

旋转波片法成像斯托克斯偏振仪误差标定和补偿

张雪冰 李艳秋 郑 猛 李建慧

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 旋转波片法成像斯托克斯偏振仪由可旋转的1/4波片、固定的检偏器、成像光学器件和光电探测器构成,1/4波片的快轴方位角误差和相位延迟量误差是旋转波片法成像斯托克斯偏振仪的主要误差源,对其进行误差标定和补偿,可有效提高测量精度。为此,通过研究旋转波片测量法和傅里叶分析法,推导出入射光束斯托克斯参量与1/4波片参数误差之间的关系式,从而提出一种误差标定新方法,该方法以水平线偏振光作为标准参考光,对标准参考光进行测量,计算得到1/4波片的参数误差,并将其代入相应理论公式中,从而实现误差补偿。实验结果表明,通过误差标定和补偿,成像斯托克斯偏振仪的平均测量精度由原来的5.12%提高至1.78%,验证了该方法的有效性。

关键词 测量; 偏振检测; 标定; 斯托克斯参量; 旋转1/4波片法

中图分类号 O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0708007

Calibration and Error Compensation of an Imaging Stokes Polarimeter Based on Rotating Quarter-Wave Plate Method

Zhang Xuebing Li Yanqiu Zheng Meng Li Jianhui

Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract An imaging Stokes polarimeter based on rotating quarter-wave plate method is comprised of a rotating quarter-wave plate, a fixed polarizer, imaging optics and a photodetector. The fast-axis angle error and the retardation error of the quarter-wave plate are the main error sources of the imaging Stokes polarimeter based on rotating quarter-wave plate method. The measurement accuracy can be efficiently improved with the calibration and error compensation. For this purpose, the relations between the Stokes parameters of the incident polarized light and the two parameter errors of the quarter-wave plate are derived by investigating the rotating quarter-wave plate method and Fourier analysis method and therefore, a new calibration method is proposed. Horizontally polarized light is used as a standard reference light and measured to calculate the two parameter errors of the quarter-wave plate and then complete the error compensation by substituting them into the corresponding formula. The experimental results show that the average measurement accuracy is improved from 5.12% to 1.78%, which indicates that the proposed calibration and error compensation method is valid and effective.

Key words measurement; polarization measurement; calibration; Stokes parameters; rotating quarter-wave plate method

OCIS codes 120.2130; 120.5410; 260.5430

1 引 言

斯托克斯参量是光束偏振态的一种表征方法。成像斯托克斯偏振仪可以准确测量入射光束或被测场景的偏振态分布,已广泛应用于高分辨光刻^[1]、生物医学^[2]和远程遥感^[3-4]等领域。在光刻系统中,基于光调制法的偏振检测技术应用最为广泛,可准确测量照明光束和成像光束的偏振态分布以及投影物镜的偏振像

收稿日期: 2015-01-21; 收到修改稿日期: 2015-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(60938003)、国家科技重大专项(2012ZX02701001-005)、北京高等学校青年英才计划

作者简介: 张雪冰(1991—),男,硕士研究生,主要从事偏振检测技术方面的研究。E-mail: 2120130594@bit.edu.cn

导师简介: 李艳秋(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事高分辨成像及先进光刻技术、传感与微系统技术、微纳检测技术及精密光学仪器等方面的研究。E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn(通信联系人)

差^[5-8]。旋转波片法是基于光调制法测量入射光束斯托克斯参量的一种测量方法^[9],采用旋转波片法的成像斯托克斯偏振仪通常由可旋转的1/4波片、固定的检偏器、成像光学器件和光电探测器构成,1/4波片的快轴方位角误差和相位延迟量误差是影响旋转波片法成像斯托克斯偏振仪测量精度的主要因素^[10-12]。因此,需要对成像斯托克斯偏振仪进行误差标定和补偿,以提高其测量精度。

