

引用格式: LI Song, ZHANG Ran, CHEN Yong-tai, *et al.* Calibration Methods of Amplitude-division Polarization Imaging Camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(7):0711001

李松,张然,陈永台,等.分振幅偏振成像相机标定方法研究[J].光子学报,2020,49(7):0711001

分振幅偏振成像相机标定方法研究

李松,张然,陈永台,褚金奎

(大连理工大学机械工程学院微系统研究中心,辽宁大连116024)

摘要:在分振幅偏振成像探测器标定过程中,针对标定系统引入的误差和探测器自身误差的超多影响因素的强耦合问题,提出采用一种非线性最小二乘拟合法,将探测器与标定系统的主要误差影响因素以未知参数的方式代入拟合方程中进行标定计算.在波段为532 nm的入射光源下,对标定后探测器的精度进行了验证.探测线偏振光的偏振角误差在 0.2° 以内,线偏振度误差在2.5%以内,探测左右旋圆偏振光的圆偏振度误差在3.5%以内,满足了天空偏振探测的应用.非线性最小二乘拟合法可以有效的标定分振幅偏振成像探测器.

关键词:偏振光学;分振幅偏振成像探测器;标定;偏振成像;非线性最小二乘拟合法

中图分类号:P161.3;TP751.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204907.0711001

Calibration Methods of Amplitude-division Polarization Imaging Camera

LI Song, ZHANG Ran, CHEN Yong-tai, CHU Jin-kui

(Microsystem Research Center, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In the calibration process of the amplitude-division polarization imaging detector, a nonlinear least squares fitting method was proposed to solve the problem of strong coupling between the error introduced by the calibration system and the super-influencing factors of the detector's own error. It substituted the main factors affecting the errors of the detector and the calibration system into the fitting equation in the form of unknown parameters for calibration calculations. The accuracy of the calibrated detector was verified under an incident light source with a wavelength of 532 nm. The polarization angle error of detecting linearly polarized light is below 0.2° , and the linear polarization error is below 2.5%, the circular polarization error of detecting left-right circularly polarized light is below 3.5%, which satisfies the application of sky polarization detection. It can be seen that the nonlinear least squares fitting method can effectively calibrate the amplitude-division polarization imaging detector.

Key words: Applied optics; Amplitude-division polarization imaging detector; Calibration; Polarization imaging; Nonlinear least squares fitting

OCIS Codes: 110.5405; 040.1880; 100.2960; 100.3005; 100.2000

0 引言

作为光的一维重要属性,偏振在目标探测领域有着独特的优势.随着偏振探测技术的发展,各种偏振探测器也被研发出来^[1-4],被应用于遥感探测、大气气溶胶分析、伪装识别、目标增强探测、生物探测等领域^[5-9].

基金项目:国家自然科学基金(No.51675076),中国高校基本科研业务费(No.DUT17GF109)

第一作者:李松(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为偏振成像与标定. Email: 918746679@qq.com

导师:张然(1984—),男,副教授,博士,主要研究方向为微执行器及微操作机器人. Email: zhangran@mail.dlut.edu.cn

收稿日期:2020-02-23;录用日期:2020-04-28

<http://www.photon.ac.cn>

其中,分振幅偏振成像系统因其实时性好,能量利用率高被作为研究重点,分振幅成像探测器一般利用分光棱镜等结合多个CCD相机组成多路通道,各通道放置不同偏振元件来获取偏振信息.由于多通道光路结构加工误差,光学器件误差等会造成各通道的光传输存在细微差异.所以,探测器的精确标定对目标偏振信息的准确识别起着至关重要的作用^[10-13].国内外都有对分振幅偏振探测器及其标定的研究,其中,FARLOW C A等研究搭建了全偏振成像探测器,因其固定装置精度高,没有对其进行标定工作^[14];LIANG Jian-qi等用确定线性关系,建立索引表等方法对三通道成像探测器的灰度响应进行了标定^[15];YIN Cheng-liang等用两点校正法和基于辐射定标的方法对分光型偏振成像探测系统进行了标定^[16];HUI Yu等采用曲线拟合法及建立索引表等对三通道棱镜偏振测量系统进行了标定,但标定过程对探测器误差考虑不全^[17];WANG Fang-bin等采用多点标定法对分振幅偏振探测器进行了标定^[18].在探测器标定过程中,标定系统会引入其他的误差,影响标定后系统的探测精度,因此探测器和标定系统引入的误差都需要标定.

