

偏振光谱仪偏振探测精度分析

李金金^{1,2}, 孙晓兵¹, 康 晴^{1,2}, 李 树^{1,2}, 殷玉龙^{1,2}

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 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. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 用于野外地物偏振光谱测量的偏振光谱仪, 其偏振探测精度直接影响到地物偏振光谱信息获取的准确性, 进而影响到目标偏振特性的解译水平。设计了适用于光栅光谱仪的偏振测量组件, 将两种型号的光栅光谱仪改装成偏振光谱仪。基于可调偏振度光源验证偏振光谱仪的偏振光谱测量精度, 首先分析了偏振光谱仪的偏振敏感性, 然后给出了偏振光谱仪对可调偏振度光源输出不同偏振度谱的实验测量结果。实验结果表明: 在 460~920 nm 波长范围之间, 偏振光谱仪具有一定的偏振敏感性, 加装退偏器之后, 偏振光谱仪对输出光的测量偏振度与可调偏振度光源输入的标准偏振度具有很好的一致性, 实测值与理论值的绝对误差均在 2% 以内, 从而验证了两种型号的偏振光谱仪偏振测量组件设计的可行性, 能够满足实验测量的要求。

关键词: 偏振光谱仪; 退偏器; 偏振度; 偏振测量精度

中图分类号: O433.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0123002

Polarization detection accuracy analysis of spectropolarimeter

Li Jinjin^{1,2}, Sun Xiaobing¹, Kang Qing^{1,2}, Li Shu^{1,2}, Yin Yulong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The accuracy of polarized detection for field-portable spectropolarimeter directly influences the precision of polarization spectrum of ground object, and thus affects the interpretation accuracy of the polarized characteristic of targets. A polarization measurement group unit was designed for grating spectrometer. Then the two kinds of grating spectrometers were transformed into spectropolarimeters. Based on variable polarization light source, the performances of the two spectropolarimeters were verified. The polarization sensitivity of the two spectropolarimeters was analyzed at first. The different degree of polarization spectra output from variable polarization light source was measured using the two spectropolarimeters. The results show that both of them have polarization sensitivity and the degree of polarization of output light measured by the two spectropolarimeters are consistent with the theoretical output of the variable polarization light source. The error between theoretical output and measured results

收稿日期: 2017-06-08; 修订日期: 2017-08-20

基金项目: 国家国防科工局高分专项(民用部分)卫星应用共性关键技术项目(32-Y20A22-9001-15/17); 中国资源卫星中心资助项目; 中国科学院重点资助项目(KGFZD-125-13-006); 国家大科学工程航空遥感系统资助项目

作者简介: 李金金(1991-), 女, 硕士生, 主要从事光学偏振遥感方面的研究。Email: jinjin_liz@163.com

导师简介: 孙晓兵(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光学偏振遥感方面的研究。Email: xbsun@aiofm.ac.cn

are within 2% when the wavelength range is from 460 nm to 920 nm. It verifies that the feasibility of two spectropolarimeter polarization measurement group unit which could meet the experiment requirements.

Key words: spectropolarimeter; depolarizer; degree of polarization; accuracy of polarization detection

0 引言

偏振光谱信息在地球环境监测、大气遥感探测、目标识别、材料特性研究以及生物医学等领域具有广阔的应用前景,是研究目标偏振特性的重要数据来源,近年来该领域的研究已成为热点^[1-5]。偏振光谱信息可用 Stokes 参数来完整描述。偏振光谱仪正是通过测量目标的 Stokes 参数来获取目标的偏振光谱信息。Stokes 参数均为实数且具有强度量纲,可以通过对辐亮度的观测得到。在偏振测量时,采用分时的方式,依次测量目标在三个偏振方向上的强度值,即可获得目标的 Stokes 参数,进而求出偏振度、偏振角等其他偏振信息。这种偏振信息获取方法简单易行,适用于多种状态下偏振信息的测量。