目前,常用的斯托克斯偏振仪标定方法有四点标定法^[13-14]和Equator-poles标定法^[15-16]。上述方法均需要利用偏振态产生器产生不少于4种线性无关的标准参考光,并且需要对每种参考偏振光进行至少4次测量,标定过程复杂。本文通过研究旋转波片测量法和傅里叶分析法^[17],推导出入射光束斯托克斯参量与1/4波片快轴方位角误差和相位延迟量误差之间的关系式。在此基础上,提出一种误差标定新方法,该方法利用水平线偏振光标定出1/4波片的两项参数误差,进而实现对成像斯托克斯偏振仪的误差补偿。

2 基本原理

2.1 旋转波片测量法

图1是基于旋转波片法的成像斯托克斯偏振仪示意图,主要由可旋转的1/4波片、固定的检偏器、成像光学器件和CCD构成,测量对象可以是偏振照明光源,也可以是自然场景。入射光束经可旋转的1/4波片和固定的检偏器,由成像光学器件成像在CCD光敏面上,并由CCD获得图像。

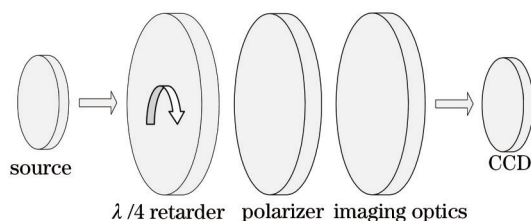


图1 基于旋转波片法的成像斯托克斯偏振仪

Fig.1 Schematic of an imaging Stokes polarimeter based on rotating quarter-wave plate method

在成像斯托克斯偏振仪测量过程中,可旋转的1/4波片用来调制入射光束的光强,则CCD探测到的光强信号 I 用傅里叶级数表示为^[18]

$$I(\theta) = \frac{a_0}{2} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^2 (a_{2n} \cos 2n\theta + b_{2n} \sin 2n\theta), \quad (1)$$

式中 θ 为1/4波片快轴相对于检偏器透光轴的旋转方位角。当检偏器的透光轴固定在水平方向时,基于穆勒矩阵运算和傅里叶分析,可得到入射光束斯托克斯参量 $S = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ (T表示矩阵转置)的各项分量为

$$\begin{aligned} S_0 &= a_0 - a_4, \\ S_1 &= 2a_4, \\ S_2 &= 2b_4, \\ S_3 &= -b_2, \end{aligned} \quad (2)$$

式中等号右端各参量均为傅里叶系数。以上推导过程没有考虑成像斯托克斯偏振仪中任何偏振器件的参数误差,然而,实际上并不存在理想的偏振器件。因此,必须要考虑成像斯托克斯偏振仪中偏振器件的参数误差,并通过误差标定求出各项参数误差的大小,进而实现误差补偿。

在成像斯托克斯偏振仪的实际装调中,将固定的检偏器透光轴方位角作为系统的水平参考轴,并以该水平参考轴来确定1/4波片的快轴方位角,此时,就只需要考虑1/4波片的快轴相对于水平参考轴的方位角误差及其相位延迟量误差。

2.2 误差标定和补偿原理

假设1/4波片的快轴方位角误差为 ε_1 , 相位延迟量误差为 ε_2 , 则在任意旋转方位角 θ 时,1/4波片的穆勒矩阵为

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta' + \sin^2 2\theta' \cos \delta & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta' \cos 2\theta' & -\sin 2\theta' \sin \delta \\ 0 & (1 - \cos \delta) \sin 2\theta' \cos 2\theta' & \sin^2 2\theta' + \cos^2 2\theta' \cos \delta & \cos 2\theta' \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta' \sin \delta & -\cos 2\theta' \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中

$$\begin{aligned} \theta' &= \theta + \varepsilon_1, \\ \delta &= \frac{\pi}{2} + \varepsilon_2. \end{aligned} \quad (4)$$

由于检偏器的透光轴方位角作为系统的水平参考轴,则其穆勒矩阵为

$$\mathbf{M}_P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

假设成像光学器件不影响光束的偏振态,则根据穆勒矩阵理论,可得到出射光束的斯托克斯参量 S' 为

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_P \cdot \mathbf{M}_R \cdot \mathbf{S}. \quad (6)$$

