

## 空间调制线偏振光谱测量的波片延迟误差校正

张 莽<sup>1</sup>, 李 双<sup>2,3</sup>, 刘 强<sup>2,3</sup>, 龚 平<sup>2,3</sup>

(1. 四川省遥感信息测绘院, 四川 成都 610100;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 光学遥感中心, 安徽 合肥 230031;

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:** 基于四分之一波片-复合双折射光楔-偏振片的空间偏振调制结构, 提出了四光束校正方法, 对四分之一波片延迟量误差进行校正, 从而达到提高线偏振测量精度的目的; 利用计算机仿真手段, 研究了待测目标圆偏振参量变化时, 线偏振参量测量结果的变化情况以及相应的测量精度水平。仿真结果表明: 当待测目标的线偏振度、圆偏振度分别在 0.1~0.2、0~0.2 随机波动时, 延迟校正后的斯托克斯参量  $Q_i$ 、 $U_i$  以及线偏振度的测量精度优于  $10^{-3}$ ,  $U_i$  以及线偏振度的测量精度比延迟校正前提高了约 14 倍。

**关键词:** 空间调制; 偏振光谱仪; 延迟校正

**中图分类号:** P237 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1117008

## Calibration of retardance deviation for DOLP measurement based spatial modulating spectropolarimeter

Zhang Qiao<sup>1</sup>, Li Shuang<sup>2,3</sup>, Liu Qiang<sup>2,3</sup>, Gong Ping<sup>2,3</sup>

(1. Sichuan Remote Sensing Geomatics Institute, Chengdu 610100 China;

2. Center of Optical Remote Sensing, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In order to insure the accuracy in linear polarimetry, a four-beam method was presented to calibrate the retardance of quarter wave plate. The method was based on spatial modulating optical structure, which was composed of quarter wave plate, combo birefringent wedge and polarizer. Variety of polarization measurement and polarization measuring accuracy was researched by simulation approach, when degree of circular polarization of target was changed. It was indicated that the measuring accuracy of  $Q_i$ ,  $U_i$  and degree of linear polarization were better than  $10^{-3}$  with retardance calibration, when degree of linear and circular polarization is randomize between 0.1 to 0.2 and 0 to 0.2 respectively. Accuracy of polarization parameter measuring, except  $Q_i$ , is about 14 times higher than those without retardance calibrating process.

**Key words:** spatial modulation; spectropolarimeter; retardance calibration

收稿日期: 2016-03-05; 修订日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国科学院天文联合基金(U1331111); 四川省测绘地理信息局科技项目(J2014ZC05)

作者简介: 张莽(1985-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光学遥感信息工程方面的研究。Email: qiaozh@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 李双(1976-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事偏振光谱遥感探测技术方面的研究。Email: shli@aiofm.ac.cn

## 0 引言

随着传感器技术、仪器制造技术的快速发展,偏振探测已经被多个行业和领域所采用<sup>[1]</sup>,如遥感<sup>[2-3]</sup>,生物及医学诊断<sup>[4]</sup>,天文观测<sup>[5]</sup>等。目前,偏振调制技术已逐渐成为偏振测量的重要手段<sup>[6]</sup>,如基于液晶相位可变延迟器<sup>[7-8]</sup>(Liquid Crystal Variable Retarder, LVCR)、弹光调制器<sup>[9]</sup>(Photo-Elastic Modulator, PEM)的时间调制方式、傅里叶变换强度调制<sup>[10-12]</sup>、空间调制<sup>[13]</sup>等。相对于其他的偏振调制方式,空间调制方法具有结构简单,光学器件环境适应性强,偏振测量精度较高等优点<sup>[13]</sup>。

