

## 成像偏振仪的二次校准方法

韩子健<sup>1,2,3\*</sup>, 任德清<sup>4</sup><sup>1</sup>中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;<sup>2</sup>中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049;<sup>4</sup>加州州立大学北岭分校物理与天文学系, 洛杉矶 北岭 91330-8268

**摘要** 在成像偏振仪中引入偏振态发生器,以校准仪器,并提出了一种用于成像偏振仪的二次校准方法。偏振态发生器产生的标准偏振态经偏振仪测量后可得到偏振仪响应矩阵,从而对偏振仪潜在的误差进行一次校准。利用优化算法进一步解算偏振态发生器内四分之一波片的快轴方位角误差和线性二色性系数,从而对标准偏振态和偏振仪响应矩阵进行二次校准。在实验室内对该方法进行了测试,并计算了偏振态发生器的误差和修正后的偏振仪响应矩阵,实现了对成像偏振仪的二次校准。实验结果表明,本方法可提升成像偏振仪的测量精度。

**关键词** 成像系统; 偏振; 液晶; 图像分析

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2411001

## Double-Calibration Method of Imaging Polarimeters

Han Zijian<sup>1,2,3\*</sup>, Ren Deqing<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;*

<sup>2</sup>*CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing, Jiangsu 210042, China;*

<sup>3</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

<sup>4</sup>*Physics & Astronomy Department, California State University Northridge, Northridge, Los Angeles 91330-8268, USA*

**Abstract** This paper introduces a polarization state generator into an imaging polarimeter to calibrate the instrument and proposes a double-calibration method for the imaging polarimeter. The standard polarization states generated by the polarization state generator are measured by the polarimeter to obtain the polarimeter response matrix and thereby to calibrate the potential errors in the polarimeter for the first time. The errors of the fast-axis azimuth angle and the linear dichroism coefficient of the quarter-wave plate in the polarization state generator can then be solved with the optimization algorithm to achieve a double-calibration of the standard polarization states and the polarimeter response matrix. The method is tested in the laboratory, and the errors in the polarization state generator and the calibrated polarimeter response matrix are solved. Double-calibration of the imaging polarimeter is thus achieved. The experimental result shows that the method can improve the measurement accuracy of the imaging polarimeter.

**Key words** imaging systems; polarization; liquid crystals; image analysis

**OCIS codes** 110.5405; 260.5430; 160.3710; 110.2960

收稿日期: 2021-03-25; 修回日期: 2021-04-29; 录用日期: 2021-06-21

通信作者: \*zjhan@niaot.ac.cn

# 1 引言

偏振成像技术可在对观测目标进行成像时,同步测量得到其偏振信息。随着偏振成像测量技术的发展,其应用范围逐渐涵盖了遥感测量、显微成像、生物医学、工业监控、天文目标成像<sup>[1-6]</sup>等领域。为了达到精准的测量结果,偏振成像仪器在设计时需要同时对偏振器件的调制方案和仪器校准方案进行规划。良好的调制方案可使仪器在有限的条件下最大化偏振效率,并适当地对测量中的随机噪声进行抑制和平衡<sup>[7]</sup>。校准方案的引入可对偏振测量仪器中的各项潜在误差进行校准,并提供定量校准结果<sup>[8]</sup>。调制方案与校准方案的配合可有效提升仪器的测量精度,提升仪器的工作性能。

常用的偏振分时调制方案包括波片旋转调制方案<sup>[9-10]</sup>、分振幅型调制方案<sup>[11]</sup>、分孔径型调制方案<sup>[12]</sup>、分焦面型调制方案<sup>[13]</sup>等。其中,波片旋转调制方案的调制速度较低,机械旋转装置会引入机械误差;且偏振元件的旋转会不可避免地引入像旋现象,增加了偏振图像的后处理难度。分振幅型调制方案可同时采集多种偏振态,但仪器尺寸较大。分孔径型和分焦面型调制方案所需的仪器空间较小,但在信号采集过程中会损失空间分辨率;且装调难度较大,仪器造价过高。引入液晶调制器件可解决该问题,如铁电液晶(FLC)<sup>[14]</sup>、液晶可调相位延迟器(LCVR)<sup>[15-16]</sup>。FLC 器件的相位延迟量是固定的,施加电压后,FLC 的快轴方位角会在  $0^\circ$  和  $45^\circ$  之间变化,从而实现偏振调制。而对 LCVR 施加电压后,其相位延迟量会随电压的变化而变化,从而实现偏振调制。这类调制器件采用电光调制方式实现不