本课题组搭建了分振幅偏振成像探测器,该探测器可以实现对目标的实时全偏振成像,但该探测器包含较多光学元件,光学元件自身制造误差和装配误差会影响偏振探测的精度,目前人们对分振幅成像探测器标定较多采用的是多点定标法和曲线拟合法,但这些方法未考虑标定系统偏振入射光源自身误差的影响.侯俊峰等采用非线性最小二乘拟合法将标定系统的偏振光源误差和椭圆仪误差进行了统一标定,取得了较好的结果,但分振幅偏振成像探测器的光路结构复杂,系统误差复杂度高于椭圆仪.本文提出采用非线性最小二乘拟合法(Nonlinear Least Squares Fitting, NLSF)^[20-21]对分振幅成像探测器进行标定,取得了较好的标定结果,同时验证了该方法在分振幅偏振成像探测器标定过程中的适应性.

1 探测器及标定系统

1.1 探测器组成及偏振探测原理

本文标定研究的分振幅全偏振成像探测器系统光路主要由三个非偏振分光棱镜、四个中继透镜、四个偏振片和一个四分之一波片组成^[3].放置的关系如图1所示.

分振幅式偏振探测器的目标是实现同时全偏测量,根据偏振解算原理,系统需要四条光路,每一条光路都能实现独立的偏振调制,因此本文采用三个无偏分光棱镜,将目标入射光逐级分光为光强相等的四束光,且经过无偏分光棱镜后四束光偏振态不变,但由于探测器前段镜头的焦距和光路长度的限制,在每条光路的非偏分光棱镜的后端加入了中继透镜进行目标成像的中继,每条光路中继后的光经过 0° 、 45° 、 90° 、 135° 偏振片和 $1/4$ 波片的偏振调制后,最终在四个CCD相机上成像.其中, $1/4$ 波片安装在 135° 偏振片的前端,波片快轴方向为探测器体轴正方向.

该探测器通过一次测量可以获得同一目标场景的四幅不同偏振信息的图像,具有探测耗时短、鲁棒性强及体积小的优点,且有着较大的改造空间,可以根据不同的目标检测需求,在系统光路入口更换安装不同的光学镜头.

入射光的偏振状态可以由斯托克斯(Stokes)矢量 S 表示,该矢量由四个参数组成

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_x|^2 + |E_y|^2 \\ |E_x|^2 - |E_y|^2 \\ 2E_x E_y \cos\alpha \\ 2E_x E_y \sin\alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, I 表示入射光的总强度, Q 表示系统 0° 方向和 90° 方向的偏振分量强度之差, U 表示系统 45° 方向和 135° 方向的偏振分量强度之差, V 表示右旋圆偏振分量与左旋圆偏振分量强度之差.入射光的偏振信息可以通

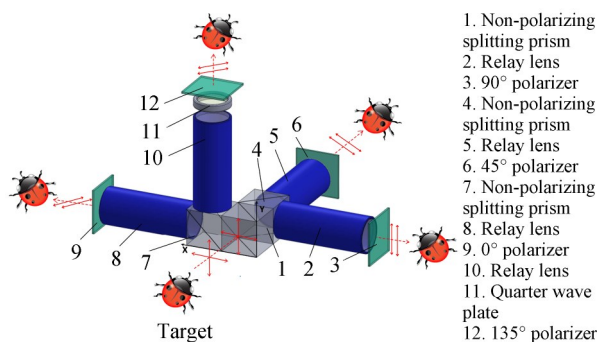


图1 分振幅偏振成像探测器
Fig.1 Amplitude-division polarization imaging detector

过这四个参数计算得到,偏振角(Angle of Polarization, AoP)、线偏振度(Degree of Linear Polarization, DoLP)以及圆偏振度(Degree of Circular Polarization, DoCP)表示为

$$\text{AoP} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (2)$$

$$\text{DoLP} = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (3)$$

$$\text{DoCP} = \frac{\sqrt{V^2}}{I} \quad (4)$$

由式(1)~(4)可知,入射光的偏振信息可以通过其斯托克斯矢量计算得到.根据探测器的物理模型可以得知探测器的仪器矩阵分别由四个通道的四个穆勒矩阵的首行组成^[3].探测器仪器矩阵 M 表示为

$$M = \begin{bmatrix} k_1 & k_1 \cos 2\theta_0 & k_1 \sin 2\theta_0 & 0 \\ k_2 & k_2 \cos 2\theta_{45} & k_2 \sin 2\theta_{45} & 0 \\ k_3 & k_3 \cos 2\theta_{90} & k_3 \sin 2\theta_{90} & 0 \\ k_4 & k_4 A_1 & k_4 A_2 & k_4 A_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{cases} A_1 = \cos 2\theta_{135} [1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta_{\text{wave}}] + \sin 2\theta_{135} (1 - \cos \Delta) \sin 2\theta_{\text{wave}} \cos 2\theta_{\text{wave}} \\ A_2 = \sin 2\theta_{135} [1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta_{\text{wave}}] + \sin 2\theta_{135} [1 - (1 - \cos \Delta) \cos^2 2\theta_{\text{wave}}] \\ A_3 = \sin 2\theta_{135} [1 - (1 - \cos \Delta) \sin^2 2\theta_{\text{wave}}] + \sin 2\theta_{135} [1 - (1 - \cos \Delta) \cos^2 2\theta_{\text{wave}}] \end{cases}$$

