

# 基于离轴三反的同时全偏振成像仪的偏振定标方法

陶菲<sup>1,2,3\*\*</sup>, 宋茂新<sup>1,2\*</sup>, 洪津<sup>1,2\*\*\*</sup>, 孙晓兵<sup>1,2</sup>, 凌明椿<sup>1,2,3</sup>, 张元贞<sup>1,2,3</sup>, 匡大鹏<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

<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>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 同时全偏振成像仪是一种基于大口径离轴三反系统的高空间分辨率偏振遥感器,它采用棱镜分振幅的同时偏振测量方法。由于仪器偏振器件多,特性复杂,导致仪器的测量矩阵偏离理想值。为保证仪器的偏振测量精度,需要进行有效的偏振定标。提出了一种利用标准线偏振光源与圆偏振光源对一种分振幅型同时偏振成像仪进行定标的方法。线偏振定标源定标仪器测量矩阵的前三列,利用最小二乘拟合傅里叶系数获得定标系数;圆偏振定标源定标仪器测量矩阵的第 4 列,采用将光源旋转 90°测量两次求平均的方法消除光源圆偏振态的非理想性。最后通过实验验证了同时全偏振成像仪的偏振测量精度,结果表明:定标后偏振测量精度优于 1%( $P \leq 0.3$ )。

**关键词** 测量; 偏振; 定标; 离轴三反; 偏振成像仪

中图分类号 V556.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0912005

## Polarization Calibration Method for Simultaneous Imaging Polarimeter Based on Off-Axis Three-Mirror

Tao Fei<sup>1,2,3\*\*</sup>, Song Maoxin<sup>1,2\*</sup>, Hong Jin<sup>1,2\*\*\*</sup>,

Sun Xiaobing<sup>1,2</sup>, Ling Mingchun<sup>1,2,3</sup>, Zhang Yuanzhen<sup>1,2,3</sup>, Kuang Dapeng<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

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

<sup>3</sup>University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** The simultaneous imaging polarimeter is a type of polarimetric remote sensors with high spatial resolution based on a large aperture off-axis three-mirror system, and the system adopts simultaneous polarimetric measurement based on the prism to divided amplitude. As the instrument has many polarizers and their characteristics are complex, the measurement matrix of instrument deviates from the ideal value. In order to ensure the polarization measurement accuracy of the instrument, we need an effective polarization calibration method. In this paper, a calibration method using the standard liner polarization light source and circular polarization light source is proposed for amplitude-divided simultaneous imaging polarimeter. The linear polarization calibration source calibrates the first three columns of the instrument measurement matrix. The calibration coefficients are obtained by the least-squares fitting Fourier coefficient. The circular polarization calibration source calibrates the fourth column of the instrument measurement matrix. To eliminate non-ideality of the circular polarization state of the light source, two measurements with light source rotated 90° are averaged. Finally, the polarization measurement accuracy of the simultaneous imaging polarimeter is verified by the test. The results show that the polarization measurement accuracy after calibration is better than 1% ( $P \leq 0.3$ ).

**Key words** measurement; polarization; calibration; off-axis three-mirror; imaging polarimeter

**OCIS codes** 120.2130; 120.5410

收稿日期: 2018-03-27; 修回日期: 2018-04-19; 录用日期: 2018-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(41405037)、中国科学院天文联合基金(U1331111)

\* E-mail: smx0369@163.com; \*\* E-mail: taofei8981@126.com; \*\*\* E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

## 1 引 言

因光学器件及膜层参数的非理想性,偏振测量仪的偏振测量矩阵会偏离理想值。此外,光学器件及膜层的偏振特性与入射光的角度相关,不同视场的偏振特性也有所差异。为了保证偏振仪器的测量精度,需要通过偏振定标对系统的测量矩阵进行修正。