同偏振态的转换,在消除像旋现象的同时,有效避免了机械振动对成像稳定性的影响。就校准方案而言,多数仪器的设计原理大同小异,即通过校准单元产生多个标准偏振态,经仪器测量后得到对应的结果,然后经后处理得到仪器的量化数据。校准方式最早可追溯到 Azzam 等<sup>[17-19]</sup>提出的四点定标法和 Equator-Poles 定标法,但这两种方法并没有考虑校准单元中元器件的方位角误差。傅里叶分析定标法<sup>[20]</sup>虽然能弥补四点定标法和 Equator-Poles 定标法的缺陷,但也存在计算量大、定标复杂性高等缺点。

针对上述问题,本文对成像偏振仪的二次校准方法进行了研究,以提升成像偏振仪的测量精度。在成像偏振仪中引入了偏振态发生器,用于仪器的校准。偏振态发生器采用一块固定的线性偏振片与一块旋转的四分之一波片,产生 37 组标准偏振光,涵盖大部分线性偏振与圆偏振分量。成像偏振仪对标准偏振光进行测量求解,可得到偏振仪的响应矩阵,从而对成像偏振仪的潜在误差进行一次校准。然后利用优化算法解算偏振态发生器内四分之一波片的快轴方位角误差和线性二色性(LD)系数,从而对标准偏振光和偏振仪的响应矩阵进行二次校准。实验结果表明,成像偏振仪的二次校准方法可进一步提升其测量精度,从而满足偏振成像精度的需求。

## 2 成像偏振仪的基本设计

### 2.1 成像偏振仪的组成

本方法采用的偏振仪为基于两块 LCVR 的偏振仪<sup>[21]</sup>,可用于太阳磁场偏振测量,偏振仪的原理如图 1 所示。

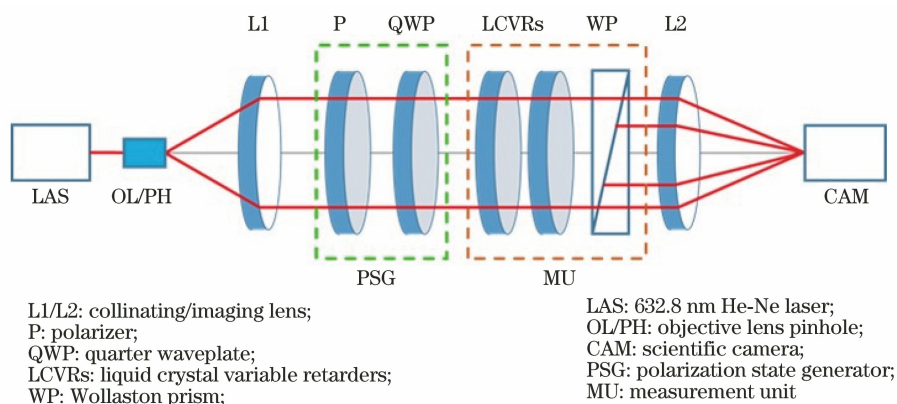


图 1 成像偏振仪的原理

Fig. 1 Schematic diagram of the imaging polarimeter

实验中,成像偏振仪选用 632.8 nm He-Ne 激光器(LAS)作为光源,激光束经过物镜与针孔组合后形成点光源。准直后的光束先进入偏振态发生器(PSG)。偏振态发生器由一块线性偏振片(P)和一块四分之一波片(QWP)组成,可对其下游所有的光学元件进行校准。偏振态发生器安装在一维平移台上,标定过程中将偏振态发生器移入光路,测量过程中将偏振态发生器移出光路,使光束进入测量单元(MU)。测量单元由两块 LCVR 和一块沃拉斯顿棱镜(WP)组成。作为电光调制器件,LCVR 的快轴

方位角是固定的,但其相位延迟量可通过施加不同的交流电压实现。因此,对两块 LCVR 施加不同的电压组合,以实现不同的调制状态,进而对入射光进行偏振调制。最后,光束经过沃拉斯顿棱镜,实现双光束差分成像,以消除 Stokes 偏振分量中  $I \rightarrow Q, U, V$  之间的串扰<sup>[22]</sup>。其中,  $I$  为偏振强度分量,  $Q, U$  为线性偏振分量,  $V$  为圆偏振分量。双光束像点均被一台科学级相机采集,采集的图像由后处理程序进行分析。成像偏振仪各器件的型号与关键指标如表 1 所示,其中,  $\lambda$  表示光的波长。