作为偏振光谱信息获取的重要一环,如何设计能够满足偏振测量需求的检偏装置以及验证装置的性能是一个值得关注的问题^[6]。仪器的精度直接影响实验的结果。文中设计了适用于光栅光谱仪的偏振测量组件,将两种型号的光栅光谱仪改装成偏振光谱仪。针对改装的偏振光谱仪的偏振敏感性,在偏振测量组件中增加了退偏器,保证到达偏振光谱仪的光是非偏的。基于可调偏振度光源,利用可调偏振度光源输出一定偏振度的光,用偏振光谱仪在不同的起偏角下测量输出光的辐亮度,然后经处理将得到的输出光的偏振度与可调偏振度光源输出的偏振度理论值作对比,从而检测出偏振光谱仪的偏振测量精度。这种方法可在一定程度上弥补仅测量自然光和完全线偏振光验证方法的局限性^[7]。

1 偏振精度检测装置

1.1 可调偏振度光源

可调偏振度光源 (Variable Polarization Light Source-II, VPOLS-II) 主要由入射光源与偏振态调节器两部分组成^[8]。入射光源包括: 卤钨灯、积分球和

扩束准直器系统。偏振调节器包括: 玻片堆三自由度精密转动机电驱动机构和高精度起偏玻片堆。四片平板玻璃的角位置定位精度和重复定位精度的绝对值均小于 5"。在 0.46~2 μm 光谱波段内, VPOLS-II 偏振度调节范围为 0~0.72。VPOLS-II 输出光的理论偏振度由四块平板玻璃的折射率和旋转角度决定, 实际偏振度采用光谱偏振分析仪测量得到, 当入射光偏振度动态范围在 0~0.72 内, VPOLS-II 的偏振度测量值与理论计算值的差异小于 6×10^{-3} , 因此 VPOLS-II 可以作为偏振光学遥感器的偏振定标参考光源。通过调节入射光源的输出波长, 改变偏振态调节器中四块平板玻璃的旋转角度, VPOLS-II 可以输出不同波长和不同偏振参数的准直偏振光束。偏振态调节器的原理图见图 1。

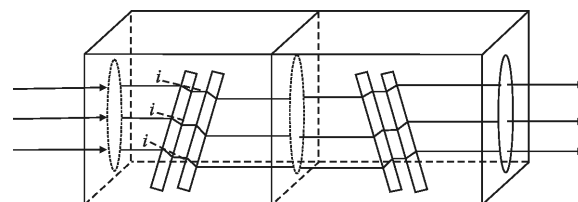


图 1 偏振态调节器的原理图

Fig.1 Principle diagram of polarization state adjusting device

1.2 偏振光谱仪

偏振光谱仪主要由便携式地物光谱仪和偏振测量组件组成, 结构如图 2 所示。

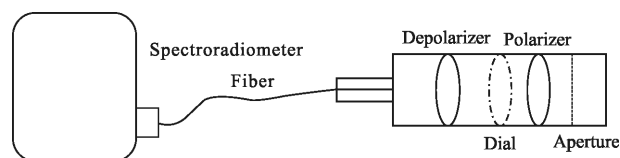


图 2 偏振光谱仪结构图

Fig.2 Sketch of spectropolarimeter

文中所选择的两种型号的光栅光谱仪分别是 SVC HR-1024 地物光谱仪和 ASD FieldSpec 4 地物光谱仪。欲测量目标的偏振信息, 需要在光谱仪镜头

前加装偏振片，但是由于光谱仪自身的偏振敏感性(分析见 3.1 节) 导致在偏振测量过程中出现误差,因此需要在偏振测量组件中增加一块退偏器来消除光谱仪的偏振敏感性。光谱仪的具体参数如表 1 所示。

表 1 偏振光谱仪主要参数

Tab.1 Specifications of the spectropolarimeter

Spectropolarimeter	SVC HR-1024	ASD FieldSpec 4
Spectral range/nm	350-2 500	350-2 500
Field of view/(°)	5	5
Spectral resolution	≤ 3.2 nm, 350-1 000 nm ≤ 8.5 nm, 1 000-1 850 nm ≤ 6.5 nm, 1 850-2 500 nm	3 nm@700 nm 8 nm@1 400/2 100
Detector	512 Si, 350-1 000 nm 256 InGaAs, 1 000-1 850 nm 256 expanded InGaAs, 1 850-2 500 nm	512 Si,350-1 000 nm two InGaAs detectors, TE cooling, 1 000-2 500 nm
Scanning time	1 s	100 ms