偏振定标是利用偏振仪器对已知偏振态或偏振分量进行响应的过程,主要考虑并解决定标参数的确定、定标源的选定及定标算法等问题。从定标参数的角度进行分类,偏振定标主要有对器件特征参数定标<sup>[1-5]</sup>和对仪器测量矩阵定标<sup>[6-7]</sup>两类。相对于后者,对器件特征参数定标一般需要更少的定标参数,对定标源和定标算法的要求较低,但参数的确定更复杂,需要仪器各器件具有理想的偏振特性。从定标源及定标算法的角度分类,偏振定标主要可分为四点法<sup>[6]</sup>和 Equator-Poles(E-P)法<sup>[7]</sup>。根据四点法定标源的个数可以衍生出三点法及多点法<sup>[8]</sup>。一般来说,E-P法的定标源的偏振态更理想,可获取更高的定标精度,但算法和过程很复杂。总的来说,不同的偏振仪器具有其独特的偏振定标问题,对同一偏振仪器也会有不同的偏振定标方法。

同时全偏振成像仪的偏振测量及定标的独特性表现在两方面:一是仪器采用偏振分束棱镜及波片

实现同时偏振成像,偏振器件及定标参量多;二是成像物镜采用大视场、大口径的离轴三反,系统的偏振特性复杂。全偏振成像仪的偏振定标需要针对以上特征保证其偏振测量精度。

本文基于 E-P 法的定标源选择,对同时全偏振成像仪的仪器测量矩阵进行直接定标,解决了基于离轴三反的复杂偏振测量系统的偏振定标问题;最后,进行偏振精度的验证实验,结果表明:在目标线偏振度不大于 0.3 时,同时全偏振成像仪的线偏振测量精度优于 1%。

## 2 同时全偏振成像仪的偏振测量原理

同时全偏振成像仪的光学原理如图 1 所示。系统利用偏振分束棱镜组件将目标点的偏振信息分解到 4 个探测器的对应像元上,第一块分束棱镜为部分偏振分束棱镜(PPBSC),理论上可以透过 80% 的 P 偏振光和 20% 的 S 偏振光,反射 20% 的 P 偏振光和 80% 的 S 偏振光。部分偏振分束棱镜的透射光经方位角为  $22.5^\circ$  的  $1/2$  波片及线偏振分束棱镜(PBSC)后,P 偏振分量透射至 CCD1,S 分量反射至 CCD2。部分偏振分束棱镜的反射光经方位角为  $45^\circ$  的  $1/4$  波片及线偏振分束棱镜后,P 偏振分量透射至 CCD3,S 分量反射至 CCD4。偏振分束棱镜组件前为离轴三反成像物镜,中间的带通滤光片限制了测量波段。

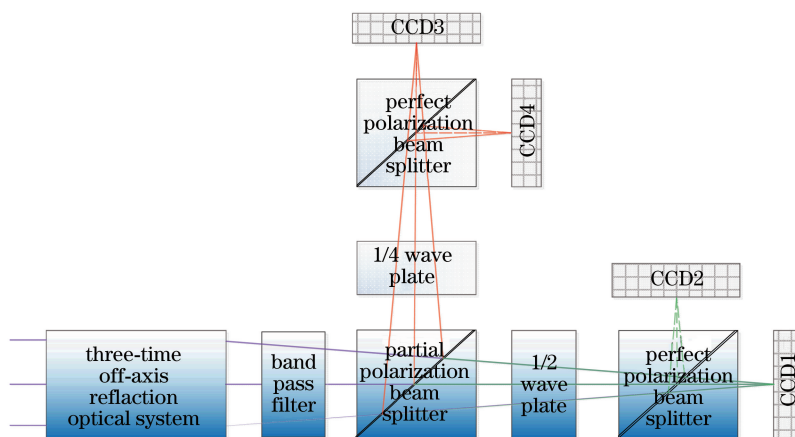


图 1 同时全偏振成像仪偏振测量原理图

Fig. 1 Schematic of polarization measurement of the simultaneous imaging polarimeter