表 1 成像偏振仪各器件的型号与关键指标

Table 1 Type and key parameters of the components in the imaging polarimeter

No.	Component	Manufacturer /Type	Key parameter
1	LAS	Thorlabs HNL050R	5 mW power, random polarization
2	P	Thorlabs LPVIS100	extinction ratio > 100000:1 at 633 nm
3	QWP	Thorlabs WPQ10ME-633	retardance accuracy <math>\lambda/100</math> at 633 nm
4	LCVR	Thorlabs LCC1223-A	non-compensated, retardance accuracy <math>\lambda/50</math>
5	WP	Thorlabs WPQ10	separation angle 1° at 633 nm extinction ratio >10000:1 at 633 nm
6	step motor rotator (mounting with P/QWP)	Thorlabs K10CR1	absolute accuracy $\pm 0.014^\circ$

偏振仪入射光与出射光的 Stokes 分量  $S_{in}$  和  $S_{out}$  可表示为

$$S_{out} = M_{WP} \cdot M_{LCVR2} \cdot M_{LCVR1} \cdot S_{in}, \quad (1)$$

式中,  $M_{WP}$ 、 $M_{LCVR2}$ 、和  $M_{LCVR1}$  分别为 WP、LCVR2 和 LCVR1 的 Mueller 矩阵。假定偏振仪具有  $n$  种调制状态,分别取每种调制状态下  $M_{WP} \cdot M_{LCVR2} \cdot M_{LCVR1}$  乘积的第一行并组合,得到偏振仪的调制矩阵  $M_{n \times 4}$ 。在  $n$  种调制状态下,偏振仪接收到的光强信号组合可记作  $I_{n \times 1}$ ,光强信号与入射光 Stokes 分量  $S_{in}$  的关系可表示为

$$I = M \cdot S_{in}. \quad (2)$$

对探测器接收到的光强信号进行反解,就能得到入射光的 Stokes 分量信息。为了求解入射光的全部 Stokes 分量,即  $S_{in} = (I, Q, U, V)^T$ ,至少要对偏振仪进行 4 次调制。偏振调制方案如表 2 所示。在该调制方案下,偏振仪调制矩阵的条件数达到最优值,即条件数为  $\sqrt{3}$ 。条件数最优的情况

表 2 成像偏振仪的调制方案

Table 2 Modulation strategy of the imaging polarimeter unit: (°)

Element	Fast axis azimuth	LCVR retardance			
		Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
LCVR1	22.5	356.41	298.90	103.00	107.00
LCVR2	45.0	343.70	134.00	49.30	156.00

下,仪器对各 Stokes 分量的测量效率最大,同时能均衡测量过程中的不确定度<sup>[23]</sup>。

## 2.2 偏振态发生器的初步设计

为了消除偏振仪潜在的各项误差,在偏振仪中引入偏振态发生器,以产生若干组标准偏振态,并由测量单元进行测量。通过处理入射信号与测量信号,实现对偏振仪的量化定标,校准得到偏振仪的仪器响应矩阵  $X$ 。 $X$  可表征 Stokes 分量之间的串扰关系,即

$$X = \begin{pmatrix} I \rightarrow I & Q \rightarrow I & U \rightarrow I & V \rightarrow I \\ I \rightarrow Q & Q \rightarrow Q & U \rightarrow Q & V \rightarrow Q \\ I \rightarrow U & Q \rightarrow U & U \rightarrow U & V \rightarrow U \\ I \rightarrow V & Q \rightarrow V & U \rightarrow V & V \rightarrow V \end{pmatrix}. \quad (3)$$

对进入系统的入射光 Stokes 分量  $S_{in}$  而言,需考虑仪器响应矩阵  $X$  带来的影响,实际测量得到的 Stokes 分量  $S_{meas}$  为

$$S_{meas} = X \cdot S_{in}. \quad (4)$$

在标定过程中,偏振态发生器内线性偏振片 P 的快轴方位角固定在  $0^\circ$ , QWP 的快轴方位角从  $0^\circ$  旋转至  $180^\circ$ (步长为  $5^\circ$ )。偏振态发生器产生的已知 Stokes 分量  $S_{PSG}$  可表示为

$$S_{PSG} = M_{QWP}(\theta_i) \cdot M_P(0^\circ) \cdot (1 \ 0 \ 0 \ 0)^T, \quad (5)$$