偏振测量组件主要由消杂光光阑、可旋转偏振片、退偏器组成,偏振片以及退偏器的型号及参数如表 2 所示,偏振片透过率和消光比如图 3 所示。由表 1 和表 2(1 in=2.54 cm)可知,偏振片和退偏器的波长范围都与光谱仪一致,从而确保了光谱仪的有效探测。偏振片和退偏器可以相对转动,转动结构上标记角度刻度(0°~360°每隔 1°划线),安装时将偏振片的快轴方向与 0°对齐。

表 2 偏振片及退偏器参数

Tab.2 Parameters of polarizer and depolarizer

Product model	GPM-100-UNC	DPU-25
Diameter/in	1.0	1.0
Thickness/mm	2.2	7.35
Spectral range/nm	300-2 700	190-2 500

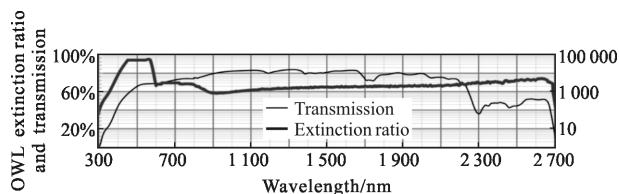


图 3 偏振片的消光比与透过率

Fig.3 Extinction ratio and transmission of polarizer

2 测量原理

2.1 偏振光谱仪测量原理

在遥感探测中通常使用 Stokes 参数(I, Q, U, V)来描述偏振光的偏振信息。由于地物反射的太阳光中的圆偏振分量很小,一般可以忽略,取 $V=0$ 。当入射光通过一个理想的起偏器时,偏振光谱仪接收到的与参考方向成 α 角的透射光的强度的可以由入射光的 Stokes 参数表示^[9]:

$$L(\alpha, \lambda) = \frac{1}{2}(I + Q\cos 2\alpha + U\sin 2\alpha) \quad (1)$$

测量时,只需要将偏振光谱仪的偏振片的起偏角 α 适当地转动三次就可以求出被测光的前三个 Stokes 参数 I, Q, U 。通常选取 $0^\circ, 60^\circ, 120^\circ$ 作为起偏角,可以获得被测光的 Stokes 参数 I, Q, U ,

$$\begin{cases} I(\lambda) = \frac{2}{3}(L(\lambda, 0^\circ) + L(\lambda, 60^\circ) + L(\lambda, 120^\circ)) \\ Q(\lambda) = \frac{2}{3}(2L(\lambda, 0^\circ) - L(\lambda, 60^\circ) - L(\lambda, 120^\circ)) \\ U(\lambda) = \frac{2\sqrt{3}}{3}(L(\lambda, 60^\circ) - L(\lambda, 120^\circ)) \end{cases} \quad (2)$$

进而得到线偏振度为:

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (0 \leq P \leq 1) \quad (3)$$

2.2 退偏器退偏原理

偏振片旋转不同角度时,经过偏振片的光具有不同的振动方向,光栅探测器在探测不同振动方向的偏振光时会由于自身的偏振敏感性产生不同的误差。退偏器的作用是将经过偏振片的具有一定振动方向的偏振光退偏成非偏光,来消除仪器对偏振光敏感所带来的误差,而不改变光栅探测器接受的能量大小。文中所选用的退偏器是由两个晶体石英楔片组成,其中一个厚度是另一个的两倍,其光轴间的夹角为 45° ,楔片的楔角约为 2° 。这种设计使得退偏器的退偏效果不依赖于入射光的偏振方向,该特性在光的初始偏振态未知或随时间变化的应用中尤为有用。

入射光的 Stokes 矢量可表示为 $S_i = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$, 设石英楔片退偏器的 Mueller 矩阵 M ,

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_2 & \sin \delta_1 \sin \delta_2 & -\cos \delta_1 \sin \delta_2 \\ 0 & 0 & \cos \delta_1 & \sin \delta_1 \\ 0 & \sin \delta_2 & -\sin \delta_1 \cos \delta_2 & \cos \delta_1 \cos \delta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： δ_1 、 δ_2 分别为光信号在两晶体中的相位延迟，与晶体的厚度与入射波长(以及入射光瞳半径)有关。在中心波长为 λ 、带宽为 $\Delta\lambda$ 、光瞳面积为 S 的入射条件下，出射光可表示为：

$$S = \int_{\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}} \int_S (MS_i) dS d\lambda \quad (5)$$