假设所有器件具有理想的偏振特性,不考虑成像镜头的偏振效应,无视场角(FOV)及波长相关性,每条光路的 Mueller 矩阵可表示为<sup>[9-10]</sup>

$$\mathbf{M}_{\text{path1}} = \mathbf{V}_{\text{P}_{\text{trans}}} \mathbf{R}(-22.5^\circ, \lambda/2) \mathbf{V}_{\text{PP}_{\text{trans}}} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_{\text{path2}} = \mathbf{V}_{\text{P}_{\text{refl}}} \mathbf{R}(-22.5^\circ, \lambda/2) \mathbf{V}_{\text{PP}_{\text{trans}}} = \begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_{\text{path3}} = \mathbf{V}_{\text{P}_{\text{trans}}} \mathbf{R}(45^\circ, \lambda/4) \mathbf{V}_{\text{PP}_{\text{refl}}} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5 & -0.3 & 0 & 0 \\ -0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_{\text{path4}} = \mathbf{V}_{\text{P}_{\text{refl}}} \mathbf{R}(45^\circ, \lambda/4) \mathbf{V}_{\text{PP}_{\text{refl}}} = \begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0 & 0 \\ -0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.5 & -0.3 & 0 & 0 \\ -0.3 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中： $\mathbf{M}$  为各光路的系统 Mueller 矩阵，下标表示不同的通道； $\mathbf{V}_{\text{PP}_{\text{trans}}}$ 、 $\mathbf{V}_{\text{PP}_{\text{refl}}}$  分别为部分偏振分束棱镜的透射与反射 Mueller 矩阵； $\mathbf{V}_{\text{P}_{\text{trans}}}$ 、 $\mathbf{V}_{\text{P}_{\text{refl}}}$  分别为线偏振分束棱镜的透射与反射 Mueller 矩阵； $\mathbf{R}(-22.5^\circ, \lambda/2)$  为方位角为  $-22.5^\circ$  的  $1/2$  波片的 Mueller 矩阵； $\mathbf{R}(45^\circ, \lambda/4)$  为方位角为  $45^\circ$  的  $1/4$  波片的 Mueller 矩阵。

提取各光路 Mueller 矩阵的首行，组成仪器的测量矩阵：

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.15 & -0.20 & 0.00 \\ 0.25 & 0.15 & 0.20 & 0.00 \\ 0.25 & -0.15 & 0.00 & -0.20 \\ 0.25 & -0.15 & 0.00 & 0.20 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

四路 CCD 对应像元的测量光强向量可由仪器的测量矩阵右乘入射光的斯托克斯矢量获得：

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_{\text{CCD1}} \\ i_{\text{CCD2}} \\ i_{\text{CCD3}} \\ i_{\text{CCD4}} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.15 & -0.2 & 0.00 \\ 0.25 & 0.15 & 0.2 & 0.00 \\ 0.25 & -0.15 & 0.00 & -0.20 \\ 0.25 & -0.15 & 0.00 & 0.20 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中： $\mathbf{I}$  为探测器测量的光强向量； $\mathbf{S}_{\text{in}}$  为入射光的斯托克斯矢量。

入射光的斯托克斯矢量可由测量矩阵的逆（又称解调矩阵）右乘测量光强向量得到，即：

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \\ 1.67 & 1.67 & -1.67 & -1.67 \\ -2.50 & 2.50 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & -2.50 & 2.50 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\text{CCD1}} \\ i_{\text{CCD2}} \\ i_{\text{CCD3}} \\ i_{\text{CCD4}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由于加工及物理特性的限制，各器件偏振特性的非理想性会导致系统测量矩阵偏离设计值，进而需要通过偏振定标获取准确的系统解调矩阵，保证最终的偏振测量精度。

### 3 定标原理

根据测量原理，偏振定标的关键是获取系统测量矩阵，而系统测量矩阵可以通过各光学器件的 Mueller 矩阵相乘得到，也可以通过探测器测量光强向量与入射光斯托克斯矢量求解。由于该仪器的光学器件多、偏振参量多、特性复杂<sup>[11]</sup>，难以获得每