式中,  $M_{QWP}$  和  $M_P$  分别为 QWP 与 P 的 Mueller 矩阵,括号内为其对应的快轴方位角,  $(1 \ 0 \ 0 \ 0)^T$

为入射到偏振态发生器的非偏振光,  $\theta_i = (5i)^\circ$  为 QWP 的快轴方位角, 其中,  $i=0, \dots, 36$ 。偏振态发生器可产生 37 组已知偏振态的 Stokes 分量, 即

$$\mathbf{S}_{\text{PSG}} = \frac{1}{2} (1 \quad \cos^2 \theta_i \quad \sin 2\theta_i \cos 2\theta_i \quad \sin 2\theta_i)^\top. \quad (6)$$

可以发现, 用偏振仪测量得到 37 组 Stokes 分量, 就能求得偏振仪的仪器响应矩阵  $\mathbf{X}$ 。

### 3 成像偏振仪的二次校准方法

#### 3.1 偏振态发生器的误差来源

偏振态发生器内的主要误差<sup>[24-25]</sup>来源: 1) QWP 的相位延迟量误差  $\Delta\delta$ ; 2) QWP 的快轴方位角偏差  $\theta_{\text{off}}$ ; 3) 线性二色性系数  $b$ 。在偏振仪实验光路中, QWP 选用了针对 633 nm 波长设计的四分之一波片。在 633 nm 波长下, QWP 的实验室实测相位延迟量为  $89.7^\circ$ , 误差为  $0.3^\circ$ , 给偏振态发生器带来的误差小于  $10^{-4}$  量级。因此, 在分析中可忽略相位延迟量误差  $\Delta\delta$  带来的影响, 仅对快轴方位角偏差和线性二色性系数带来的误差进行分析。

假设偏振态发生器中 QWP 的快轴方位角装调误差为  $\theta_{\text{off}}$ , 线性二色性系数为  $b$ , 相位延迟量  $\delta = \pi/2$ 。在不考虑快轴方位角时, 相位延迟片的 Mueller 矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_{\text{ret}}(b, \delta) = \begin{pmatrix} 1 & b/2 & 0 & 0 \\ b/2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \cos \delta & \alpha \sin \delta \\ 0 & 0 & -\alpha \sin \delta & \alpha \cos \delta \end{pmatrix}, \quad (7)$$

式中,  $\alpha = \sqrt{1-b^2/4}$ 。若单独考虑快轴方位角对相位延迟片矩阵的影响, 可引入偏振旋转片的 Mueller 矩阵, 即

$$\mathbf{M}_{\text{rot}}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中,  $\theta$  为快轴方位角。可以发现, 一个快轴方位角  $\theta' = \theta + \theta_{\text{off}}$ , 线性二色性系数为  $b$ , 相位延迟量为  $\delta$  的 QWP 的 Mueller 矩阵可表示为

$$\mathbf{M}_{\text{ret}}(\theta', \delta, b) = \mathbf{M}_{\text{rot}}(-2\theta') \cdot \mathbf{M}_{\text{ret}}(\delta, b) \cdot \mathbf{M}_{\text{rot}}(2\theta') = \begin{pmatrix} 1 & c_2 \cdot b/2 & s_2 \cdot b/2 & 0 \\ c_2 \cdot b/2 & c_2^2 + \alpha s_2^2 \cos \delta & c_2 s_2 (1 - \alpha \cos \delta) & -\alpha s_2 \sin \delta \\ s_2 \cdot b/2 & c_2 s_2 (1 - \alpha \cos \delta) & s_2^2 + \alpha c_2^2 \cos \delta & \alpha c_2 \sin \delta \\ 0 & \alpha s_2 \sin \delta & -\alpha c_2 \sin \delta & \alpha \cos \delta \end{pmatrix}, \quad (9)$$

式中,  $c_2 = \cos 2\theta'$ ,  $s_2 = \sin 2\theta'$ 。快轴方位角固定在  $0^\circ$  的线性偏振片的 Mueller 矩阵为

$$\mathbf{M}_{\text{P}}(0^\circ) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