将(3)式和(5)式代入(6)式中,进行矩阵运算,则可得到出射光束的斯托克斯参量 S' 。由于 CCD 只能获得光的强度信息,且斯托克斯参量的第一个分量表示偏振光的总光强,则 CCD 探测得到的光强即为出射光束斯托克斯参量 S' 的第一个分量 S'_0 , 并采用小角度近似,即 $\sin x \approx x$, $\cos x \approx 1$, 则光强表达式为

$$\begin{aligned} I(\theta) = \frac{1}{2} \left[S_0 + \frac{1}{2}(1 - \varepsilon_2) \cdot S_1 + \frac{1}{2}(1 + \varepsilon_2) \cos 4\varepsilon_1 \cos 4\theta \cdot S_1 - 2\varepsilon_1(1 + \varepsilon_2) \cos 2\varepsilon_1 \sin 4\theta \cdot S_1 + \frac{1}{2}(1 + \varepsilon_2) \cos 4\varepsilon_1 \sin 4\theta \cdot S_2 + \right. \\ \left. 2\varepsilon_1(1 + \varepsilon_2) \cos 2\varepsilon_1 \cos 4\theta \cdot S_2 - \cos 2\varepsilon_1 \sin 2\theta \cdot S_3 - 2\varepsilon_1 \cos 2\theta \cdot S_3 \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

由(1)式和(7)式相比较,可求得与入射光束斯托克斯参量及 1/4 波片两项参数误差相关的各项傅里叶系数为

$$\begin{aligned} a_0 &= S_0 + \frac{1}{2}(1 - \varepsilon_2) \cdot S_1, \\ a_2 &= -2\varepsilon_1 \cdot S_3, \\ a_4 &= \frac{1}{2}(1 + \varepsilon_2) \cos 4\varepsilon_1 \cdot S_1 + 2\varepsilon_1(1 + \varepsilon_2) \cos 2\varepsilon_1 \cdot S_2, \\ b_2 &= -\cos 2\varepsilon_1 \cdot S_3, \\ b_4 &= \frac{1}{2}(1 + \varepsilon_2) \cos 4\varepsilon_1 \cdot S_2 - 2\varepsilon_1(1 + \varepsilon_2) \cos 2\varepsilon_1 \cdot S_1. \end{aligned} \quad (8)$$

根据(8)式可求得入射光束的斯托克斯参量的各分量为

$$\begin{aligned} S_0 &= a_0 - \gamma \cdot S_1, \\ S_1 &= \frac{\alpha a_4 - \beta b_4}{\alpha^2 + \beta^2}, \\ S_2 &= \frac{\alpha b_4 + \beta a_4}{\alpha^2 + \beta^2}, \\ S_3 &= -\frac{b_2}{\cos 2\varepsilon_1}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2}(1 + \varepsilon_2) \cos 4\varepsilon_1, \\ \beta &= 2\varepsilon_1(1 + \varepsilon_2) \cos 2\varepsilon_1, \\ \gamma &= \frac{1}{2}(1 - \varepsilon_2). \end{aligned} \quad (10)$$

由此,得到了入射光束斯托克斯参量与 1/4 波片快轴方位角误差和相位延迟量误差之间的关系式。当且仅当 1/4 波片的两项参数误差均为零时,可由(9)式化简得到(2)式。

当采用水平线偏振光作为标准参考光时,即以水平线偏振光作为测量对象,利用成像斯托克斯偏振仪对其进行测量,并对 CCD 获得的光强进行傅里叶分析,得到各项傅里叶系数。由于水平线偏振光的斯托克斯参量为 $[1, 1, 0, 0]^T$, 将其代入(8)式中,计算可得

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 1 + \frac{1}{2}(1 - \varepsilon_2), \\
 a_2 &= 0, \\
 a_4 &= \frac{1}{2}(1 + \varepsilon_2)\cos 4\varepsilon_1, \\
 b_2 &= 0, \\
 b_4 &= -2\varepsilon_1(1 + \varepsilon_2)\cos 2\varepsilon_1.
 \end{aligned} \tag{11}$$