偏振光谱测量可以获得探测目标偏振参数在光谱维上的分布,在天文观测上,对恒星提取、强辐射背景探测都能起到有效地辅助作用<sup>[14-15]</sup>。然而,大气粒子(如气溶胶,沙尘等)会对偏振光的传输起到一定的改变,在某些波长处,在特定的散射方向,对于线偏振光,Mie 散射会产生一定强度的圆偏振光<sup>[16-17]</sup>。之前的研究表明,空间调制线偏振光谱测量时,四分之一波片的延迟量误差会将测量目标的圆偏振分量调制进总光强中<sup>[18]</sup>,因此在大气和天文观测应用时,波片延迟量误差对线偏振参数的高精度测量是非常不利的。

文中基于空间调制方法,不改变原有  $qww'$ (四分之一波片-复合双折射光楔-偏振片)调制结构,在原有的双光束测量方法的基础上,提出了四光束校正法来对结构的波片延迟量误差进行校正,并利用了 MATLAB 仿真,在单色意义下对比分析了误差校正前后,目标线偏振度测量精度的变化情况。

## 1 空间调制双光束线偏振测量

参考文献[18]给出了空间调制的双光束测量示意图,如图 1 所示。入射的待测光的斯托克斯偏振矢量为  $S_i(1 \quad Q_i \quad U_i \quad V_i)^T$ ,经过波片-光楔-偏振片调制结构,由光栅色散和透镜会聚后形成二维调制图样,其中一维是光谱色散,另一维是空间调制。

双光束测量的意义在于利用调制结构中偏振片起偏角的改变,使得最终的调制光强分布发生变化,从而消除斯托克斯偏振矢量中的  $I_i$  成分。图 1 中,四分之一波片的方位角为  $0^\circ$ ,双折射复合光楔的方位

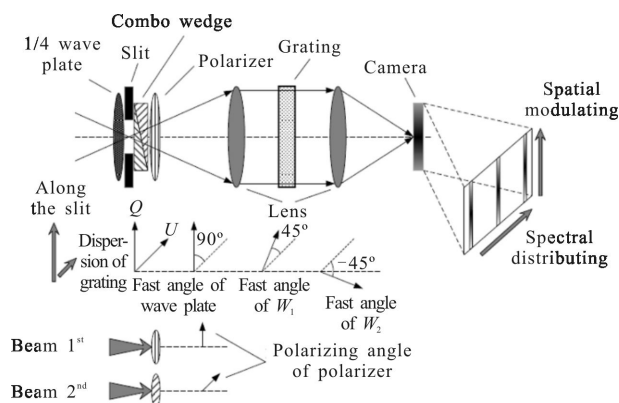


图 1 双光束空间调制偏振测量原理

Fig.1 Sketch of double-beams measurement by spatial modulation polarimetry

角分别是  $0^\circ$  和  $90^\circ$ ,当偏振片起偏角分别为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时,通过器件米勒矩阵的计算,可以得到其理想的调制光强分布分别为:

$$I_o^{0^\circ}(x) = 0.5 \cdot [I_i + Q_i \cdot \cos 2\Delta(x) + U_i \cdot \sin 2\Delta(x)]$$

$$I_o^{90^\circ}(x) = 0.5 \cdot [I_i - Q_i \cdot \cos 2\Delta(x) - U_i \cdot \sin 2\Delta(x)] \quad (1)$$

式中:  $x$  为光楔调制方向的空间位置;  $2\Delta(x)$  为双折射复合光楔在  $x$  位置处的总延迟相位。两个测量状态的结果进行简单的运算可得到:

$$\frac{I_o^{0^\circ}(x) - I_o^{90^\circ}(x)}{I_o^{0^\circ}(x) + I_o^{90^\circ}(x)} = Q_i \cdot \cos 2\Delta(x) + U_i \cdot \sin 2\Delta(x) \quad (2)$$