个器件的准确 Mueller 矩阵,因此,对测量矩阵直接定标是优选方法。

根据(6)式,对全偏振成像仪的测量矩阵定标需要确定 16 个参数,理论上任意输入 4 组线性无关的斯托克斯矢量即可求解。实际上,状态完全确定的偏振态只有 100%线偏振光,可通过高质量的线偏振片或偏振棱镜获得。0%偏振光常用于定标偏振仪器的零点,由于所有光源均非零偏振,所以获取困难。圆偏振光可使线偏振光通过 45°方位的 1/4 波片<sup>[12]</sup>来获得,但由于波片及方位夹角的误差<sup>[13]</sup>,100%圆偏振光并不理想,但仍是圆偏振测量矩阵定标的首选。因此,对于 4 组斯托克斯矢量,可选择三组不同方位的线偏振光与一组圆偏振光。

测量矩阵的前三列可通过线偏振光确定。将测量矩阵  $\mathbf{A}$  的列矢量写成  $\mathbf{A}_i$ ,则有:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \quad \mathbf{A}_2 \quad \mathbf{A}_3 \quad \mathbf{A}_4] \quad (8)$$

方位角为  $\theta$  的线偏振光的斯托克斯矢量为

$$\mathbf{S}_{LP}(\theta) = [1 \quad \cos 2\theta \quad \sin 2\theta \quad 0]^T \quad (9)$$

将(8)~(9)式代入(6)式可以得到探测器测量光强矢量:

$$\mathbf{I}_{LP}(\theta) = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 \cdot \cos 2\theta + \mathbf{A}_3 \cdot \sin 2\theta \quad (10)$$

根据(10)式,对  $\mathbf{I}_{LP}(\theta)$  进行傅里叶级数展开,  $\mathbf{A}_i$  恰好是其傅里叶系数,表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \mathbf{I}_{LP}(\theta) d\theta \\ \mathbf{A}_2 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \mathbf{I}_{LP}(\theta) \cdot \cos(2n \cdot \theta) d\theta, \\ \mathbf{A}_3 = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \mathbf{I}_{LP}(\theta) \cdot \sin(2n \cdot \theta) d\theta \end{cases} \quad (11)$$

使  $\theta$  在一个周期 180°内等间距变化,进行曲线拟合后可求得  $\mathbf{A}_i$ 。

第 4 列的定标可通过圆偏振光确定。右旋和左旋圆偏振光的斯托克斯矢量为

$$\begin{cases} \mathbf{S}_{RC} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \\ \mathbf{S}_{LC} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad -1]^T \end{cases} \quad (12)$$

将(8)、(12)式代入(6)式可以得到探测器测量光强矢量为

$$\begin{cases} \mathbf{I}_{RC} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_4 \\ \mathbf{I}_{LC} = \mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_4 \end{cases} \quad (13)$$

根据(13)式可得:

$$\mathbf{A}_4 = \frac{1}{2} (\mathbf{I}_{RC} - \mathbf{I}_{LC}) \quad (14)$$

由于波片及方位夹角的非理想性,实际得到的圆

偏振光是接近于圆偏振光的椭圆偏振光,如图 2 所示。

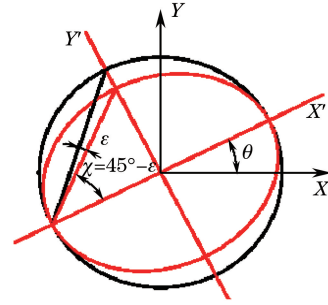


图 2 理想与实际的圆偏振光源示意图  
Fig. 2 Schematic of ideal and actual circular polarization sources

方位角为  $\theta$ 、椭偏角为  $\chi$  的椭圆偏振光的斯托克斯矢量为:

$$\mathbf{S}_{EP} = [1 \quad \cos 2\chi \cos 2\theta \quad \cos 2\chi \sin 2\theta \quad \sin 2\chi]^T \quad (15)$$

当椭圆偏振光接近右旋圆偏振光时,椭偏角接近 45°,假设偏离一个小角度  $\epsilon$ ,则  $\chi = 45^\circ - \epsilon$ ,将其代入(15)式,并做一阶近似,可得近圆椭圆偏振光为

$$\mathbf{S}_{EPNC}(\theta) = [1 \quad 2\epsilon \cdot \cos 2\theta \quad 2\epsilon \cdot \sin 2\theta \quad 1]^T \quad (16)$$