其中，

$$I = \int_{\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}} \int_S S_0 dS d\lambda = S_0 S \Delta\lambda \quad (5a)$$

$$Q = \int_{\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}} \int_S (S_1 \cos \delta_2 + S_2 \sin \delta_1 \sin \delta_2 - S_3 \cos \delta_1 \sin \delta_2) dS d\lambda = \int_{\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}} \left\{ 2S_1 \cos b \frac{J_1(k)}{k} + \frac{1}{2} S_2 \left[-\cos 3b + \cos b \frac{J_1(2k)}{k} \right] + \frac{1}{2} S_3 \left[-\sin 3b + \sin b \frac{J_1(2k)}{k} \right] \right\} d\lambda \quad (5b)$$

$$U = \int_{\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}} \int_S (S_2 \cos \delta_1 + S_3 \sin \delta_1) dS d\lambda = \int_{\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}} \left[2S_2 \cos 2b \frac{J_1(k)}{k} + 2S_3 \sin 2b \frac{J_1(k)}{k} \right] d\lambda \quad (5c)$$

$$V = \int_{\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}} \int_S (S_1 \sin \delta_2 - S_2 \sin \delta_1 \cos \delta_2 + S_3 \cos \delta_1 \cos \delta_2) dS d\lambda = \int_{\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}} \left\{ 2S_1 \sin b \frac{J_1(k)}{k} + \frac{1}{2} S_2 \left[-\sin 3b - \sin b \frac{J_1(2k)}{k} \right] + \frac{1}{2} S_3 \left[\cos 3b + \cos b \frac{J_1(2k)}{k} \right] \right\} d\lambda \quad (5d)$$

式中： $k = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda} \tan \alpha$ ， $b = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda} d$ 。

由公式(5a)~(5d)可知，偏振光经过退偏器后输出光是入射光在空域(光瞳范围)和频域(波长范围)共同积分效果的综合^[10-11]。不管入射光具有何种偏振态，出射光总是在光束横截面内周期性地均匀出现线偏振光、椭圆偏振光、圆偏振光，因而可以在空间平面内积分达到退偏的目的。为验证退偏器的退偏

性能，实验室内用偏振光谱分析仪测定线偏振光经过退偏器后的出射光的偏振度，结果如表 3 所示。

表 3 退偏器退偏结果

Tab.3 Depolarizing results of the depolarizer

Wavelength	P					
	Rotation angle of polarizer					
	0°	30°	60°	90°	120°	150°
490 nm	1.91%	1.74%	1.51%	1.13%	1.00%	1.79%
670 nm	1.94%	1.76%	1.11%	1.21%	0.95%	1.83%
Broadband	1.62%	1.03%	0.84%	1.05%	0.90%	1.60%

由表 3 可知，出射光的偏振度最大为 1.91%，退偏效果可以达到实验的要求。

3 实验及结果分析

由卤钨灯发出的光入射到小积分球内进行消偏和匀光，采用扩束器准直系统将积分球出射光准直为平行光。平行光进入到偏振态调节器，通过旋转精密转台，使偏振态调节器中玻片堆的端面法线与入射光线分别成 15°、25°、35°、45°、55°、65°角，输出偏振度可调的部分偏振光。在特定偏振度下，用两台偏振光谱仪依次测量偏振片在 0°、60°和 120°三个起偏角度下偏振辐射光谱曲线，三条光谱曲线分别记为 $L(\lambda, 0^\circ)$ 、 $L(\lambda, 60^\circ)$ 、 $L(\lambda, 120^\circ)$ ，通过公式(2)和(3)计算出输出光的偏振度光谱曲线，并与可调节偏振度光源输入的标准偏振度曲线作对比，从而检测出仪器的偏振测量精度。

由于光源在紫外与红外波段光源能量较弱，信噪比较小，探测器在此波段的响应不够灵敏且偏振态调节器在紫外波段输出光的偏振度精度不够，文中只研究可见光到近红外波段(460~920 nm)。