为了保证解的唯一性,同时又为了尽可能降低小角度近似对1/4波片参数误差标定结果产生的影响,仅令 $\cos 2\varepsilon_1 \approx 1$,则由(11)式可求得1/4波片的两项参数误差分别为

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_1 &= -\frac{b_4}{4(2 - a_0)}, \\
 \varepsilon_2 &= 3 - 2a_0.
 \end{aligned} \tag{12}$$

因此,以水平线偏振光作为标准参考光,采用旋转波片法对其进行测量,并对测量得到的光强进行傅里叶分析,得到相应的傅里叶系数,通过(12)式计算得到1/4波片的快轴方位角误差和相位延迟量误差,并将其代入(9)式中,从而实现对成像斯托克斯偏振仪的误差补偿,提高其测量精度。

3 模拟计算与分析

为了分析本文方法的标定精度,利用 Matlab 软件对该方法进行了模拟计算,具体流程概括如下: 1) 设定1/4波片的快轴方位角误差 ε_1 和相位延迟量误差 ε_2 ; 2) 采用水平线偏振光作为标准参考光,根据步骤1)假设的两项参数误差计算出1/4波片的穆勒矩阵,并由(6)式计算出射光束的斯托克斯参量,即可获得出射光束的光强; 3) 对步骤2)获得的光强进行傅里叶分析,得到各项傅里叶系数,由(12)式计算出1/4波片的两项参数误差,并与假设值进行对比,计算参数误差的标定精度; 4) 分别由(2)式和(9)式计算误差补偿前后水平线偏振光的斯托克斯参量及测量精度,并比较误差补偿前后的测量精度。

图2是1/4波片参数误差标定的模拟计算结果。其中,图2(a)给出了快轴方位角误差 ε_1 的模拟计算值与假设值之间的相对误差分布,图2(b)给出了相位延迟量误差 ε_2 的模拟计算值与假设值之间的相对误差分布。从图中可以看出,随着1/4波片参数误差的增加,模拟计算得到的相对误差也随之增加。

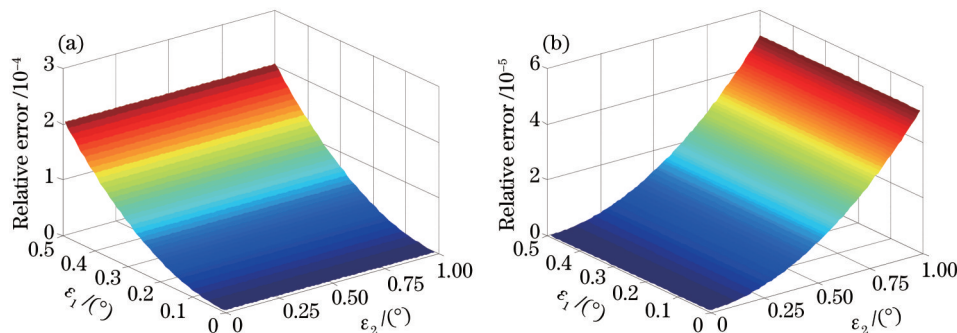


图2 误差标定模拟计算结果。(a) 快轴方位角误差的相对误差分布;(b) 相位延迟量误差的相对误差分布

Fig.2 Simulation results of error calibration. (a) Relative error distribution of fast-axis angle error; (b) relative error distribution of retardation error

在1/4波片快轴方位角误差为 0.5° 和相位延迟量误差为 1.0° 的条件下,对水平线偏振光的模拟测量结果如表1所示。误差补偿前,模拟计算得到的归一化斯托克斯参量 S_1 、 S_2 、 S_3 与理论值的偏差分别为 3.46% 、 -3.61% 、 -1.13×10^{-16} ,总均方根偏差 ΔS 为 5.00% ,偏振度(DOP)误差为 3.52% ;误差补偿后,模拟计算得到的归一化斯托克斯参量与理论值几乎完全一致,总均方根偏差 ΔS 为 5.32×10^{-6} ,偏振度误差为 -9.22×10^{-8} 。从表1中还可以看出,在仅考虑1/4波片的快轴方位角误差和相位延迟量误差时,水平线偏振光的斯托克斯参量 S_3 不会出现测量误差。模拟测量结果表明,通过误差标定和补偿,斯托克斯偏振仪的测量精度得到显著提高。