式中, θ_0 、 θ_{45} 、 θ_{90} 、 θ_{135} 代表探测器中各通道偏振片与探测器体轴的实际夹角、 θ_{wave} 代表探测器中1/4波片快轴与探测器体轴的实际夹角、 Δ 表示探测器中第四通道1/4波片的实际相位延迟、 k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 表示探测器经过三个无偏棱镜后的四通道的分光系数.

在偏振探测中,具有一定偏振态的入射光进入探测器,经过传输变化后成像在CCD相机上,通过采集的图像信息计算出射光的偏振信息,推导出偏振探测的原理方程为

$$I = M \cdot S \quad (6)$$

式中, S 表示具有偏振态的入射光, M 表示探测器的系统穆勒矩阵, I 表示CCD相机成像的图像信息.根据矩阵运算原则可求的入射光 S ,表示为

$$S = M^{-1} \cdot I \quad (7)$$

结合式(1)~(4),可以计算得出射光 S 的偏振信息.

1.2 标定系统

根据探测器的原理与结构,设计搭建了探测器标定系统,探测器标定系统主要分为光源、入射光偏振调制单元、探测器及夹持装置组成,如图2所示.光源由积分球与532 nm波段的滤光片组成,偏振调制单元由线偏振片、精密转台、1/4波片及精密角度传感器组成,光源、入射光偏振调制单元和探测器沿精密直线导轨布置,整个探测器标定系统在光学平台上组装完成.

光源发出的光经过偏振调制后,会包含偏振调制单元的误差,引入误差后的入射光 S 可由式(8)进一步表示

$$S = \begin{bmatrix} 1 \\ [1 - (1 - \cos \Delta_w) \sin^2 2(\theta_w + \beta_w)] \cos 2(\theta_p + \beta_p) + [(1 - \cos \Delta_w) \cdot \\ \sin 2(\theta_w + \beta_w) \cos 2(\theta_w + \beta_w)] \sin 2(\theta_p + \beta_p) \\ [(1 - \cos \Delta_w) \sin 2(\theta_w + \beta_w) \cos 2(\theta_w + \beta_w)] \cos 2(\theta_p + \beta_p) + [1 - (1 - \cos \Delta_w) \cdot \\ \cos^2 2(\theta_w + \beta_w)] \sin 2(\theta_p + \beta_p) \\ \sin \Delta_w \sin 2(\theta_w + \beta_w) \cos 2(\theta_p + \beta_p) - \sin \Delta_w \cos 2(\theta_w + \beta_w) \sin 2(\theta_p + \beta_p) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, θ_p 、 θ_w 表示偏振调制单元中偏振片、1/4波片与各自起始角的夹角, β_p 、 β_w 表示偏振调制单元中偏振片、1/4波片起始角与探测器体轴的夹角, Δ_w 表示偏振调制单元中1/4波片的实际相位延迟.四个通道的CCD相机采集的图像光强记作