双光束测量可以消除一些对测量的不利因素,如狭缝照明不均匀,探测器光谱响应不一致等,使得空间调制偏振测量可以具有更强的环境适应性<sup>[13]</sup>。

## 2 波片延迟误差及校正

### 2.1 波片延迟误差

器件的参数偏差会引入调制光强成分的变化,而波片的延迟量偏差对于调制系数的影响是较为明显的<sup>[18]</sup>。以  $\delta\Delta_q$  来描述四分之一波片的延迟偏差,在一阶误差近似条件下,仅考虑波片延迟偏差带来的效应,双光束的测量结果为:

$$I_o^{0^\circ}(x) = 0.5 \cdot [I_i + Q_i \cdot \cos 2\Delta(x) + U_i \cdot \sin 2\Delta(x)] + 0.5 \cdot V_i \cdot \sin 2\Delta(x) \cdot \delta\Delta_q(x)$$

$$I_o^{90^\circ}(x) = 0.5 \cdot [I_i - Q_i \cdot \cos 2\Delta(x) - U_i \cdot \sin 2\Delta(x)] - 0.5 \cdot V_i \cdot \sin 2\Delta(x) \cdot \delta\Delta_q(x) \quad (3)$$

复合结果为:

$$I_1^r(x) = \frac{I_o^{0^\circ}(x) - I_o^{90^\circ}(x)}{I_o^{0^\circ}(x) + I_o^{90^\circ}(x)} = Q_i \cdot \cos 2\Delta(x) + [U_i + V_i \cdot \delta\Delta_q(x)] \cdot \sin 2\Delta(x) \quad (4)$$

当待测入射光含有  $V_i$  成分时, 如果忽略波片延迟误差的面型分布, 即认为  $\delta\Delta_q(x) \equiv \delta\Delta_q$ , 延迟误差将会使得斯托克斯  $U$  参量的测量值和真实值之间产生偏差  $V_i \cdot \delta\Delta_q$ 。

## 2.2 四光束校正方法

将偏振片起偏角的状态设置改变成四种, 即  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  以及  $\pm 45^\circ$ , 波片及光楔的参数保持不变, 即可实现四光束校正。偏振片起偏角的状态变化可以通过动态光路实现, 即采用偏振片旋转的方式。理论上, 动态光路破坏了偏振测量中的同时测量条件, 但是在非动态目标或者偏振状态改变缓慢的测量应用前提下, 动态光路带来的非同时测量影响是可以近似忽略的。

在一阶误差近似条件下, 仅考虑波片延迟误差的效应,  $\pm 45^\circ$  偏振片起偏角状态的调制光强可以写成:

$$\begin{aligned} I_o^{45^\circ}(x) &= 0.5 \cdot (I_i + V_i) - 0.5 \cdot U_i \cdot \sin 2\Delta(x) \cdot \delta\Delta_q \\ I_o^{-45^\circ}(x) &= 0.5 \cdot (I_i - V_i) + 0.5 \cdot U_i \cdot \sin 2\Delta(x) \cdot \delta\Delta_q \end{aligned} \quad (5)$$

其复合结果为:

$$I_2^r(x) = \frac{I_o^{45^\circ}(x) - I_o^{-45^\circ}(x)}{I_o^{45^\circ}(x) + I_o^{-45^\circ}(x)} \equiv -U_i \cdot \delta\Delta_q + V_i \quad (6)$$

从公式(4)出发, 在  $I_1^r(x)$  分布中, 如果选取满足  $\sin 2\Delta = 1$  的调制节点, 此时  $\cos 2\Delta = 0$ , 对这些调制节点的光强值求平均, 可以得到:

$$\overline{I_1^r} = U_i + \delta\Delta_q \cdot V_i \quad (7)$$

联合公式(6)、(7), 就得到了从测量结果中提取  $\delta\Delta_q \cdot V_i$  的方法:

$$\delta\Delta_q \cdot V_i = \frac{\delta\Delta_q^2 \cdot \overline{I_1^r} + \delta\Delta_q \cdot I_2^r}{1 + \delta\Delta_q^2} \quad (8)$$

只要确定了波片的延迟偏差  $\delta\Delta_q$ , 即可从四光束校正结果中提取得到  $\delta\Delta_q \cdot V_i$ , 将其代回到公式(4):

$$I_1^r(x) - \delta\Delta_q \cdot V_i \cdot \sin 2\Delta(x) = Q_i \cdot \cos 2\Delta(x) + U_i \cdot \sin 2\Delta(x) \quad (9)$$