3.1 偏振光谱仪偏振敏感性分析

在检测偏振光谱仪偏振测量精度之前，需要确定偏振光谱仪的偏振敏感性。实验中在测量时可将偏振测量组件中的退偏器去掉，直接用未加退偏器的偏振光谱仪测量出射的偏振光。测量结果与标准偏振度如图 3 所示。图 3 和图 4 分别表示在偏振态调节器中玻片堆的端面法线与入射光线成 25°、45°和 65°角时，SVC 和 ASD 偏振光谱仪未安装退偏器

时出射光的偏振度的测量值与标准偏振度的对比结果。从图中可以看出,不管是 SVC 偏振光谱仪还是 ASD 偏振光谱仪,测量结果与标准值都有一定的差距,其中在出射光偏振度较小(0.09 左右,旋转角度 25°)时,SVC 偏振光谱仪的测量绝对误差的最大值达到 7.95%,ASD 偏振光谱仪的测量绝对误差的最大值达到 2.51%;在出射光偏振度较大时(0.72 左右,旋转角度 65°),SVC 偏振光谱仪的测量绝对误差的

最大值达到 5.9%,ASD 偏振光谱仪的测量绝对误差的最大值达到 3.88%;当在出射光偏振度处于二者之间(0.33 左右,旋转角度 45°)时,SVC 偏振光谱仪的测量绝对误差的最大值达到 5.61%,ASD 偏振光谱仪的测量绝对误差的最大值达到 2.3%。这说明两台光谱仪都具有偏振敏感性,因此需要对到达仪器的偏振光进行退偏处理,使之变成非偏振光,这样测量结果才具有可信性。所以,在偏振测量组件中加装

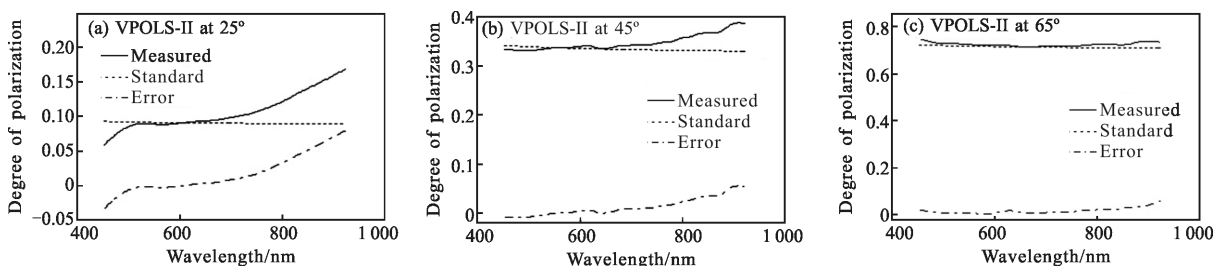


图 4 标准偏振度及 SVC 偏振光谱仪不加退偏器测量结果

Fig.4 Standard polarization degree and measurement results with SVC spectropolarimeter without depolarizer

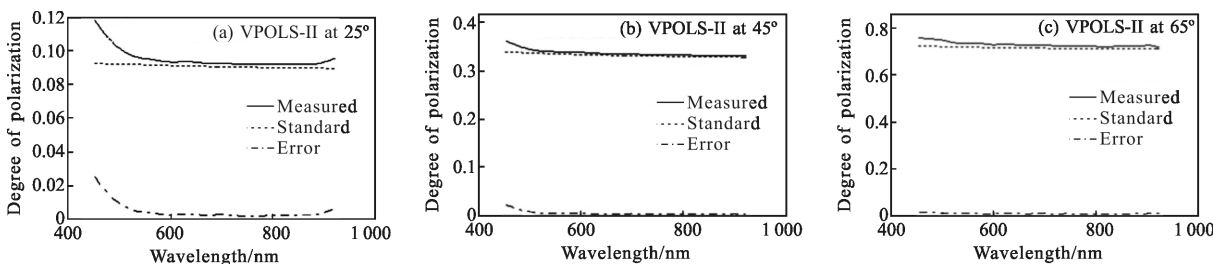


图 5 标准偏振度及 ASD 偏振光谱仪测量结果

Fig.5 Standard polarization degree and measurement results with ASD spectropolarimeter without depolarizer