$$I = [I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4]^T \quad (9)$$

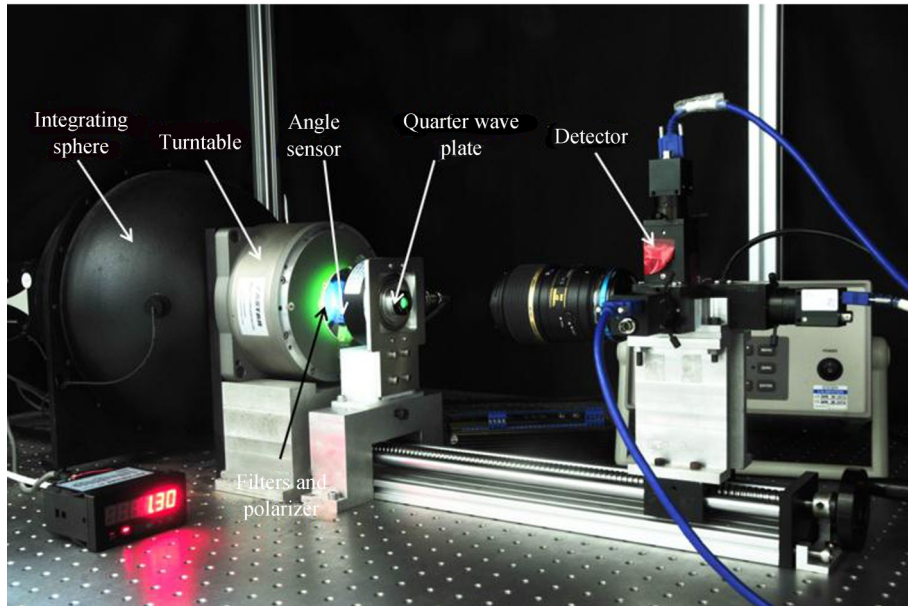


图2 探测器标定装置
Fig.2 Detector calibration system

2 误差分析

2.1 探测器误差分析

通过对探测器的原理分析,可知影响探测器探测应用的主要误差有:同一光束在经过非偏振分光棱镜后在CCD相机成像面上灰度响应不同,可能是分光棱镜的分光系数差异和不同CCD相机对光的响应的差异等因素造成的;CCD相机采集的图像之间存在像素偏移,可能是非偏振分光棱镜放置位置偏差和CCD相机成像面的位置偏差等因素造成的;探测器的透射率误差;探测器中光学器件自身的精度误差;探测器光学器件实际装配方位与设计值存有偏差,即四个偏振片、1/4波片与探测器体轴正方向的实际夹角与理论夹角存在偏差。

其中,不同CCD相机之间对光的响应差异,CCD相机的暗电流和非线性响应对偏振探测精度影响较小,考虑到分振幅偏振成像探测器的应用场景是对天空偏振模式进行探测,以上的几个次要误差对偏振探测的影响可以忽略不计。

2.2 标定系统误差分析

2.2.1 光源误差

稳定的光源是标定探测器的先决条件,在积分球的光强达到预设值后,用探测器单个通道的在相同时

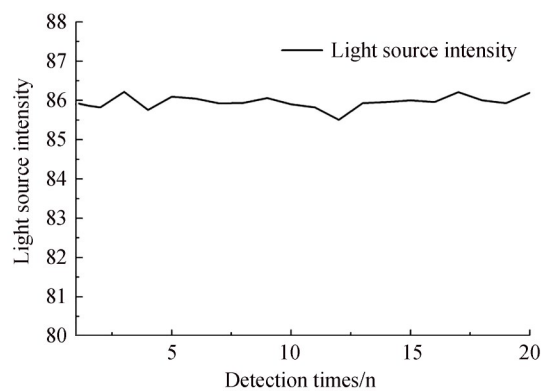


图3 光源抖动
Fig.3 Light source jitter

间间隔下,对光源发出的入射光进行光强稳定验证.分析在相同条件下,不同时刻采集到的图像的灰度值的抖动误差.经分析发现,灰度值的RMSE低于0.1%,对标定的影响可以忽略不计,光强变化如图3所示.

2.2.2 偏振调制单元误差

偏振调制单元本身存在误差,主要包括偏振片消光比、偏振片起始 0° 方向与探测器体轴的夹角误差、1/4波片起始快轴方向与探测器体轴的夹角误差、1/4波片相位延迟误差、及其组成的偏振调制单元透射率误差等.其中,偏振片在532 nm波段的消光比为1 000:1,对标定后偏振探测精度不影响探测器的实际应用,故在标定过程中不考虑偏振片消光比造成的误差问题.

3 标定偏振探测器

3.1 图像采集

控制1/4波片和偏振片以 45° 间隔独立旋转.即每当1/4波片旋转 45° 后,偏振片以 45° 为间隔旋转 360° .当1/4波片旋转 360° 时,偏振调制单元停止.它调制出64组偏振态的偏振光,即入射光变量 S ,可由偏振调制单元的偏振片和1/4波片角度位置推导出来.

3.2 图像预处理

图像预处理分为四部分,包括图像配准、图像去噪、图像灰度化.

图像配准可以标定通道成像像素偏移误差,配准算法采用基于关键点配准的SIFT算法^[19].SIFT算法提取图像的关键点使得计算量较小,配准速度快,且对灰度变化有很大的鲁棒性,因此适用于探测器的标定.首先,在光源出口处放置有特征图像的透明塑料片,探测器可根据探测目标得到具有特征的四幅图像,以 0° 偏振片通道特征图为基础图,对其他三通道的图像进行配准,保存变化矩阵,将三通道的64组图像按各自通道的配准变化矩阵处理, 0° 偏振片通道64组图像作为基准图不用处理.

