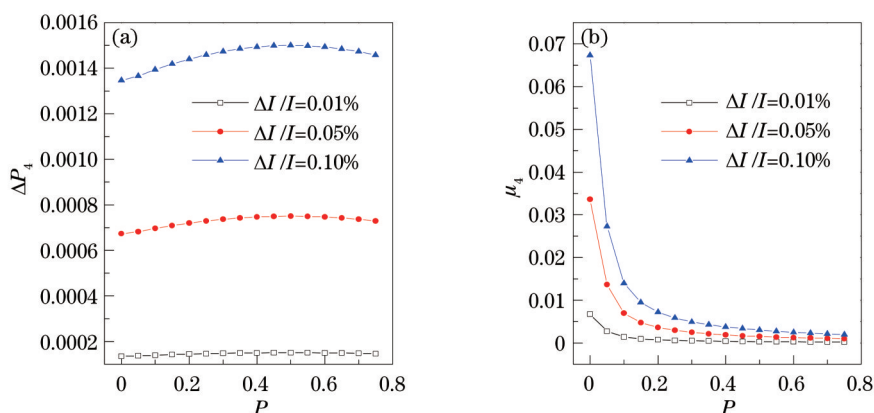


图 8 (a)线性偏振度变化随非稳定性的变化曲线; (b)不确定度随线性偏振度的变化曲线

Fig.8 (a) Diagram of variety of DOLP with instability; (b) diagram uncertainty of DOLP by instability of source

图 8(a)表明了光源的非稳定性会对偏振光源的输出精度产生影响。偏振入射光源的非稳定性越小,线性偏振度输出值越接近理论值,产生的线性偏振度误差也越小。在线性偏振度范围 0~0.72 内,非稳定性为 0.01%、0.05% 和 0.1% 时,光源对线性偏振度产生的变化分别为  $1.34 \times 10^{-4} \sim 1.5 \times 10^{-4}$ 、 $6.73 \times 10^{-4} \sim 7.5 \times 10^{-4}$  和  $1.35 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3}$ 。图 8(b)表明了光源的非稳定性产生的线性偏振度不确定度与线性偏振度数值有关,线性偏振度越大产生的不确定度越小。以光源的非稳定性为 0.05% 对 VPOLS-II 进行线性偏振度不确定度评估,在线性偏振度范围 0~0.72 内,非稳定性产生的线性偏振度不确定度随线性偏振度的增大而减小,最小值达到  $7.29 \times 10^{-4}$ 。

### 3.2.5 参考光源平行度

经扩束器准直系统后的入射光源具有较高的平行度和较好的面均匀性,发散角小于  $0.125^\circ$ ,面均匀性优于 99%。发散角仍会对 VPOLS-II 的输出线性偏振度产生影响,对一定发散角度内的线性偏振度作平均,计算输出的线性偏振度。

令  $P = f(i)$ , 有:



$$\bar{P} = \frac{\int_{i-\theta}^{i+\theta} f(i)di}{\int_{i-\theta}^{i+\theta} di}, \quad (22)$$

式中  $\bar{P}$  为平均线性偏振度,它反映了测量系统对一确定发散角内的线性偏振度测量精度, $\theta$ 为发散角, $i$ 为非偏振光入射至平板玻璃上的角度。

由积分函数的对称性,有:

$$\bar{P} = \frac{2 \int_i^{i+\theta} f(i)di}{2 \int_i^{i+\theta} d\theta} = \int_i^{i+\theta} f(i)di / \theta. \quad (23)$$