当近圆椭圆偏振光方位旋转 90°时,可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{EPNC}(\theta + 90^\circ) = \\ [1 \quad -2\epsilon \cdot \cos 2\theta \quad -2\epsilon \cdot \sin 2\theta \quad 1]^T \end{aligned} \quad (17)$$

将(16)式和(17)式代入(6)式并求和,可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{EPNC}(\theta) + \mathbf{I}_{EPNC}(\theta + 90^\circ) = \\ \mathbf{A} \cdot [\mathbf{S}_{EPNC}(\theta) + \mathbf{S}_{EPNC}(\theta + 90^\circ)] = \\ \mathbf{A} \cdot 2 [1 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T = 2\mathbf{A} \cdot \mathbf{S}_{RC} \end{aligned} \quad (18)$$

从(18)式可以看出,理想右旋圆偏振光可通过对近圆椭圆偏振光旋转 90°,两次测量求和后除以 2 得到。当椭偏角为负值时可得到左旋圆偏振光。

## 4 定标方法及结果

### 4.1 测量矩阵前三列的定标

根据定标原理,搭建如图 3 所示的定标光路,线偏振光是通过稳定积分球光源透过格兰泰勒棱镜获得的。格兰泰勒棱镜安装在高精度旋转台上,旋转台可获得不同方位角的线偏振光,使出射线偏振光照明大口径透射平行光管的焦面光阑,以满足仪器定标口径的需求。由于平行光管的  $F\#$  大,膜层偏振效应低,因而可以保证透镜的出射光仍为较理想的线偏振光。定标光源的参数如表 1 所示(光源为卤素灯)。

表 1 线偏振定标光源的参数

Table 1 Parameters of liner-polarization calibration source

Parameter	Value
Stability of light source	0.1%
Extinction ratio of Glan-Taylor prism	Better than $10^5:1$
Degeneracy degree of the collimator	Less than 0.1%
Accuracy of the rotator /( $^{\circ}$ )	0.005

定标时,调整光源亮度,保证各路探测器的像元

亮度(DN 值)处于仪器的动态范围内,格兰泰勒棱镜每旋转  $10^{\circ}$ 进行一次测量,在  $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 一个周期内共测量 19 个数据点,每个方位角下多次采集并取平均值,以提高信噪比。将同一目标对应的 4 个探测器的 DN 值进行归一化得到光强向量,将 19 组数据进行最小二乘拟合(结果如图 4 所示,拟合精度优于 0.99),根据(11)式得到测量矩阵的前三列。在不同视场执行相同的定标步骤, $0^{\circ}$ 视场的定标结果如表 2 所示。

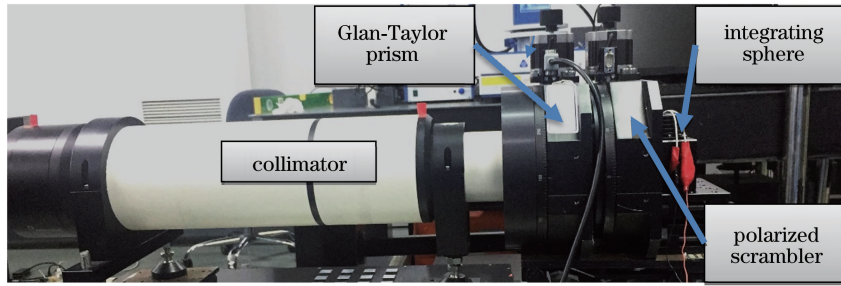


图 3 同时全偏振成像仪定标实验现场布置图

Fig. 3 Calibration experiment site layout of simultaneous imaging polarimeter

表 2 线偏振的定标结果

Table 2 Result of liner-polarization calibration

$A_1$		$A_2$		$A_3$	
$a_{11}$	0.2486	$a_{12}$	0.1461	$a_{13}$	-0.1862
$a_{21}$	0.2268	$a_{22}$	0.1379	$a_{23}$	0.1648
$a_{31}$	0.2677	$a_{32}$	-0.1556	$a_{33}$	0.0293
$a_{41}$	0.2568	$a_{42}$	-0.1526	$a_{43}$	-0.0132