图像去噪处理是采用中值滤波方法对配准后的图像进行滤波处理,可以解决图像中存在的噪点影响;图像灰度化处理是对CCD相机采集图像的成像区域进行了灰度化.最后,对每组偏振入射光图像进行处理.式(9)中的 I 是四个通道采集的预处理后的图像信息.

3.3 标定方法

一般的标定方法往往默认偏振光源的偏振调制单元入射光的偏振起始角、1/4波片快轴起始角与探测器体轴重合,器件自身光学性能理想,但由偏振调制单元发出的偏振光实际存在误差.NLSF法的优点是將标定系统引入的误差以未知参数的形式代入最小二乘拟合计算,可以解决探测器及标定系统除不同CCD相机成像图像像素偏移外的主要误差,包括:由分光棱镜误差导致的CCD相机图像灰度不一致误差、探测器的透射率误差、探测器光学器件自身误差、探测器光学器件实际装配方位与设计值的偏差等,拟合计算的原理方程可表示为

$$I = M \cdot M_w \cdot M_p \cdot S_N \quad (10)$$

式中, M 表示探测器的仪器矩阵,用式(5)中的 M 表示, M_p 、 M_w 表示偏振片和1/4波片的Muller矩阵, S_N 表示未经偏振调制的无偏振入射光, I 表示经过四通道预处理后四通道的图像灰度信息,如式(9)所示. $M_w \cdot M_p \cdot S_N$ 等同于式(8)中的 S 变量,可表示为

$$S = M_w \cdot M_p \cdot S_N \quad (11)$$

将采集到的64组偏振态的图像偏振信息 I 、对应的偏振调制单元发出的已知64组入射光偏振信息 S 以及由16个未知参数组成的探测器穆勒矩阵 M 组成64组方程,通过NLSF法可以拟合计算出标定系统中引入的误差参数和探测器的实际仪器矩阵.64组方程中共20个待拟合参数,组成64组方程的原理方程如式(12)所示

$$I = M \cdot M_w \cdot M_p \cdot S_N = \tau \cdot \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \cdot S \quad (12)$$

式中, $m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{14}, \dots, m_{44}$ 是组成仪器矩阵 M 的16个参数,其中,包含了无偏分光棱镜造成的分光系数误差等影响探测器应用的主要误差, τ 是标定系统透射率参数, S 表示经过偏振调制的入射光,与式(8)相同,

含有 β_p 、 β_w 、 Δ_w 3 个未知标定参数, 其中, β_p 、 β_w 表示偏振调制单元中偏振片、1/4 波片起始角与探测器体轴的夹角, Δ_w 表示偏振调制单元中 1/4 波片的实际相位延迟. 图 4 为探测器标定流程.

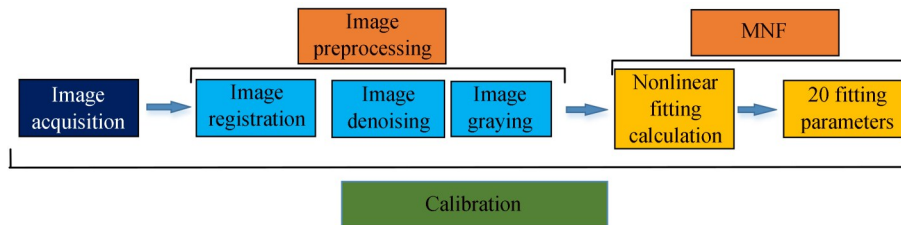


图 4 探测器标定流程

Fig.4 Detector calibration process

4 标定补偿及验证

4.1 标定补偿

补偿系统主要包括积分球、532 nm 滤光片, 由偏振片、精密旋转台、1/4 波片、精密角度传感器组成的偏振调制单元, 分振幅偏振成像探测器. 首先, 使用光源、532 nm 滤光片和偏振调制单元来调制偏振角. 偏振片每 10° 转一次, 偏振角从 0° 到 170° 变化. 共获得 18 组不同偏振状态的完全线性偏振光; 其次, 使用光源、532 nm 滤光片和偏振调制单元来调制左旋和右旋圆偏振光. 最后, 通过标定后的探测器计算入射光的偏振角、线偏振度和圆偏振度, 并与偏振调制单元发出的已知偏振态的偏振信息进行比较, 分析两者之间的误差.