结合(5)式得到此时偏振态发生器产生的标准 Stokes 分量为

$$\mathbf{S}_{\text{PSG}}(\theta', \delta, b) = \mathbf{M}_{\text{ret}}(\theta', \delta, b) \cdot (1 \quad 1 \quad 0 \quad 0)^\top, \quad (11)$$

式中,  $\theta' = \theta_i + \theta_{\text{off}} = (5i)^\circ + \theta_{\text{off}}$ ,  $\delta = \pi/2$ 。

#### 3.2 偏振仪的二次校准优化算法

为求解快轴方位角偏差  $\theta_{\text{off}}$  和线性二色性系数  $b$ , 设置的评价函数为

$$\chi^2(\theta_{\text{off}}, b) = \sum_{i=0,1,2,3} [\mathbf{S}_{\text{PSG}}^{\text{out}} - \mathbf{S}_{\text{PSG}}(\theta', \delta, b) \mathbf{X}^\top]_i^2, \quad (12)$$

式中,  $\mathbf{S}_{\text{PSG}}^{\text{out}}$  为偏振态发生器实测的 Stokes 分量。通过最优化算法可得到 QWP 的快轴方位角误差和线性二色性系数。偏振成像仪的二次校准流程如图 2 所示。修正 QWP 带来的误差后, PSG 产生的标准偏振态入射光也有所变化, 导致偏振仪的偏振响应矩阵发生变化, 从而进一步校准偏振仪的测量数据。

引入两个误差源的系数后, 偏振态发生器产生标准偏振态的 Stokes 分量可表示为

$$\mathbf{S}_{\text{PSG}}^{\text{in}'} = \mathbf{M}_{\text{ret}}(\theta_i + \theta_{\text{off}}, \delta, b) \cdot (1 \quad 1 \quad 0 \quad 0)^\top. \quad (13)$$

修正后偏振仪的响应矩阵可表示为

$$\mathbf{X}' = (\mathbf{S}_{\text{out}} \cdot \mathbf{S}_{\text{PSG}}^{\text{in}'})^\top. \quad (14)$$

用修正后的偏振响应矩阵可重新校准偏振仪的测量结果, 提高测量精度, 从而提高偏振仪测量信号串扰的计算精度。

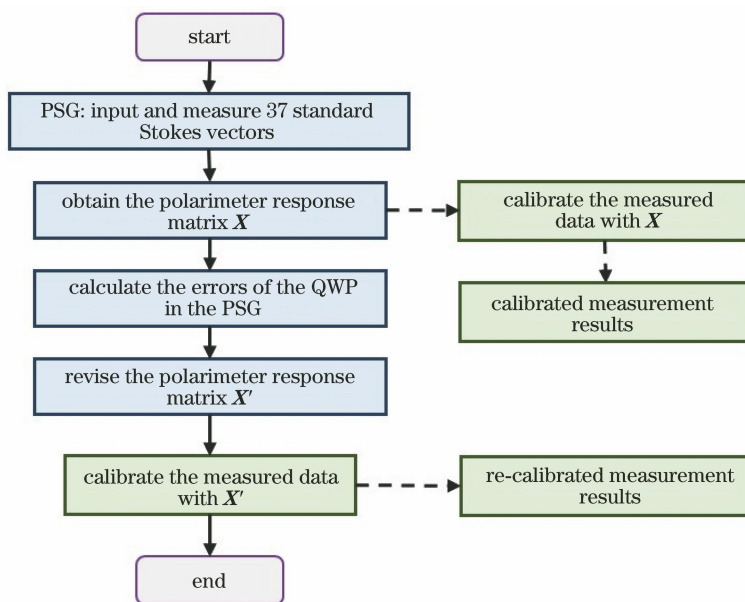


图 2 成像偏振仪的二次校准流程图

Fig. 2 Flow chart of the double-calibration process of the imaging polarimeter

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 成像偏振仪的二次校准结果与分析

首先,对偏振仪的响应矩阵进行测量。图 3 为实验的测试光路,环境温度  $T=20.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,实验设备均经过半小时预热,以达到稳定条件。将偏振态发生器移入光路内,QWP 快轴方位角从  $0^{\circ}$  旋转至  $180^{\circ}$ (步长为  $5^{\circ}$ ),偏振仪对应完成 37 组双光束光强信号采集。解算得到的偏振仪响应矩阵为