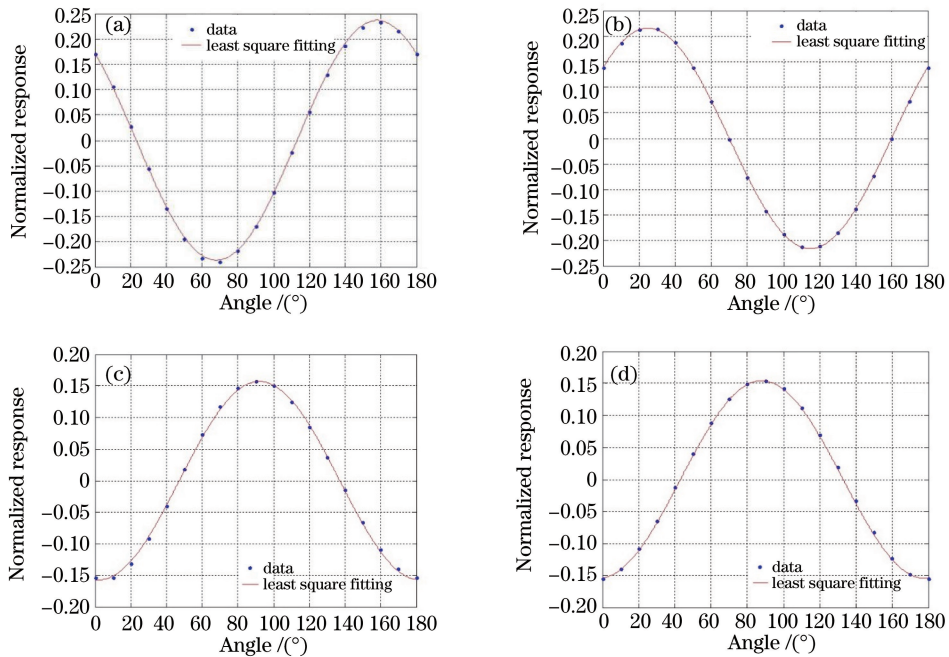


图 4 线偏振定标系数拟合曲线。(a) CCD1;(b) CCD2;(c) CCD3;(d) CCD4

Fig. 4 Plots of liner polarized calibration coefficients fitting. (a) CCD1; (b) CCD2; (c) CCD3; (d) CCD4

### 4.2 测量矩阵第 4 列的定标

第 4 列系数的定标光路与前三列相同,如图 3 所示,区别在于在线偏振光后增加了 1/4 波片,波片放置在独立的高精度旋转台上。旋转格兰泰勒棱镜和波片旋转台可以获得所需的圆偏振光。消色差 1/4 波片的延迟精度优于  $\lambda/80$ 。

定标时,先固定格兰泰勒棱镜的方位,旋转 1/4 波片使之与线偏振光方位角约为  $45^\circ$ ,测得数据 1;将格兰泰勒棱镜与 1/4 波片同时旋转  $90^\circ$ ,测得数据 2;固定格兰泰勒棱镜,将 1/4 波片旋转  $90^\circ$ ,测得数据 3;再将格兰泰勒棱镜与 1/4 波片同时旋转  $90^\circ$ ,测得数据 4。将 4 次测量的数据归一化后分别代入(18)式,得到消除非理想性后的右旋和左旋圆偏振输出,再代入(14)式得到圆偏振定标结果。在不同视场下执行相同的定标步骤, $0^\circ$ 视场的定标结果如表 3 所示。

表 3 圆偏振定标结果

Table 3 Results of circle polarization calibration

Coefficient	$a_{14}$	$a_{24}$	$a_{34}$	$a_{44}$
Value	-0.0676	0.0419	0.1919	-0.1663

根据同样的方法和步骤,得到同时全偏振成像仪三个视场的系统测量矩阵,如表 4 所示。

表 4 全偏振成像仪三个视场的系统测量矩阵

Table 4 Systematic measurement matrix for three fields of view of imaging polarimeter