表 1 误差补偿前后模拟测量结果

Table 1 Simulation results before and after error compensation

	Before error compensation		After error compensation	
	Value	Error	Value	Error
S_1	1.0346	3.46%	1.0000	-9.22×10^{-8}
S_2	-0.0361	-3.61%	0.0000	-5.32×10^{-6}
S_3	0.0000	-1.13×10^{-16}	0.0000	-1.11×10^{-16}
ΔS	-	5.00%	-	5.32×10^{-6}
DOP	1.0352	3.52%	1.0000	-9.22×10^{-8}

在实际测量过程中,由于实验环境(如温度、湿度、震动)的变化,以及其他误差源(如激光器输出功率的微小波动、探测器的随机噪声、旋转台的旋转精度等)的影响,最终会导致光电探测器探测到的光强产生偏差。利用 normrnd 函数产生服从标准正态分布的随机数组,加入到光强数组中,来模拟上述因素和误差源对测量过程的影响。在 1/4 波片快轴方位角误差为 0.5° 和相位延迟量误差为 1.0° 的条件下,加入不同强度的噪声时,1/4 波片参数误差标定的模拟计算结果如图 3 所示。从图中可以看出,随着噪声水平的增加,模拟计算得到的相对误差也随之增加。

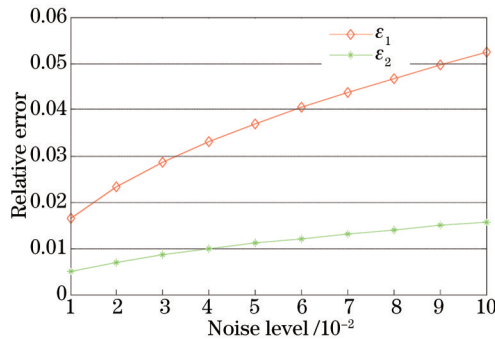


图 3 加入随机噪声后误差标定模拟计算结果

Fig.3 Simulation results of calibration with random noise

在 1/4 波片的快轴方位角误差为 0.5° 和相位延迟量误差为 1.0° , 且噪声水平为 10% 的条件下,对水平线偏振光的模拟测量结果如表 2 所示。模拟计算得到的归一化斯托克斯参量 S_1 、 S_2 、 S_3 与理论值的偏差分别由原来的 4.14%、-3.83%、0.40% 减小至 0.71%、0.02%、0.39%, 总均方根偏差 ΔS 由原来的 5.65% 减小至 0.81%, 偏振度误差由原来的 4.21% 减小至 0.71%。模拟计算结果表明,该方法对斯托克斯参量 S_1 、 S_2 的补偿效果比较明显,但对参量 S_3 的补偿效果较弱。从前文分析可知,1/4 波片的两项参数误差不会影响水平线偏振光斯托克斯参量 S_3 的测量精度。因此,加入随机噪声后,即使对斯托克斯偏振仪进行了误差标定和补偿,斯托克斯参量 S_3 的测量精度也只能得到微小的补偿。

表 2 加入随机噪声误差补偿前后模拟测量结果

Table 2 Simulation results before and after error compensation with random noise

	Before error compensation		After error compensation	
	Value	Error	Value	Error
S_1	1.0414	4.14%	1.0071	0.71%
S_2	-0.0383	-3.83%	0.0002	0.02%
S_3	0.0040	0.40%	0.0039	0.39%
ΔS	-	5.65%	-	0.81%
DOP	1.0421	4.21%	1.0071	0.71%