参考光源平行度对线性偏振度产生的不确定度为

$$u_5 = \frac{P - P'}{P} = \frac{\Delta P_5}{P}. \quad (24)$$

参考光源平行度对线性偏振度产生的变化和不确定度结果如图9所示。

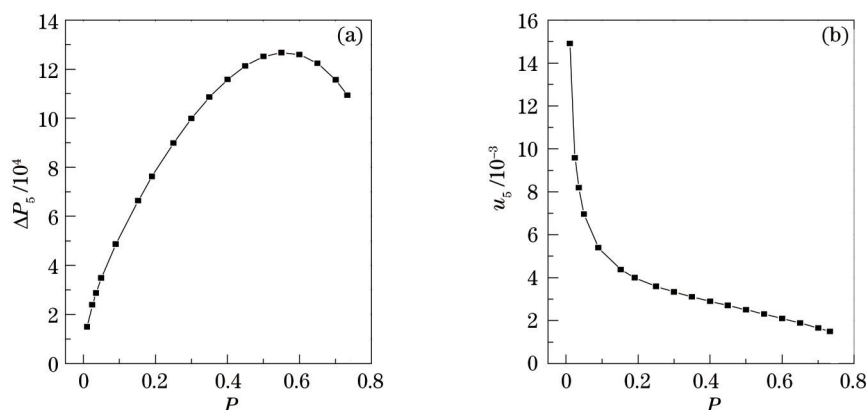


图9 (a)参考光源的平行度产生的线性偏振度变化;(b)平行度产生的线性偏振度不确定度

Fig.10 (a) Variety of DOLP by parallelism of reference source; (b) uncertainty of DOLP by parallelism of reference source

由图9(a)可知,在线性偏振度范围0~0.72内,随着线性偏振度的增大,参考光源平行度产生的线性偏振度变化趋势为先增大后减小,在线性偏振度为0.55左右时,线性偏振度变化最大,达到 $1.27 \times 10^{-3}$ ;由图9(b)可知,在线性偏振度范围0~0.72内,随着线性偏振度的增大参考光源平行度产生线性偏振度不确定度逐渐减小,最小值达到 $1.49 \times 10^{-3}$ 。

由以上分析可知,在VPOLS-II的线性偏振度不确定度的影响因素中,当线性偏振度为0~0.14和0.14~0.72时,参考光源的非稳定性和平行度分别占主要因素。因此,若要提高VPOLS-II的出射光线性偏振度精度,需要进一步提高参考光源的非稳定性和平行度。

### 3.2.6 合成不确定度评定

根据不确定度传递定律,VPOLS-II的线性偏振度不确定度主要来源于以上五种因素。各线性偏振度对应的不确定度值均取实际测量的最大值,结果如表2所示,合成不确定度可描述为

$$u_A = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2}. \quad (25)$$

其合成扩展不确定度为

$$U_A = k u_A, (k=1) \quad (26)$$

用 $E_n$ 值对VPOLS-II的理论计算值和SPOLA测量值的一致性进行评价<sup>[25]</sup>,可描述为

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_A^2 + U_B^2}}, \quad (27)$$

式中 $x$ 是线性偏振度测量值, $X$ 是线性偏振度理论计算值, $U_A$ 是可VPOLS-II的合成扩展不确定度, $U_B$ 是

SPOLA的合成不确定度。

由于SPOLA的合成不确定度的线性偏振度范围是0.1~0.99<sup>[16]</sup>,因此仅对VPOLS-II在线性偏振度范围0.09~0.72的不确定度进行评定。