FOV /( $^\circ$ )	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
0	0.2486	0.1461	-0.1862	-0.0676
	0.2268	0.1379	0.1648	0.0419
	0.2677	-0.1556	0.0293	0.1919
	0.2568	-0.1526	-0.0132	-0.1663
3	0.2249	0.1411	-0.1713	-0.0890
	0.2118	0.1397	0.1574	0.0233
	0.2921	-0.1553	0.0396	0.2264
4.25	0.2713	-0.1489	-0.0232	-0.1608
	0.2192	0.1390	-0.1652	-0.0965
	0.2063	0.1404	0.1543	0.0191
	0.2956	-0.1551	0.0440	0.2343
	0.279	-0.1474	-0.0274	-0.1569

## 5 定标精度验证及讨论

为了验证定标效果,利用可调偏振度光源对测量矩阵的定标精度进行了验证。可调偏振度光源由两块精密控角的玻璃平板组成,光在两介质界面反射和折射时重新分配能量,当非偏振光入射时,根据玻璃平板与光线的倾斜角度,可根据菲涅耳定律求出出射光的线偏振度<sup>[14]</sup>,绕光轴转动玻璃平板可以

改变输出偏振方位角。可调偏振度光源出射标准偏振度的计算公式为

$$P_0 = \frac{A \times \cos(2\alpha)^2 + B \times \cos(2\alpha) + C}{D \times \cos(2\alpha)^2 + E \times \cos(2\alpha) + F}, \quad (19)$$

式中: $A = -n^8 + 2n^4 - 1$ ;  $B = -2n^8 + 4n^6 - 4n^2 + 2$ ;  $C = 3n^8 - 4n^6 - 2n^4 + 4n^2 - 1$ ;  $D = -A + 8n^4$ ;  $E = -B + 16n^6$ ;  $F = -C + 8n^8$ ;  $\alpha$  为玻璃平板的倾斜角度; $n$  为玻璃折射率。

同时全偏振成像仪的测量偏振度为

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I}. \quad (20)$$

由于玻璃折射率的限制,可调偏振度光源的最大偏振度可达到  $0.3@500 \text{ nm}$ 。验证时,将可调偏振度光源玻璃平板与仪器视轴的角度调整为 7 个不同的角度,倾斜角度及对应偏振度如表 5 所示。在每个角度下进行多次测量,根据(11)、(20)式得到线偏振度测量结果,如表 5 所示,表中最后一列为测量值与理论值的差,可以看出:经定标后,线偏振测量精度优于  $1\%$  ( $P \leq 0.3$ )。

表 5 同时全偏振成像仪偏振测量精度验证结果

Table 5 Validation results of polarization measurement accuracy of simultaneous imaging polarimeter

FOV /( $^\circ$ )	Glass angle /( $^\circ$ )	$P$	$P_0$	$P - P_0$
0	0	0.0053	0	0.0053
	28	0.0550	0.0506	0.0044
	38	0.1050	0.1008	0.0042
	45	0.1557	0.1511	0.0045
	51	0.2115	0.2066	0.0050
	55	0.2544	0.2505	0.0039
3	59	0.3050	0.2999	0.0051
	0	0.0018	0	0.0018
	28	0.0525	0.0506	0.0020
	38	0.0978	0.1008	-0.0030
	45	0.1472	0.1511	-0.0040
	51	0.2099	0.2066	0.0034
4.25	55	0.2542	0.2505	0.0037
	59	0.3048	0.2999	0.0049
	0	0.0100	0	0.0100
	28	0.0419	0.0506	-0.0086
	38	0.0919	0.1008	-0.0089
	45	0.1431	0.1511	-0.0081
4.25	51	0.1987	0.2066	-0.0078
	55	0.2439	0.2505	-0.0066
	59	0.2947	0.2999	-0.0052

为了验证圆偏振测量精度,采用直接测量圆偏振定标光源的方法(因为缺少准确的椭圆偏振光

源)。同时全偏振成像仪对标准圆偏振光源成像后,可以解算得到圆偏振度测量精度(DOCP)优于0.6%,结果如表6所示。

表6 同时全偏振成像仪圆偏振测量精度的验证结果

Table 6 Validation results of circular-polarization measurement accuracy of simultaneous imaging polarimeter