加入随机噪声后,虽然对误差标定结果产生了影响,使得 1/4 波片的快轴方位角误差和相位延迟量误差与假设值存在一定的偏差,同时也导致水平线偏振光的斯托克斯参量 S_3 出现了测量误差,但从模拟测量结果来看,相比误差补偿前,误差补偿后的偏振测量精度得到有效提高。

4 实验与结果分析

4.1 实验系统

实验室搭建的成像斯托克斯偏振仪及其标定装置如图4所示,主要由 He-Ne激光器、衰减器、起偏器、空间滤波器、准直镜组、偏振态分析器(PSA)、毛玻璃和 CCD 相机构成。其中,准直镜组由两个胶合平凸透镜构成,其出瞳在毛玻璃表面上;偏振态分析器是由可旋转的 1/4 波片和固定的检偏器构成(1/4 波片在前,检偏器在后);毛玻璃可由电机带动而匀速旋转,目的是减小图像的相干噪声。

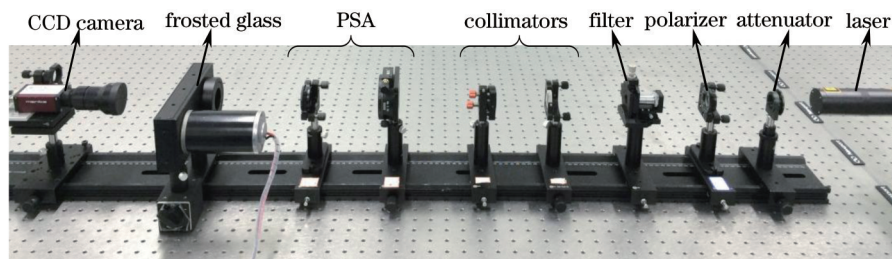


图4 成像斯托克斯偏振仪及其标定装置

Fig.4 Schematic of the imaging Stokes polarimeter and its calibration devices

实验系统中,He-Ne激光器输出波长为 632.8 nm,输出功率大于 1.5 mW,在能量稳定模式下,其波动范围为 $\pm 0.1\%/h$;空间滤波器由数值孔径为 0.4、倍率为 20 的显微物镜和直径为 15 μm 的针孔组成;起偏器和检偏器的消光比均为 500:1,1/4 波片为零级石英波片,其相位延迟量精度为 $\lambda/300$,固定在手动旋转台上,其旋转精度为 5';CCD 的量化深度为 14 bit,像素尺寸为 4.5 μm ,型号为 Manta G-609(AVT)。

取检偏器透光轴方位角作为实验系统的水平参考轴,并以该参考轴来确定 1/4 波片的快轴方位角。使起偏器透光轴与检偏器透光轴相互平行,由此产生水平线偏振光,作为标准参考光。测量过程基于旋转波片法,依次将 1/4 波片快轴旋转至 0°、30°、60°、90°、120°和 150°方向(相对于水平参考轴),在每个旋转角度下分别采集一幅光瞳图像,并通过数据处理计算得到 1/4 波片的快轴方位角误差和相位延迟量误差,以及误差补偿前后水平线偏振光的斯托克斯参量光瞳分布。

4.2 结果分析

CCD 相机采集得到的 6 幅光瞳图像如图 5 所示,每幅图像大小为 800 pixel \times 800 pixel。由于实验系统中偏振片存在一定缺陷和瑕疵,导致图像中出现光强不均匀的现象。为了减小光强不均匀对误差标定结果的影响,对图像进行处理,得到每幅图像的光强平均值,再对其进行归一化处理,通过计算得到 1/4 波片的快轴方位角误差为 0.3384°,相位延迟量误差为 1.2346°,与生产商提供的相位延迟量精度 $\lambda/300$ 相符合。