再进行  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向的多次偏振测量, 并采用公式(9)对测量结果进行最小二乘拟合, 即可消除波片延迟量的误差影响, 得到高精度的偏振参数测量结果。

## 2.3 波片延迟偏差的标定

公式(8)给出了光强调制系数的校正方法, 然而计算的前提是需要知道四分之一波片准确的延迟偏差量  $\delta\Delta_q$ , 这实际上也是系统偏振定标过程的一个重要组成部分。延迟偏差的标定过程如下: 首先, 以完全非偏光源加线偏振片组成线偏振分量可调谐的偏振光源, 通过旋转偏振片来改变光源的线偏振方位角  $\theta_c$ , 从而获得不同的入射斯托克斯参量  $U_i(\theta_c)$ ; 然后, 在每一个入射参量条件下, 调制结构的偏振片分别以  $\pm 45^\circ$  起偏角的状态进行双光束测量, 利用公式(6)来获得不同入射参量下的光强序列  $I_2^r(\theta_c)$ , 由于采用完全线偏振光源,  $I_2^r(\theta_c)$  实际上就是  $-U_i(\theta_c) \cdot \delta\Delta_q$ ; 在最小二乘意义下可以得到:

$$\delta\Delta_q = \frac{\sum_{\theta_c} U_i(\theta_c) \cdot I_2^r(\theta_c)}{\sum_{\theta_c} U_i(\theta_c) \cdot U_i(\theta_c)} \quad (10)$$

需要注意的是, 理论上在不同的空间位置  $(x, y)$ , 所求得的  $\delta\Delta_q$  是不同的, 即分布函数  $\delta\Delta_q(x, y)$ , 这和四分之一波片的延迟量误差面形分布相关。然而实际上, 波片产生延迟量的原理是  $o, e$  光的折射率差, 对于一般精度的面形误差 (如  $N=2$ ), 其产生的延迟量面形波动相对于整体偏差来说是可以忽略的, 因此在校正的过程中, 仅用全局的平均值来描述延迟量偏差, 即认为  $\delta\Delta_q(x, y) \equiv \overline{\delta\Delta_q}$ 。用平均值来替代的另一个原因是在使用最小二乘方法时, 不可避免的会引入光强调制的影响, 从而造成标定的延迟量偏差在空间上具有一定的周期波动, 如果以面形分布来描述, 反而会造成标定的不准确。

## 3 延迟误差校正的仿真对比

### 3.1 器件参数的仿真设置

器件参数及其偏差是根据实际工艺条件以及货架产品的误差水平来设置的<sup>[10]</sup>, 见表 1。进行仿真计算时, 除了  $\delta\theta_p^c$ , 其余偏差量都取偏差上限值,  $\delta\theta_p^c$  在仿真过程中随机取  $0.05^\circ$  或  $-0.05^\circ$ ; 调制输出按照实际的光学偏振结构及传输过程, 以计入误差后各器件的米勒矩阵相乘的方式, 计算得到最终的出射斯托克斯矢量  $S_o$ , 然后取其  $I_o$  分量作为输出光强, 以验证四光束校正的正确性; 此外, 波片的延迟量误差设

定为以  $0.02\pi$  为中心值,在空间维上具有 5% 的相对随机波动。

表 1 器件参数误差的设置

Tab.1 Deviation of element setup

Element		Ideal value	Deviation
1/4 wave plate	Azimuth	$\theta_q$	$0^\circ$ $\delta\theta_q$ $\pm 0.05^\circ$
	Retardance	$\Delta_q$	$0.5\pi$ $\delta\Delta_q$ $0.02\pi$
Polarizer of modulation	Azimuth	$\theta_p$	$0^\circ$ $\delta\theta_p$ $\pm 0.05^\circ$
	Polarizability	$\eta_p$	0.022 4
1 <sup>st</sup> wedge	Azimuth	$\theta_{w1}$	$45^\circ$ $\delta\theta_{w1}$ $\pm 1^\circ$
	Retardance		$\delta\Delta_{w1}/\Delta_{w1}$ $\pm 0.001^\circ$
2 <sup>nd</sup> wedge	Azimuth	$\theta_{w2}$	$-45^\circ$ $\delta\theta_{w2}$ $\pm 0.1^\circ$
	Retardance		$\delta\Delta_{w2}/\Delta_{w2}$ $\pm 0.001^\circ$
Polarizer of calibration	Azimuth		$\pm 0.05^\circ$
	Polarizability		0.014 1