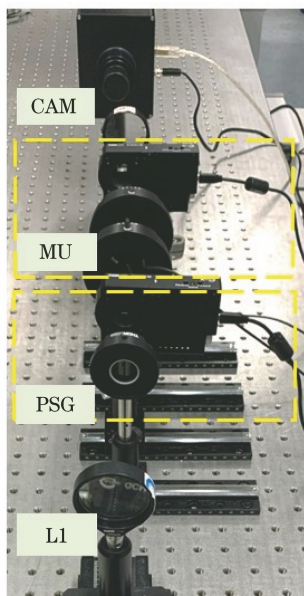


图 3 成像偏振仪实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of the imaging polarimeter

$$\mathbf{X} =$$

$$\begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.0573 & 1.0400 & -0.0479 & 0.0758 \\ -0.0109 & -0.0542 & 1.0079 & -0.1192 \\ 0.0018 & -0.0376 & -0.0277 & 0.9767 \end{pmatrix}^{\circ}$$

(15)

根据(12)式,通过最优化方法得到 QWP 的快轴方位角误差和线性二色性系数。采用线性约束条件下的最小值求解,设置的优化步数为 50。图 4 为优化过程中评价函数值随优化步数的变化情况。计算得到 QWP 的快轴方位角误差  $\theta_{\text{off}}=0.124^{\circ}$ ,线性二色性系数  $b=3.012 \times 10^{-3}$ 。可以发现,角度误差基本在设计误差允许范围内。

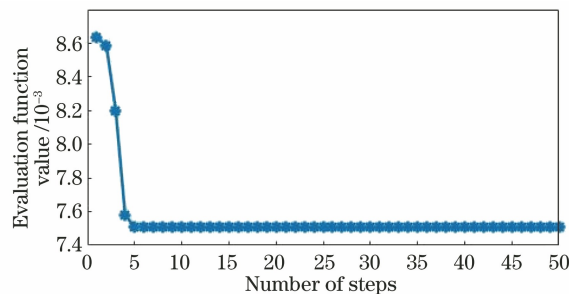


图 4 优化过程中评价函数值的变化曲线

Fig. 4 Change curve of the evaluation function value during the optimization process

将偏振态发生器的误差值代入(14)式,得到二次校准后的偏振仪响应矩阵为

$$\mathbf{X}' = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.0574 & 1.0403 & -0.0387 & 0.0759 \\ -0.0066 & -0.0629 & 1.0072 & -0.1204 \\ 0.0018 & -0.0378 & -0.0266 & 0.9768 \end{pmatrix} \quad (16)$$

图 5 为偏振仪对 37 组标准偏振态校准前后的测量值以及二次校准后的测量值。表 3 为对归一化 Stokes 分量(Q/I, U/I, V/I)二次校准前后的测量误差,测量误差用均方根误差(RMSE)进行评价。可以发现,二次优化后三个归一化 Stokes 分量的测量精度均有提升,但提升幅度有限,二次优化前后的测量精度仍处于同一量级。