表2  $u_A$ 和 $E_n$ 值的计算结果  
Table 2 Results of  $u_A$  and  $E_n$  value

Uncertainty sources	$P$									
	0.01~0.09	0.09	0.14	0.19	0.26	0.34	0.43	0.53	0.63	0.72
Refractive index/ $10^{-6}$	8.28~8.36	8.12	7.97	7.76	7.47	7.06	6.51	5.82	4.98	4.05
Absorption/ $10^{-5}$	1.66~1.68	1.66	1.70	1.77	1.84	1.96	2.13	2.41	2.68	3.12
Angle error/ $10^{-6}$	5.34~14.3	4.21	3.64	3.14	2.79	2.48	2.19	1.89	1.57	1.23
Instability of source/ $10^{-3}$	13~94	7.69	5.56	3.82	2.88	2.24	1.78	1.44	1.2	1.03
Parallelism of source/ $10^{-3}$	7~18	5.39	4.67	4.02	3.57	3.00	2.81	2.42	2.01	1.57
Combined uncertainty/ $10^{-3}$	9.36~88	9.36	7.23	5.52	4.57	3.87	3.30	2.79	2.31	1.84
$x-X/10^{-3}$	-0.22~2.72	-1.58	-2.12	-2.45	-2.59	-2.51	-1.97	-1.12	0.08	0.85
Uncertainty of SPOLA/ $10^{-3}$	/					1.5				
$E_n$	/	-0.16	-0.29	-0.43	-0.54	-0.60	-0.54	-0.34	0.03	0.36

由表2可知,在线性偏振度范围为0.01~0.09和0.09~0.72时,线性偏振度合成不确定度分别为8.8%~0.936%和0.936%~0.184%,线性偏振度合成不确定度与线性偏振度成反比例关系。在0.01~0.09时,线性偏振度测量不确定度最大值达到了8.8%,主要是采用相对不确定度进行评价引起的,线性偏振度值越小,相对不确定度结果越大。 $E_n$ 值绝对值范围为0.03~0.6,均小于1,为满意结果。说明仪器的装配精度良好,检测原理和检测方法选择合理。

## 4 结 论

研制了一种用于偏振光学遥感器实验室定标的VPOLS-II,采用四玻片堆和三自由度精密转动机电驱动机构实现线性偏振度的连续可调、大动态范围以及高偏振精度输出。对影响线性偏振度输出精度的各项不确定度来源进行分析,并对检测结果的精度进行评价。结果表明,实验测量值与理论计算值具有较好的一致性。

VPOLS-II作为偏振光学遥感器偏振定标的重要组成部分,是验证偏振光学遥感器设计性能指标、设计合理性的必要条件。VPOLS-II可作为线性偏振度已知且连续可调的定标源对光学遥感器的偏振定标结果进行精度验证,还可以定标仪器光学镜头的起偏度、滤光片转轮通道的相对透射率等偏振特性参数,为进一步获得仪器矩阵和反演目标线性偏振度信息发挥重要作用。

在进一步的工作中,应尽量减少入射光束发散角,以减少光学系统偏振效应;提高参考光源在可见-近红外波段的稳定性,减少光源非稳定性产生的不确定度,提高出射光线性偏振度精度;选择在线性偏振度大于0.1的测量状态下进行线性偏振度检测,减小偏振定标过程的不确定度。VPOLS-II在光学遥感器的实验室偏振定标方面具有良好的应用前景,为以后的偏振定标光源系统设计提供参考。