### 3.2 不同圆偏振分量下的校正效果

以表 1 所给的器件参数设置进行仿真对比,对比目标为延迟校正前后的偏振参数测量结果  $Q_i$ 、 $U_i$  以及线偏振度  $DOLP_i$ (Degree of Linear Polarization, DOLP),待测目标为部分偏振光  $S_i(1 \ 0.2 \ 0.2 \ V_i)^T$  ( $DOLP=2.284 \times 10^{-1}$ ),  $V_i$  从 0 变化至 0.2, 间隔为 0.001; 每个入射参量条件下进行仿真测量 100 次, 取测量结果的平均值。

图 2 是校正前后测量结果的对比, 纵坐标为各参数测量值与真实值的偏差, 横坐标为入射光的斯托克斯参量  $V_i$ 。从图上可以看到, 在对四分之一波片进行延迟误差标定后, 测量得到的  $Q_i$  随着  $V_i$  的增加并没有太大变化, 但是  $U_i$  及  $DOLP_i$  的测量结果却有很大的区别, 没有标定的测量结果随着  $V_i$  的增加呈线性增长, 标定后的测量结果虽也有线性增长的趋势, 但是其增长幅度却非常之小, 延迟误差标定可以使得系统的线偏振测量精度在入射斯托克斯参量含有圆偏振分量时有着显著的提高。

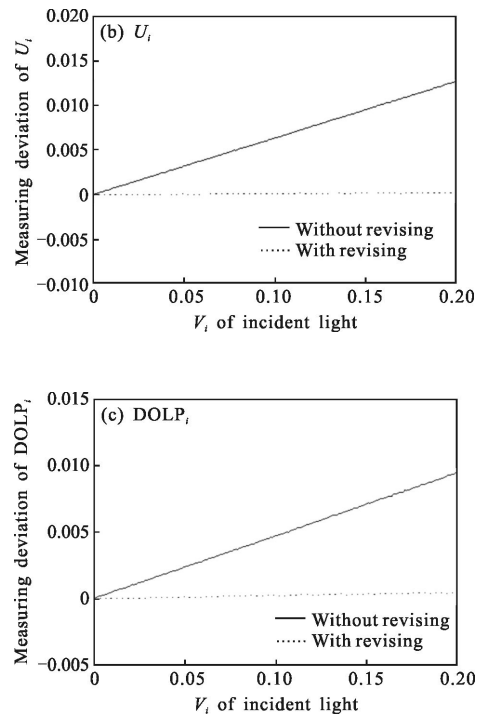
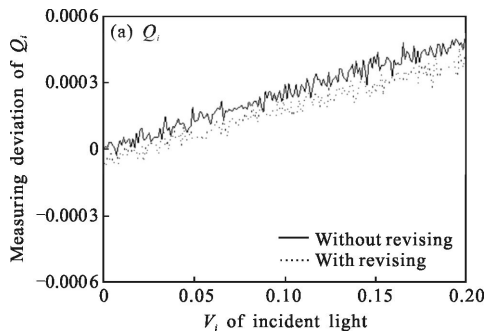


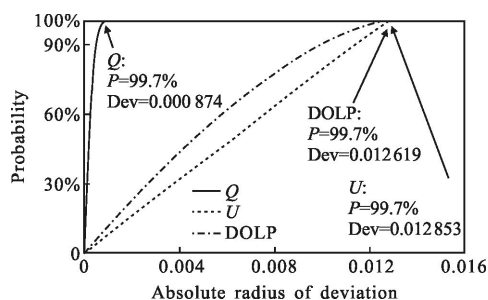
图 2 延迟校正前后测量结果对比

Fig.2 Contrast for the results between calibration with retardance and without retardance