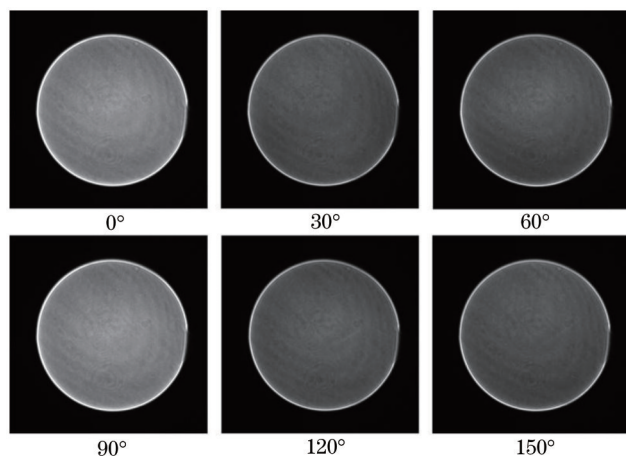


图5 CCD 相机采集的光瞳图像

Fig.5 Pupil figures captured by CCD camera

对成像斯托克斯偏振仪进行误差标定和补偿前,通过计算得到水平线偏振光的归一化斯托克斯参量光瞳如图 6 所示,对成像偏振仪进行误差标定和补偿后,计算结果如图 7 所示。对比图 6 和图 7,可以看出,通过

误差标定和补偿,斯托克斯参量 S_2 的测量误差明显减小。为了更直观地对比误差补偿前后的测量精度,对图6和图7中各项斯托克斯参量光瞳求平均值,计算结果如表3所示。误差补偿前,斯托克斯参量 S_1 、 S_2 、 S_3 分别与理论值偏差 4.11%、-2.46%和-1.80%,总均方根偏差 ΔS 为 5.12%,偏振度误差为 4.15%;误差补偿后,斯托克斯参量 S_1 、 S_2 、 S_3 与理论值的偏差分别减小至-0.24%、-0.03%和-1.76%,总均方根偏差 ΔS 减小至 1.78%,偏振度误差减小至-0.22%。

实验结果表明,该方法对斯托克斯参量 S_1 、 S_2 的补偿效果比较明显,但对参量 S_3 的补偿效果较弱,这与模拟计算结果一致。此外,误差补偿后,斯托克斯参量 S_3 存在-1.76%的测量误差,由模拟计算与分析可知,实验系统中存在除 1/4 波片快轴方位角误差和相位延迟量误差之外的其他误差源,从而导致斯托克斯参量 S_3 出现测量误差。总之,对成像斯托克斯偏振仪进行误差标定和补偿后,有效减小了测量误差,提高了偏振测量精度。

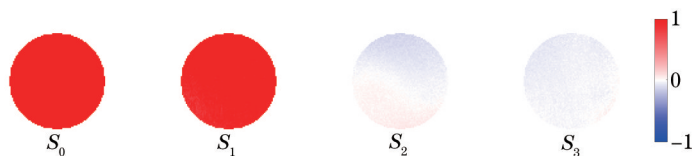


图6 误差补偿前的归一化斯托克斯参量光瞳分布

Fig.6 Generalized Stokes pupil before error compensation



图7 误差补偿后的归一化斯托克斯参量光瞳分布

Fig.7 Generalized Stokes pupil after error compensation

表3 误差补偿前后斯托克斯参量平均测量结果

Table 3 Average measurement results of Stokes parameters before and after error compensation

	Before error compensation		After error compensation	
	Value	Error	Value	Error
S_1	1.0411	4.11%	0.9976	-0.24%
S_2	-0.0246	-2.46%	-0.0003	-0.03%
S_3	-0.0180	-1.80%	-0.0176	-1.76%
ΔS	-	5.12%	-	1.78%
DOP	1.0415	4.15%	0.9978	-0.22%

5 结 论

通过研究旋转波片测量法和傅里叶分析法,推导出入射光束斯托克斯参量与 1/4 波片快轴方位角误差和相位延迟量误差之间的关系式。在此基础上,提出一种误差标定新方法,该方法以水平线偏振光作为标准参考光,对标准参考光进行测量,计算得到 1/4 波片的参数误差,并将其代入相应理论公式中,从而实现对成像斯托克斯偏振仪的误差补偿。模拟计算结果表明,在仅考虑 1/4 波片快轴方位角误差和相位延迟量误差的情况下,误差标定精度达到 0.02%。实验结果给出了误差标定前后水平线偏振光的斯托克斯参量光瞳分布,并且实验数据表明,通过误差标定和补偿,成像斯托克斯偏振仪的平均测量精度由原来的 5.12% 提高至 1.78%。本方法操作简单、可行性强、标定精度高。