## 参 考 文 献

- 1 K Miyakawa, H Adachi, Y Inoue. Rotation of two-dimensional arrays of microparticles trapped by circularly polarized light [J]. Appl Phys Lett, 2004, 84(26): 5440-5442.
- 2 G Egan Walter, J Duggin Michael. Optical enhancement of aircraft detection using polarization [C]. SPIE, 2000, 4133: 172-178.
- 3 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.
- 4 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.
- 5 W Cooper Alfred, J Lentz William, L Walker Phillip. Infrared polarization ship images and contrast in the MAPTIP experiment [C]. SPIE, 1996, 2828: 85-96.
- 6 M Leroy, J L Deuzé, F M Bréon, *et al.*. Retrieval of atmospheric properties and surface bidirectional reflectances over land from POLDER/ADEOS [J]. J Geophys Res: Atmospheres, 1996, 102(D14): 17023-17037.
- 7 Gu Xingfa, Tian Guoliang, Yu Tao, *et al.*. Space Optical Remote Sensor Radiometric Calibration Theory and Methods [M]. 1st Edition. Beijing: Science Press, 2013. 479-492.  
顾行发, 田国良, 余涛, 等. 航天光学遥感辐射定标原理与方法[M]. 第一版. 北京: 科学出版社, 2013. 479-492.
- 8 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.
- 9 P Y Deschamps, M Herman, A Podaire, *et al.*. The POLDER instrument: Mission objectives [C]. SPIE, 1992, 1746: 72-91
- 10 P Goloub, J L Deuze, M Herman, *et al.*. Analysis of the POLDER, airborne polarization measurements performed over clouds covers [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1994, 32(1): 78-87.
- 11 J Gregoris Dennis, Yu Simon, W Cooper Alfred, *et al.*. Dual-band infrared polarization measurements of sun glint from the sea surface [C]. SPIE, 1992, 1687: 381-391.
- 12 Chen Ligang. Study of Laboratory Calibration of the Airborne Polarization CCD Camera with Wide Field of View [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2008. 8-74.  
陈立刚. 宽视场航空偏振成像仪的实验室定标研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2008. 8-74.
- 13 Chen Ligang, Meng Fangang, Yuan Yinlin, *et al.*. High-precision variable polarization light source [J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 1835-1839.
- 14 P Goloub, B Toubbe, M Herman, *et al.*. In-flight polarization calibration of POLDER [C]. SPIE, 1997, 2957: 299-309.
- 15 Ute Böttger, Rene Preusker, Jens Nieke, *et al.*. Radiative transfer model STORM for full Stokes vector calculations for a plane parallel atmosphere-surface-system [C]. SPIE, 2005, 5979: 59791V.
- 16 Xu Qiuyun, Zheng Xiaobing, Zhang Wei, *et al.*. Radiometric characteristics test of integrating sphere source using wavelength-tunable laser [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1310-1313.  
徐秋云, 郑小兵, 张伟, 等. 利用可调谐激光的积分球光源辐射特性测试[J]. 光学学报, 2009, 29(5): 1310-1313.
- 17 Pan Ling. Study of Polarization Calibration Method [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2004. 19-21.  
潘玲. 基于可调线性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. 19-21.
- 18 Yuan Yinlin, Zheng Xiaobing, Wu Haoyu, *et al.*. A intensity modulated spectro-polarimetric analyzer based on Fourier transformation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1223001.  
袁银麟, 郑小兵, 吴浩宇, 等. 基于傅里叶变换的强度调制型光谱偏振分析仪 [J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1223001.
- 19 Milton Laikin. Lens Design [M]. 4th Edition. Boca Raton: CRC Press Inc, 2006. 10-11.
- 20 SCHOTT. TIE-29: Refractive Index and Dispersion [OL]. [www.us.schott.com/advanced\\_optics/english/download/schott-tie-29-refractive-index-and-dispersion-april-2014-us.pdf](http://www.us.schott.com/advanced_optics/english/download/schott-tie-29-refractive-index-and-dispersion-april-2014-us.pdf). [2014-12-22].
- 21 National Military Standard. GJB1801-1993. Testing Methods of Major Performance for Test Equipments of Inertial Technology [S]. Beijing: Department of Aeronautics and Astronautics, 1993.  
国军标. GJB1801-1993, 惯性技术测试设备主要性能试验方法[S]. 北京: 航空航天部, 1993.
- 22 Yuan Yinlin, Xu Jun, Zhai Wenchao, *et al.*. Design and test of a spectrally tunable integrating sphere reference light source with large exit aperture [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0712004.  
袁银麟, 徐骏, 翟文超, 等. 大孔径可调光谱积分球参考光源研制和检测[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0712004.
- 23 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.
- 24 A L Verlaan, H VanBrug, H Visser. A novel design for a spectropolarimeter: SPEX [C]. SPIE, 2013, 8873: 88730K.
- 25 Ni Yucai. Practical Evaluation of Measurement Uncertainty [M]. 4th Edition. Beijing: China Quality Press and China Standard Press, 2014. 254-255.  
倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 第四版. 北京: 中国质检出版社, 中国标准出版社, 2014. 254-255.

栏目编辑: 何卓铭