DCOP	Standard	Accuracy
0.9947	1	0.0053

## 6 结 论

本研究提出了一种适用于复杂全斯托克斯矢量同时偏振成像仪的偏振定标方法,该方法可以直接对仪器测量矩阵进行定标,避免了对单个偏振器件参数的定标,具有操作简单、结果可靠的优点。定标源选用线偏振及圆偏振两种光源,经过透射平行光管扩束后满足了大口径的要求。线偏振光源定标时采用最小二乘拟合法,提高了定标精度。采用旋转90°测量两次求平均的方法消除了圆偏振光源的非理想性。

最后,为对定标后仪器的测量精度进行验证,使用可调偏振度光源对线偏振测量精度进行比对,结果表明:线偏振测量精度优于1%( $P \leq 0.3$ ),使用圆偏振光验证得到的圆偏振测量精度优于0.6%。

值得一提的是,本研究针对的光学系统是一个离轴三反系统,虽然该系统的光路对偏振信息较透射式或共轴系统的影响大,且复杂得多,但对于“对仪器测量矩阵直接定标”来说,其定标原理与方法对于其他任意偏振测量系统也同样适用。

## 参 考 文 献

- [1] Song M X, Sun B, Sun X B, *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.
- [2] Andre Y, Laherrere J M, Bret-Dibat T, *et al.* Instrumental concept and performances of the POLDER instrument [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2572: 79-91.
- [3] Bret-Dibat T, Andre Y, Laherrère J M. Preflight calibration of the POLDER instrument [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2553: 218-231.
- [4] Chen L G. Study of laboratory calibration of the airborne polarization CCD camera with wide field of view[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2008.  
陈立刚. 宽视场航空偏振成像仪的实验室定标研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2008.
- [5] Tao F, Hong J, Song M X, *et al.* Geometric calibration data processing and software design of directional polarization camera [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(9): 091005.  
陶菲, 洪津, 宋茂新, 等. 偏振成像仪几何定标数据处理及软件设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(9): 091005.
- [6] Azzam R M A, Masetti E, Elminyaw I M, *et al.* Construction, calibration, and testing of a four-detector photopolarimeter [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1988, 59(1): 84-88.
- [7] 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.
- [8] Wang Y H, Zheng C L, Zhao Z T. Multi-point calibration method based on Stokes ellipsometry system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(11): 1108013.  
王勇辉, 郑春龙, 赵振堂. 基于斯托克斯椭圆偏振测量系统的多点定标法[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108013.
- [9] Liao Y B. Polarization of optics[M]. Beijing: Science Press, 2003.  
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [10] Goldstein D H. Polarized light [M]. New York: CRC Press, 2003.
- [11] Liu X L, Zhang X D, Xu H Y, *et al.* Machining error analysis of freeform surface off-axis three-mirror system based on optical performance evaluation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0812005.  
刘现磊, 张效栋, 徐航宇, 等. 基于光学性能评价自由曲面离轴三反系统加工误差分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0812005.
- [12] Yuan K H, Deng J X, Liu C, *et al.* A fast and simultaneous method for measuring wave plate phase retardation and fast axis azimuth [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021202.  
袁凯华, 邓剑勋, 刘超, 等. 一种快速同时测量波片相位延迟量和快轴方位角的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021202.
- [13] Zhang X B, Li Y Q, Zheng M, *et al.* Calibration and error compensation of an imaging Stokes polarimeter based on rotating quarter-wave plate method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(7): 0708007.  
张雪冰, 李艳秋, 郑猛, 等. 旋转波片法成像斯托克

斯偏振仪误差标定和补偿[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0708007.

- [14] Kang Q, Li J J, Chen L G, *et al.* Test and uncertainty analysis of reference source with variable polarization degree and large dynamic range[J]. Acta

Optica Sinica, 2015, 35(4): 0412003.

康晴, 李健军, 陈立刚, 等. 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[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0412003.