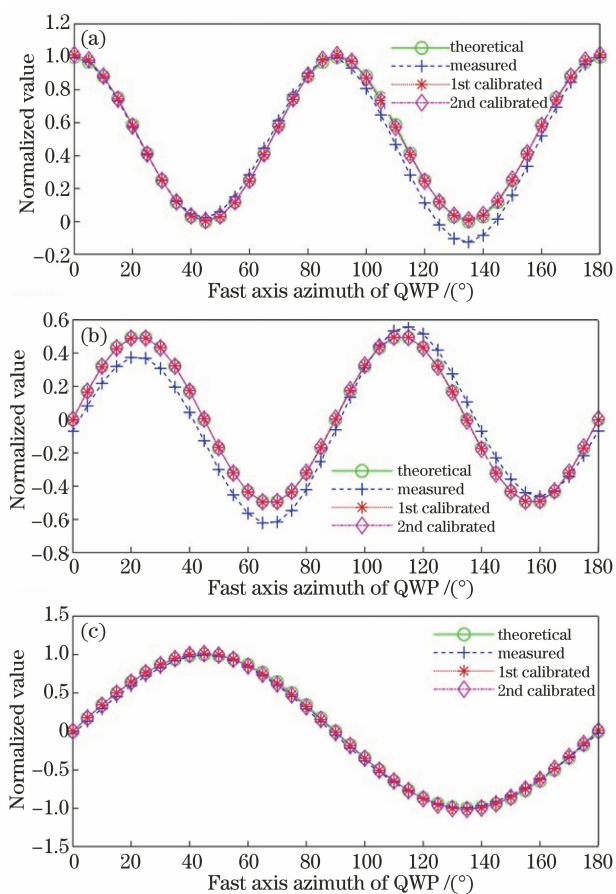


图 5 归一化 Stokes 分量的测量结果。(a) Q/I 分量;  
(b) U/I 分量;(c) V/I 分量

Fig. 5 Measurement results of the normalized Stokes components. (a) Q/I component; (b) U/I component; (c) V/I component

#### 4.2 校准结果讨论

理想情况下,偏振仪的响应矩阵  $\mathbf{X}$  应为一个 4 阶单位矩阵。在二次校准前,由(3)式和(15)式可以发现,部分 Stokes 参量间的串扰已达到  $10^{-2}$  量级,对偏振仪的测量精度造成了一定影响。二次校准能

表 3 二次校准前后归一化 Stokes 分量的测量精度  
Table 3 Measurement precisions of the normalized Stokes components before and after the double-calibration

Normalized Stokes component	RMSE	
	Before double-calibration	After double-calibration
Q/I	$2.6970 \times 10^{-3}$	$2.1814 \times 10^{-3}$
U/I	$7.5149 \times 10^{-3}$	$3.8351 \times 10^{-3}$
V/I	$6.5679 \times 10^{-3}$	$6.2961 \times 10^{-3}$

一定程度上减小这些串扰,但两次校准前后得到的响应矩阵各元素仍处于同一量级。实验过程中,仪器快轴方位角是利用一块已知方位角的线性偏振片做参考,旋转待测器件快轴并记录光强得到的。优化算法得到偏振态发生器的快轴方位角误差  $\theta_{\text{off}} = 0.124^\circ$ ,实验使用的 Thorlabs 步进电机转台绝对精度为  $\pm 0.14^\circ$ ,与优化算法得到的误差值接近,可认为达到转台精度极限。此外,由马吕斯定律得到产生的光强变化误差为  $4.7 \times 10^{-6}$  倍左右,结合现有探测器与中性密度滤光片可知,该误差已接近光强调整法能达到的极限。

从实验结果可以发现,对偏振态发生器进行二次校准后,偏振仪的测量精度有一定提升。二次校准后,偏振仪对线性偏振分量的测量精度优于  $4 \times 10^{-3}$  量级,对圆偏振分量的测量精度优于  $6.5 \times 10^{-3}$  量级,基本满足偏振测量的精度需求。

## 5 结 论

对成像偏振仪的二次校准方法进行了研究,在成像偏振仪中引入了偏振态发生器,用于仪器校准。偏振态发生器产生的标准偏振态经偏振仪测量后可得到偏振仪响应矩阵,从而对偏振仪潜在的误差进行一次校准。利用优化算法进一步解算偏振态发生器内四分之一波片的快轴方位角误差和线性二色性系数,从而对标准偏振态和偏振仪响应矩阵进行二次校准。实验结果表明,偏振态发生器内四分之一波片的快轴方位角误差为  $0.124^\circ$ ,线性二色性系数为  $3.012 \times 10^{-3}$ 。进行二次校准后,偏振仪对线性偏振分量的测量精度优于  $4 \times 10^{-3}$  量级,对圆偏振分量的测量精度优于  $6.5 \times 10^{-3}$  量级,这表明成像偏振仪的二次校准方法可提升偏振仪的测量精度,且满足成像偏振仪的精度需求。

## 参 考 文 献

[1] Ghosh N, Vitkin A I. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook[J]. Journal of