分振幅成像探测器采集多组数据, 对不同数据集进行标定后发现探测器探测偏振信息误差曲线相似度较高. 根据误差散点拟合误差函数. 标定及误差补偿完成后, 对新采集的偏振光进行偏振探测. 图 5(a)~(b)

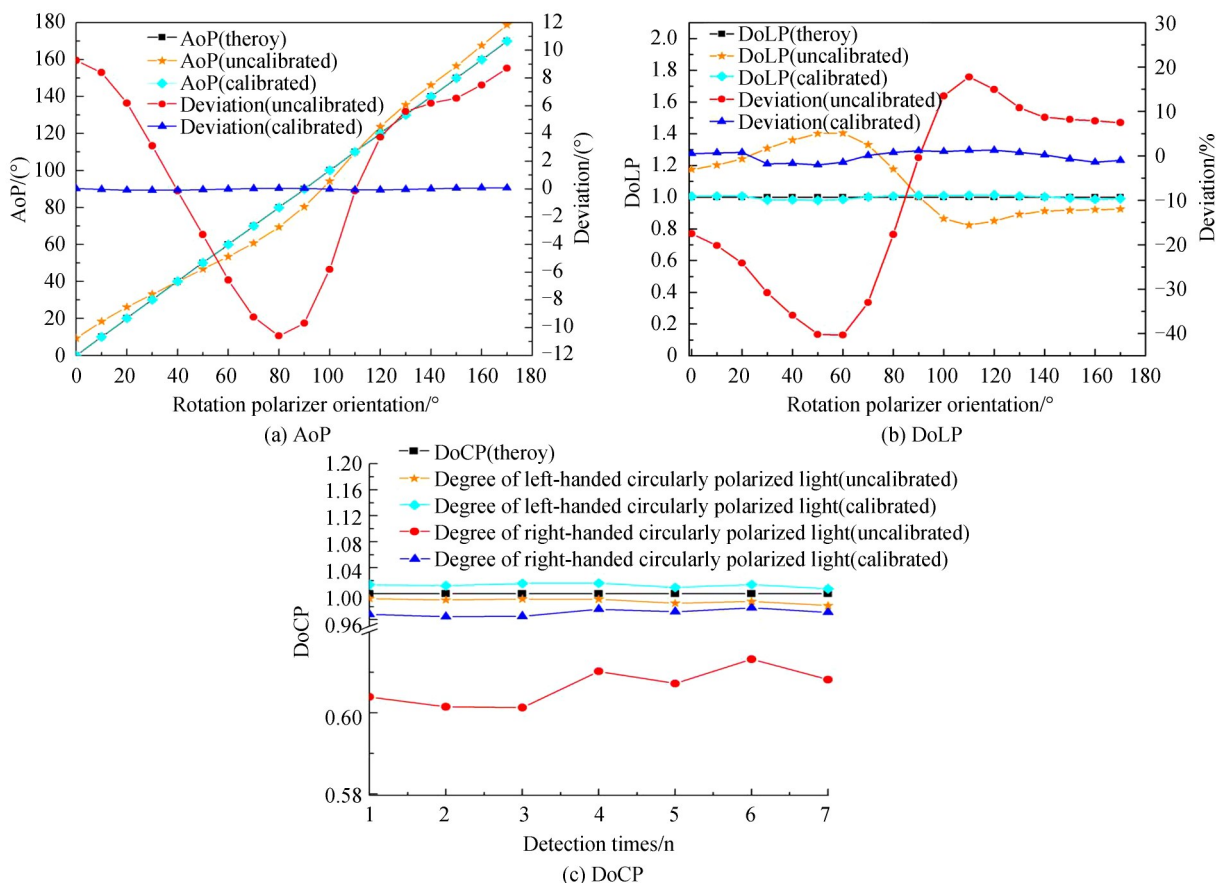


图 5 标定前后偏振信息探测误差

Fig.5 Polarization information error before and after calibration

为线偏振光标定补偿前后的偏振角和偏振度误差探测图,标定后偏振角的探测误差小于 0.2° ,线偏振度的探测误差小于 2.5% .图5(c)为标定补偿前后的左旋和右旋圆偏振光圆偏振度探测图,标定后圆偏振度的探测误差小于 3.5% .本文中的探测器主要应用于天空偏振探测,标定完成后的探测器探测精度可以很好地满足应用.

4.2 验证实验

探测器标定补偿后,对探测器进行了偏振度探测的室内验证实验.通过标定前后探测器对偏振角为 110° 的线偏振光的偏振度和圆偏振光的偏振度进行了对比实验,图6(a),(b)为标定前后线偏振光的线偏振度对比图,标定后的像素点的线偏振度的平均值为0.981,相较标定前探测精度提高了 18.6% ,图6(c),(d)为标定前后线偏振光的圆偏振光偏振度对比图,标定后的每个像素点的圆偏振度的平均值为0.974,相较标定前探测精度提高了 30.9% ,由此可知,标定后的探测器偏振探测精度有了明显的提升.