一块退偏器是非常有必要的。

3.2 SVC 偏振光谱仪测量结果

SVC 偏振光谱仪加装退偏器时的测量结果如图 6 所示。(a)~(f)分别表示偏振态调节器旋转 6 个角度时,每个特定角度下可调偏振度光源输出光的标准偏振度、SVC 偏振光谱仪测量值以及二者之间的差值图。从图中可以看出,在各个标准偏振度下,SVC 偏振光谱仪的测量值与可调偏振度光源输出的理论值具有良好的一致性,测量值以标准值为基准上下浮动,在 900 nm 以后有相对较大的偏差。

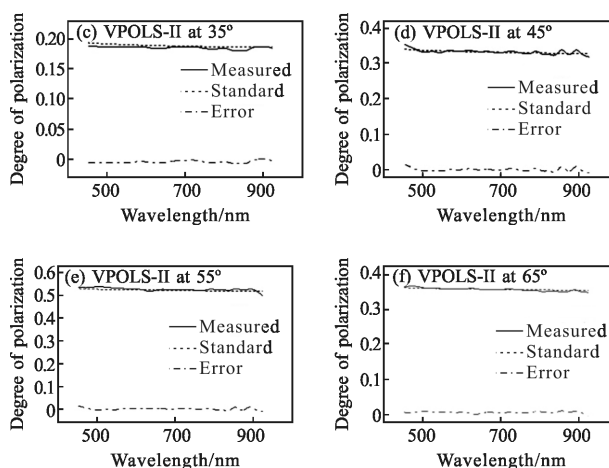
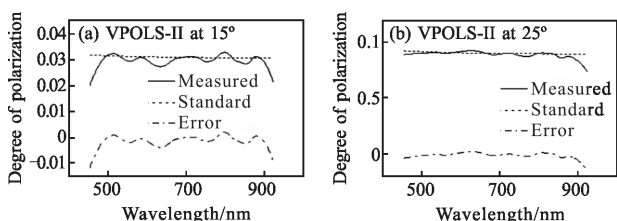


图 6 标准偏振度及 SVC 偏振光谱仪测量结果

Fig.6 Standard polarization degree and measurement results with SVC spectropolarimeter

在 460~920 nm 波长范围之间,统计各个特定偏



振度下实测值与理论值之间的测量误差如表 4 所示,可以看出在各个偏振度下的测量值与理论值的绝对误差最大值出现在偏振态调节器旋转 65°时,最大误差为 1.90%。其余偏振度下的测量误差均在 1.6%以下,最小仅为 0.65%。相对于未加退偏器时的测量结果均有较大的提升。

表 4 SVC 偏振光谱仪测量结果的差值统计

Tab.4 Statistics of error of SVC

spectropolarimeter's results

Rotation angle of VPOLS-II / (°)	15	25	35	45	55	65
Error-max	1.00%	0.20%	0.27%	1.55%	1.56%	1.90%
Error-min	0.14%	1.18%	0.65%	-1.29%	-1.31%	-1.28%

3.3 ASD 偏振光谱仪测量结果

图 6 所示的是 ASD 偏振光谱仪加装退偏器后的测量结果。图(a)~(f)分别表示偏振态调节器旋转 6 个角度时,每个特定角度下可调偏振度光源输出光的标准偏振度、ASD 偏振光谱仪测量值以及二者之间的差值图。同 SVC 偏振光谱仪测量结果一样,在各个偏振度下,ASD 偏振光谱仪的测量值与可调偏振度光源输出的理论值也具有良好的一致性,测量值与理论值基本重合,只在 500 nm 波长以前有轻微的上扬。