参 考 文 献

- 1 Li Lei, Li Yanqiu, Chi Quan, *et al.*. Optimized imaging polarimeter for measuring polarization properties of hyper numerical aperture lithography tools[C]. SPIE, 2014, 9282: 928232.
- 2 D Lara, C Paterson. High resolution confocal polarimeter for the living human retina[C]. SPIE, 2011, 8011: 80110E.
- 3 J S Tyo, D L Goldstein, D B Chenault, *et al.*. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. Appl Opt,

- 2006, 45(22): 5453–5469.
- 4 M J Duggin. Imaging polarimetry in scene element discrimination[C]. SPIE, 1999, 3754: 108–117.
- 5 T Fujii, N Kita, Y Mizuno. On board polarization measuring instrument for high NA excimer scanner[C]. SPIE, 2005, 5752: 846–852.
- 6 H Nomura, Y Furutono. *In-situ* polarimetry of illumination for 193-nm lithography[C]. SPIE, 2008, 6924: 69241T.
- 7 H Nomura, I Higashikawa. Mueller matrix polarimetry for immersion lithography tools with a polarization monitoring system at the wafer plane[C]. SPIE, 2009, 7520: 752012.
- 8 H Nomura, I Higashikawa. *In-situ* Mueller matrix polarimetry of projection lenses for 193-nm lithography[C]. SPIE, 2010, 7640: 76400Q.
- 9 D E Aspnes, P S Hauge. Rotating-compensator/analyzer fixed-analyzer ellipsometer: Analysis and comparison to other automatic ellipsometers [J]. J Opt Soc Am, 1976, 66(9): 949–954.
- 10 Dennis H Goldstein, Russell A Chipman. Error analysis of a Mueller matrix polarimeter[J]. J Opt Soc Am A, 1990, 7(4): 693–700.
- 11 Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Method of improving measurement accuracy of Stokes parameters[J]. Chinese J Laser, 2013, 40(4): 0408006.
汤飞龙, 李中梁, 步 扬, 等. 一种提高偏振光斯托克斯参量测量精度的方法[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408006.
- 12 Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Calibration of rotating quarter-wave method based polarimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912005.
汤飞龙, 李中梁, 步 扬, 等. 旋转波片法偏振检测转置器件参数校准[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912005.
- 13 R M A Azzam, E Masetti, I M Elminyawi, *et al.*. Construction, calibration, and testing for a four-detector photopolarimeter[J]. Rev Sci Instrum, 1988, 59(1): 84–88.
- 14 Zhang Yong, Huang Zuohua, Zhao Zhentang, *et al.*. In-place calibration of Stokes ellipsometer's instrument matrix[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0212002.
张 勇, 黄佐华, 赵振堂, 等. 斯托克斯椭偏仪仪器矩阵在位定标方法[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0212002.
- 15 R M A Azzam, A G Lopez. Accurate calibration of the four-detector photopolarimeter with imperfect polarizing elements[J]. J Opt Soc Am A, 1989, 6(10): 1513–1521.
- 16 Wang Yonghui, Zheng Chunlong, Zhao Zhentang. Multi-point calibration method based on Stokes ellipsometry system[J]. Chinese J Laser, 2012, 39(11): 1108013.
王勇辉, 郑春龙, 赵振堂. 基于斯托克斯椭偏测量系统的多点定标法[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108013.
- 17 R M A Azzam. Photopolarimetric measurement of the Mueller matrix by Fourier analysis of a single detected signal[J]. Opt Lett, 1978, 2(6): 148–150.
- 18 Dennis H Goldstein. Polarized Light [M]. New York: Marcel Dekker, 2003.

栏目编辑: 史 敏