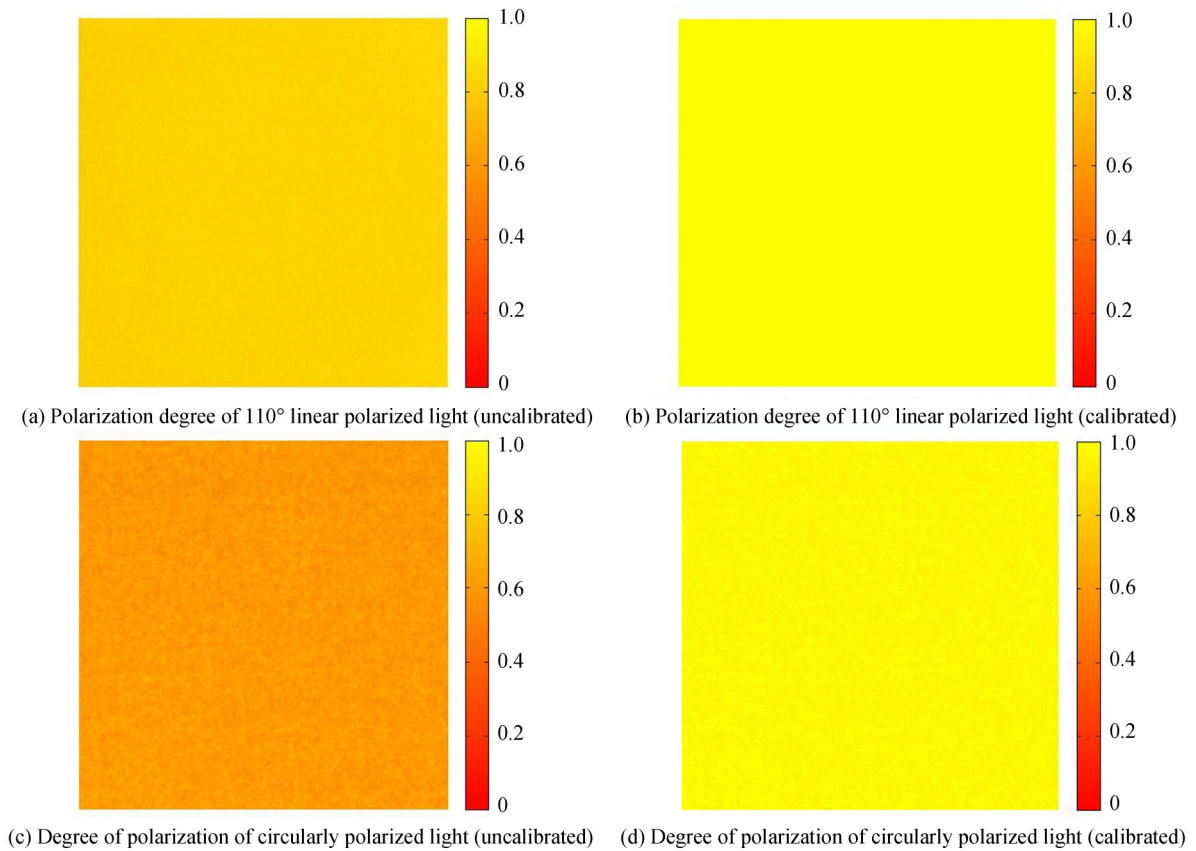


图6 标定前后的验证实验图

Fig. 6 Verification experiment diagram before and after calibration

5 结论

本文提出采用一种NLSF法对分振幅偏振成像探测器进行标定.该方法考虑了探测器和标定系统的主要误差,解决了标定系统引入的入射光偏振信息偏差问题.对分振幅偏振成像探测器进行了标定和补偿,线偏振光AoP测量误差小于 0.2° ,DoLP探测误差小于 2.5% ,圆偏振光的DoCP探测误差小于 3.5% .从标定前后的探测器对线偏振光和圆偏振光的偏振探测验证实验可知,分振幅偏振成像探测器经过NLSF法标定后,偏振探测精度有了很大提升,满足了天空偏振探测的应用需求,并对其他偏振探测器的标定具有一定的参考价值.