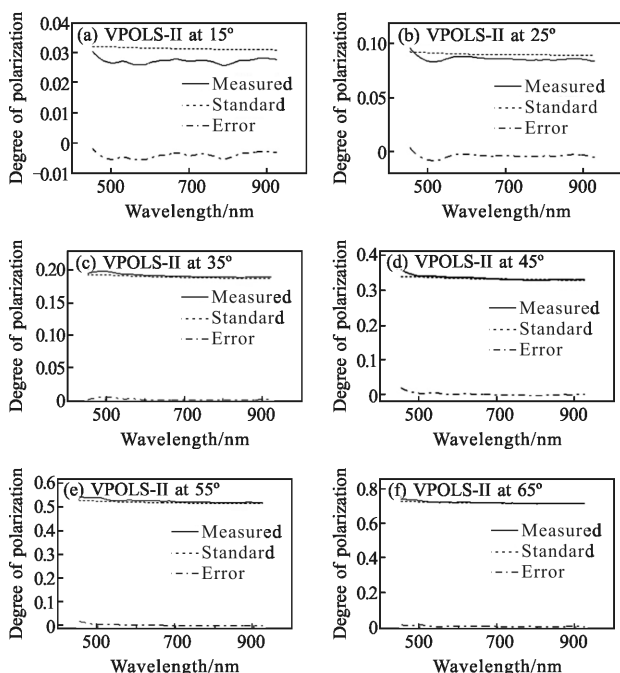


图 7 标准偏振度及 ASD 偏振光谱仪测量结果

Fig.7 Standard polarization degree and measurement results with ASD spectropolarimeter

在 460~920 nm 波长范围之间,统计各个特定偏振度下实测值与理论值之间的测量误差如表 5 所示,可以看出在各个偏振度下的测量值与理论值的绝对误差最大值出现在偏振调节器旋转 45°、55°时,最大值为 1.54%。其余偏振度下的测量误差均不超过 1.3%,最小仅为 0.56%,相对于未加退偏器时的测量结果也都有较大的提升。

表 5 ASD 偏振光谱仪测量结果的差值统计

Tab.5 Statistics of error of ASD

spectropolarimeter's results

Rotation angle of VPOLS-II / (°)	15	25	35	45	55	65
Error-max	0.56%	0.36%	0.57%	1.54%	1.54%	1.29%
Error-min	0.17%	-0.85%	0.11%	-0.19%	-0.19%	0.2%

4 结论

利用可调偏振度光源验证偏振传感器的偏振探测精度的方法,在一定程度上弥补了仅对自然光和完全偏振线偏振光进行测量的局限性。可调偏振度光源输出特定偏振度的光,使用偏振光谱仪进行测量,通过将偏振光谱仪的测量偏振度值与标准偏振度值进行对比分析,从而验证两台偏振光谱仪的性能。实验结果表明,在 460~920 nm 之间,两台光谱仪的测量结果与理论值都具有很好的 consistency,SVC 偏振光谱仪的测量绝对误差最大为 1.90%,ASD 偏振光谱仪的测量绝对误差最大为 1.54%,并且退偏器的加入消除了仪器本身的偏振敏感性,说明偏振光谱仪的偏振测量组件的设计是正确可行的,此结构也可应用于其他具有偏振效应的光栅光谱仪的改装。经过改装的偏振光谱仪原理简单,操作方便,适合野外地物的偏振光谱的测量。

参考文献:

[1] Egan W G. Polarization in remote sensing[C]/SPIE, 1992, 1747: 2-48.
 [2] Shangguan J Y, Yan H R. Study of interplanetary magnetic field with Ground State Alignment [J]. *Astrophysics and Space Science*, 2013, 343(1): 335-344.
 [3] Sapp J W, Frasier S J, Dvorsky J, et al. Airborne dual-polarization observations of the sea surface NRCS at C-band in high winds [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*

- Letters*, 2013, 10(4): 726–730.
- [4] Wang Xia, Xia Runqiu, Jin Weiqi, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3175–3182. (in Chinese)
- [5] Wang Xia, Liang Jian'an, Long Huabao, et al. Experimental study on long wave infrared polarization imaging of typical background and objectives [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 32–38. (in Chinese)
- [6] Song Zhiping, Yin Yuhao, Zhang Minghui, et al. Verification of PSIM system based on tunable polarization light source[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(3): 477–481. (in Chinese)
- [7] Song Zhiping, Hong Jin, Qiao Yanli. System design of intensity modulation spectropolarimeter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(11): 2325–2330. (in Chinese)
- [8] Kang Qing, Li Jianjun, Chen Ligang, et al. Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 176–186. (in Chinese)
- [9] Cao Hanjun, Qiao Yanli, Yang Weifeng, et al. Characterization and analysis of the polarization images in remote sensing [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2002, 19: 373–378. (in Chinese)
- [10] Chi Hao, Gao Jun, Xu Senlu. A novel practical quasi monochromatic depolarizer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(8): 1097–1102. (in Chinese)
- [11] Liu Ying, Fu Shaojun, Li Futian. The depolarization characteristic of quartz depolarizer in UV–VUV spectral region [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004, 24(3): 372–375. (in Chinese)