### 3.3 偏振测量精度对比

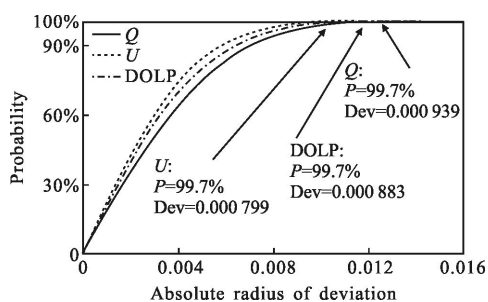
以表 1 所给的器件参数设置进行偏振参数测量精度仿真对比, 分别计算采用、不采用延迟校正时, 系统对于待测目标的斯托克斯参量  $Q_i$ 、 $U_i$  及  $DOLP_i$  的测量精度。仿真计算过程中, 入射斯托克斯参量为随机变化的, 并且满足线偏振度  $DOLP_i \in [0.1, 0.2]$ 、圆偏振度  $DOCP_i \in [0, 0.2]$ (Degree of circular polarization, DOCP), 各仿真 50 万次。偏振测量精度采用统计概率评价, 即给出 50 万次测量偏差绝对值的概率分布, 取  $3\sigma$ (概率  $P=99.7\%$ ) 统计意义下的测量偏差半径作为测量精度。

图 3 分别是两种状态下的线偏振参量测量精度概率分布曲线, 图 3(a) 为未经过延迟误差修正的, 图 3(b) 为经过延迟误差修正的。可以看到, 在同样的器件误差水平下: 线偏振度的测量精度未进行延迟校正时约为  $1.2 \times 10^{-2}$ , 校正后约为  $8.8 \times 10^{-4}$ ;  $U_i$  的测量精度未进行延迟校正时约为  $1.2 \times 10^{-2}$ , 校正后约为  $8.0 \times 10^{-4}$ ;  $Q_i$  的测量精度在校正前后并无显著变化, 线偏振度  $DOLP_i$  及参量  $U_i$  的测量精度在给定的入射条件下提高了约 14 倍。



(a) 无延迟校正

(a) Without calibration of retardance



(b) 有延迟校正

(b) With calibration of retardance

图 3 延迟校正前后偏振测量精度对比

Fig.3 Contrast for the accuracy between calibration with retardance and without retardance

## 4 结论

针对  $qww'$  空间调制型线偏振光谱测量过程,提出了一种波片延迟量偏差的校正方法,该方法采用改变调制偏振片的偏振方位角的方式来对偏振目标实现四光束校正,通过对测量数据的计算来消除调制结构中由于四分之一波片延迟量偏差带来的圆偏振调制效应,从而达到了提高系统线偏振参数测量精度的目的。仿真计算的结果表明,当入射参量圆偏振成分在  $0\sim 0.2$  随机波动时,采用延迟校正后的线偏振参数测量精度可以达到  $10^{-3}$  甚至更高的水平,相对于延迟校正前,线偏振度  $DOLP_i$  及参量  $U_i$  的测量精度提高了约 14 倍。使用延迟校正方法后,  $qww'$  空间调制结构可以在更加复杂的测量背景下获得高精度的线偏振测量结果。

## 参考文献:

[1] Gong Jieqiong, Zhan Haigang, Liu Dazhao. A review on polarization information in the remote sensing detection [J].

*Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(4): 1088-1095. (in Chinese)

弓洁琼, 詹海刚, 刘大召. 遥感遥测中偏振信息的研究进展 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(4): 1088-1095.

[2] Lv Yunfeng. Study of hyperspectral polarized reflectance of vegetation canopy at nadir viewing direction [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(4): 1028-1031. (in Chinese)

吕云峰. 基于垂直观测的植被冠层高光谱偏振反射特性研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(4): 1028-1031.