- Biomedical Optics, 2011, 16(11): 110801.
- [2] Ye K T, Xia X T, Ji'e M S. Scattering polarization characteristics of white blood cells disturbed by extracellular fluid [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(5): 051701.  
叶坤涛, 夏雪婷, 吉俄木沙. 受细胞外液扰动的白细胞散射偏振特征[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 051701.
- [3] Wang J J, Liu X Y, Zhang Y T, et al. Transmission characteristics of polarized light in aerosol [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080103.  
汪杰君, 刘小燕, 张玉婷, 等. 偏振光在气溶胶中的传输特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 080103.
- [4] Martínez Pillet V, del Toro Iniesta J C, Álvarez-Herrero A, et al. The imaging magnetograph eXperiment (IMaX) for the sunrise balloon-borne solar observatory[J]. Solar Physics, 2011, 268(1): 57-102.
- [5] Zhou M Y, Hou J F, Wang D G, et al. Design and verification of depolarized derotator alignment scheme in astronomical telescope [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604005.  
周明尧, 侯俊峰, 王东光, 等. 天文望远镜无偏消旋镜装调方案设计及验证[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604005.
- [6] Gao J N, Li L P, Cui T W, et al. Retrieval of fine mode aerosol optical depth based on satellite polarization remote sensing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(3): 030101.  
高迦南, 李丽萍, 崔廷伟, 等. 基于卫星偏振遥感的细粒子气溶胶光学厚度反演[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(3): 030101.
- [7] del Toro Iniesta J C, Collados M. Optimum modulation and demodulation matrices for solar polarimetry [J]. Applied Optics, 2000, 39(10): 1637-1642.
- [8] Ichimoto K, Lites B, Elmore D, et al. Polarization calibration of the solar optical telescope onboard hinode[J]. Solar Physics, 2008, 249(2): 233-261.
- [9] Socas-Navarro H, Elmore D, Pietarila A, et al. Spinor: visible and infrared spectro-polarimetry at the national solar observatory[J]. Solar Physics, 2006, 235(1/2): 55-73.
- [10] Hanaoka Y. Polarimeter with a high-speed rotating waveplate for the solar observation [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8446: 844670.
- [11] Farlow C A, Chenault D B, Pezzaniti J L, et al. Imaging polarimeter development and applications [J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4481: 118-125.
- [12] Pezzaniti J L, Chenault D B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5888: 58880V.
- [13] Harnett C K, Craighead H G. Liquid-crystal micropolarizer array for polarization-difference imaging [J]. Applied Optics, 2002, 41(7): 1291-1296.
- [14] Liu J, Li J X, Bai C X, et al. Theory and method of Fourier transform hyperspectral Mueller matrix imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7): 0711004.  
刘杰, 李建欣, 柏财勋, 等. 傅里叶变换高光谱 Mueller 矩阵成像理论与方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0711004.
- [15] Guo J, Ren D Q, Liu C C, et al. Design and calibration of a high-sensitivity and high-accuracy polarimeter based on liquid crystal variable retarders [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2017, 17(1): 8.
- [16] Shih W T, Hsieh M L, Chao Y F. A compact in situ ellipsometer using the liquid crystal variable retarder [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9200: 920009.
- [17] Azzam R M A, Masetti E, Elminyawi I M, et al. Construction, calibration, and testing of a four-detector photopolarimeter [J]. Review of Scientific Instruments, 1988, 59(1): 84-88.
- [18] Azzam R M A, Lopez A G. Accurate calibration of the four-detector photopolarimeter with imperfect polarizing optical elements [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1989, 6(10): 1513-1521.
- [19] Krishnan S. Calibration, properties, and applications of the division-of-amplitude photopolarimeter at 632.8 and 1523 nm [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1992, 9(9): 1615-1622.
- [20] Snik F. Calibration strategies for instrumental polarization at the  $10^{-5}$  level [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6269: 62695P.
- [21] Ren D Q, Han Z J, Guo J. A high-efficiency and high-accuracy polarimeter for solar magnetic field measurements [J]. Solar Physics, 2020, 295(8): 1-23.
- [22] Hou J F, de Wijn A G, Tomczyk S. Design and measurement of the Stokes polarimeter for the COSMO K-coronagraph [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2013, 774(1): 85.
- [23] Tyo J S. Noise equalization in Stokes parameter images obtained by use of variable-retardance polarimeters [J]. Optics Letters, 2000, 25(16): 1198-1200.
- [24] Skumanich A, Lites B W, Pillet V M, et al. The calibration of the advanced Stokes polarimeter [J]. The Astrophysical Journal Letters Supplement Series, 1997, 110(2): 357-380.
- [25] Beck C, Schmidt W, Kentischer T, et al. Polarimetric Littrow spectrograph: instrument calibration and first measurements [J]. Astronomy & Astrophysics, 2005, 437(3): 1159-1167.