参考文献

- [1] ZHANG Ran, WU Chen-qi, FAN Yuan-yi, *et al.* Modular division of focal plane polarimeter system [J]. *Optics Communications*, 2019, **446**: 162-170.
- [2] SHIBATA S, HAGEN N, OTANI Y. Robust full Stokes imaging polarimeter with dynamic calibration [J]. *Optics*

- Letters*, 2019, **44**(4): 891–894.
- [3] CHEN Yong-tai, ZHANG Ran, LIN Wei, *et al.* Design and construction of real-time all-polarization imaging detector for skylight[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(4): 816–824.
陈永台,张然,林威,等. 天空实时全偏振成像探测器设计与搭建[J]. 光学精密工程, 2018, **26**(4): 816–824.
- [4] CHANG Yu-jen, LO Yu-lung, PHAN H Q. Full-field stokes-mueller matrix imaging polarimetry system based on electro-optical modulators[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, **10**(6): 6602507.
- [5] KAMERMANS M, HAWRYSHYN C. Teleost polarization vision: how it might work and what it might be good for[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, **366**(1565): 742–756.
- [6] GAGNON Y L, TEMPLIN R M, HOW M J, *et al.* Circularly polarized light as a communication signal in mantis shrimps[J]. *Current Biology*, 2015, **25**(23): 3074–3078.
- [7] TILSTRA L G, STAMMES P. Earth reflectance and polarization intercomparison between SCIAMACHY onboard Envisat and POLDER onboard ADEOS-2[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D11): D11304.
- [8] SPIEGEL J VAN DER, WU Xiao-tie, ZHANG Mi-lin, *et al.* Polarization image sensors: Learning from biology to make the invisible visible[C]. IEEE, 2012.
- [9] REN B, SHI L, WANG G. Polarimetric target detection using statistic of the degree of polarization[J]. *Progress In Electromagnetics Research*, 2016, **46**: 143–152.
- [10] COMPAIN E, POIRIER S, DREVILLON B. General and self-consistent method for the calibration of polarization modulators, polarimeters, and mueller-matrix ellipsometers[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(16): 3490–3502.
- [11] DE MARTINO A, GARCIA CAUREL E, LAUDE B, *et al.* General methods for optimized design and calibration of Mueller polarimeters[J]. *Thin Solid Films*, 2004, **455–456**: 112–119.
- [12] GAO Hong-wen, ZHANG Chun-min, ZHAN Bao-chang. Relative calibration for a polarization interference imaging spectrometer[J]. *Optics Communications*, 2011, **284**(12): 2747–2750.
- [13] YANG Bin, JU Xue-ping, YAN Chang-xiang, *et al.* Alignment errors calibration for a channeled spectropolarimeter[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(25): 28923.
- [14] FARLOW C A, CHENAULT D B, *et al.* Imaging polarimeter development and applications[J]. *SPIE*, 2001.
- [15] LIANG Jian-qi, YAN Hao, LI Tao, *et al.* Research on calibration of three-channel polarization imaging system[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, **16**(36): 161–165.
梁建琦,闫皓,李涛,等. 三通道偏振成像系统的标定研究[J]. 科学技术与工程, 2016, **16**(36): 161–165.
- [16] YIN Cheng-liang, WANG Feng, YUAN Hong-wu, *et al.* Research on calibration of the dispersive polarization imaging detection system[J]. *Optical Technique*, 2015, **41**(1): 11–15.
尹成亮,王峰,袁宏武,等. 分光型偏振成像探测系统校正研究[J]. 光学技术, 2015, **41**(1): 11–15.
- [17] HUAI Yu, FAN Zhi-guo, SUN Hao, *et al.* Calibration of the three links prism simultaneous polarization measurement system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(11): 18–24.
怀宇,范之国,孙洁,等. 三通棱镜同时偏振测量系统的标定[J]. 光电工程, 2015, **42**(11): 18–24.
- [18] WANG Fang-bin, LIU Tao, HONG Jin, *et al.* Multi-point calibration method for division-of-amplitude photopolarimetric detection system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(5): 143–150.
汪方斌,刘涛,洪津,等. 分振幅光偏振探测系统多点定标方法[J]. 红外与激光工程, 2017, **46**(5): 143–150.
- [19] YANG Chang-jiu, LI Shuang, QIU Zhen-wei, *et al.* Study on image registration of simultaneous imaging polarization system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(1): 262–267.
杨长久,李双,裘植炜,等. 同时偏振成像探测系统的偏振图像配准研究[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(1): 262–267.
- [20] HOU Jun-feng, WANG Dong-guang, DENG Yuan-yong, *et al.* Nonlinear least-square fitting polarization calibration of Stokes ellipsometer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(8): 1915–1922.
侯俊峰,王东光,邓元勇,等. 斯托克斯椭偏仪的非线性最小二乘拟合偏振定标[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(8): 1915–1922.
- [21] HOU Jun-feng, WANG Dong-guang, DENG Yuan-yong, *et al.* Error analysis and optimal design of polarization calibration unit for solar telescope[J]. *Chinese Physics B*, 2017, **26**: 089501.