[3] Zhang Qiao, Sun Xiaobing, Li Yanan, et al. Quasi-quantitative relationship between soil moisture and polarization characteristics [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(6): 1067-1073.

[4] Zhao Yongqiang, Zhang Lei, Pan Quan. Spectropolarimetric imaging for pathological analysis of skin [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(10): D236-246.

[5] Vincenzo Greco, Fabio Cavallini. Optical design of a near-infrared imaging spectropolarimeter for the advanced technology solar telescope [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(6): 665-670.

[6] William Sparks, Thomas A G, John W M, et al. Compact and robust method for full Stokes spectropolarimetry [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5495-5511.

[7] Li Yubo, Zhang Peng, Zeng Yuxiao, et al. Remote sensing measurement by full-Stokes-vector based on opto-electronic modulator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 335-345. (in Chinese)

李宇波, 张鹏, 曾宇晓, 等. 基于电光调制器的全 Stokes 矢量的遥感测量 [J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(2): 335-345.

[8] Zhang Ying, Zhao Huijie, Cheng Xuan, et al. Design of full-polarized and multi-spectral imaging system based on LVCP [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(5): 1375-1378. (in Chinese)

张颖, 赵慧洁, 程宣, 等. 基于 LCVR 调谐的全偏振多谱段成像系统 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(5): 1375-1378.

[9] Chen Youhua, Wang Zhaoba, Wang Zhibin, et al. The research of polarized information detection for photo-elastic modulator-based imaging spectropolarimeter [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(6): 060702. (in Chinese)

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, 62(6): 060702.

[10] Wang Xinquan, Xiangli Bin, Huang Min, et al. Study and simulation of the intensity modulation fourier transform spectropolarimeter [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,

- 2011, 31(7): 1980–1984. (in Chinese)
- 王新全, 相里斌, 黄旻, 等. 强度调制-傅里叶变换光谱偏振技术研究与仿真 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1980–1984.
- [11] Zhang Rui, Wang Zhibin, Zhao Dong'e, et al. Principle and simulation of polarized spectrum measurement based on double intensity modulation [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(3): 479–484. (in Chinese)
- 张瑞, 王志斌, 赵冬娥, 等. 双强度调制偏振光谱测量原理及仿真 [J]. 应用光学, 2013, 34(3): 479–484.
- [12] Snik F, Rietjens J H H, Keller C U, et al. SPEX: the spectropolarimeter for planetary exploration [C]//SPIE, 2010, 7731: 77311B.
- [13] Sparks W, Germer T A, Mackenty J W, et al. Compact and robust method for full stokes spectropolarimetry [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22): 5495–5511.
- [14] Sun Xiaobing, Hong Jin, Luo Donggen, et al. Research on the technique of spectro-polarimetric imaging of celestial bodies and its experiment in the daytime [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(6): 499–503. (in Chinese)
- 孙晓兵, 洪津, 骆冬根, 等. 白天天体光谱偏振成像技术及实验研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(6): 499–503.
- [15] Ye Song, Fang Yonghua, Sun Xiaobing, et al. Star observation based on polarization information in daytime [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(3): 222–226. (in Chinese)
- 叶松, 方勇华, 孙晓兵, 等. 一种基于偏振信息的恒星白天观测方法 [J]. 大气与环境光学学报, 2007, 2(3): 222–226.
- [16] Zhang Qianqian, Gao Jun, Xu Xiaohong, et al. Analysis of multiple scattering polarization transmission properties [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1213001. (in Chinese)
- 张倩倩, 高隽, 徐小红, 等. 多粒子散射的偏振传输特性分析 [J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1213001.
- [17] Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, et al. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002. (in Chinese)
- 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.
- [18] Liu Qiang, Li Shuang, Gong Pin. Analysis for influence of element deviation to DOLP measured by spatial modulating spectropolarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 105–109. (in Chinese)
- 刘强, 李双, 龚平. 空间调制线偏振光谱测量的误差影响仿真分析 [J]. 光学学报, 2014, 34(7): 105–109.