

分束型同时偏振成像系统定标及预处理方法

崔文煜¹, 黄文娟^{1,2}, 易维宁^{1*}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

摘要 同时偏振成像系统可获取动态物体的瞬态偏振特性, 具有广泛的应用前景。然而各偏振探测通道存在空间和辐射响应差异, 对准确建立仪器穆勒矩阵造成干扰。针对分束型同时偏振成像系统, 分析了误差来源, 提出了定标及预处理方法。通过成像非均匀性、辐射响应不一致性、检偏角度误差、瞬时视场像差的标定和校正, 消除了偏振成像探测的系统误差。结果显示: 经过定标和校准处理, 各通道图像非均匀度平均降低了 2.24%, 辐射响应差异率绝对值平均降低了 17.22%, 偏振相对快轴方向平均纠正了 1.71°, 成像几何偏差平均纠正了 1.87 个像元。校正后, 系统偏振度和偏振角测量误差分别降低 0.47 和 32.84°。对室外场景进行测量实验, 经过预处理正确解算斯托克斯参量, 并通过偏振图像融合处理, 突出了不同材质的物性差异。

关键词 成像系统; 偏振成像; 同时; 定标; 预处理

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2011002

Calibration and Preprocessing Method for Amplitude Divided Simultaneous Imaging Polarimeter

Cui Wenyu¹, Huang Wenjuan^{1,2}, Yi Weining^{1*}

¹Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The simultaneous imaging polarimeter can obtain the transient polarization characteristics of moving objects, and it has a wide application prospect. However, the polarization detection channels differ in spatial and radiation response, which interferes with the accurate establishment of the instrument Muller matrix. The system error source is analyzed, and the calibration and preprocessing method is proposed for the amplitude divided simultaneous imaging polarimeter. The system error of polarization imaging detection is eliminated by the calibration and correction of non-uniformity of detectors, inconsistency of radiation response, deviation of polarizers oriented angles, and difference of instantaneous field of views. The results show that after the calibration and preprocessing, the CCD non-uniformity of every channel decreases by 2.24% on average, the absolute values of radiation response differences ratio decrease by 17.22% on average, the actual polarizer oriented angles are corrected by 1.71° on average, and the imagery pixel offsets are corrected by 1.87 pixel on average. After correction, the measurement error of polarization degree and polarization angle decrease by 0.47 and 32.84°, respectively. The outdoor scene is measured and tested, the Stokes parameters are calculated correctly after preprocessing, and the physical characteristics of different materials are highlighted after the polarization imaging fusion.

Key words imaging systems; polarimetric imaging; simultaneous; calibration; preprocessing

OCIS codes 110.5405; 150.1488; 200.3050

1 引言

偏振光学成像在传统强度成像基础上增加了偏振信息维度,除了二维空间光强分布,还能获得每一

点的反射光偏振信息,有助于进一步分析物体的材质属性^[1],实现更有效的目标探测和识别,甚至在复杂环境中检测和识别常规成像技术无法识别的目标^[2-3]。常用的偏振成像方案主要有分时获取和同

收稿日期: 2020-04-30; 修回日期: 2020-05-13; 录用日期: 2020-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(41601379)

* E-mail: yiwn@aiofm.ac.cn

步获取两种^[4]。同时偏振成像可同步获取目标特定时刻的瞬态偏振信息,能够对运动目标进行偏振探测,这是分时系统不具备的能力。

定标和数据的预处理是偏振探测传感器获取正确信息的基础,其精度决定着最终遥感信息的反演精度^[5]。偏振系统定标多以建立仪器穆勒矩阵为主要方式,但不论是四点定标法、E-P(Equator-Poles)定标法^[6-8]还是线性拟合法^[9-10],不可忽视的是,消除探测系统误差是准确标定和建立仪器矩阵的必要条件及关键所在^[11]。

分束型偏振成像因其特有的系统结构难以避免存在各偏振通道间的光分比例不均、辐射响应差异、成像几何偏差等固有系统误差,这些系统误差相互作用综合传递,最终造成各像元探测到不准确的偏振信息。本文针对棱镜分束型偏振成像系统,建立了探测系统内部各辐射响应环节的误差传递模型,分析了各项系统误差对偏振测量精度的影响作用,据此针对性地设计了定标和校准流程。通过实验室测量,对各项系统误差进行了标定和校正,从而提高了系统的偏振探测精度,为瞬态偏振信息的应用提供较准确的测量数据。

2 分束型偏振成像系统误差分析

2.1 棱镜分束型偏振成像系统

棱镜分束型同时偏振成像系统的分光系统由三块镀膜棱镜组装而成。光线进入系统后,光能量等份(基本三等份)分向三路。其后分别经过三块线偏振片,进入三个对应的 CCD 相机。各通道偏振片快轴方向分别与入瞳像面平行呈 0°、45°、90°角度差。结构示意图如图 1 所示。

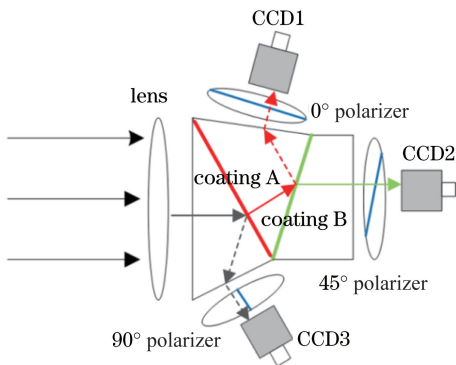


图 1 三分束同时偏振成像系统结构示意图
Fig. 1 Schematic of three-beam simultaneous polarization imaging system

三个 CCD 相机分别输出同视场三个偏振方向图像,可据此计算每个像元的斯托克斯参量(I 、 Q 、

U),从而获取观测视场的偏振度和偏振角图像。

2.2 偏振探测系统误差源分析

依据斯托克斯参量计算公式,分束型偏振成像系统获得的图像中每一个像元(i, j)对应的偏振分量 $I_{i,j}$ 、 $Q_{i,j}$ 、 $U_{i,j}$ 由三个偏振通道相同像元的辐射值计算得到。对于理想系统,各通道各像元输出的电计数值与其对应的辐射值呈相同线性映射关系,偏振分量可直接由电计数值(DN)计算。

$$\begin{bmatrix} I_{i,j} \\ Q_{i,j} \\ U_{i,j} \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha \\ 1 & \cos 2(45^\circ + \alpha) & \sin 2(45^\circ + \alpha) \\ 1 & \cos 2(90^\circ + \alpha) & \sin 2(90^\circ + \alpha) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \text{DN}_{i,j}(0^\circ) \\ \text{DN}_{i,j}(45^\circ) \\ \text{DN}_{i,j}(90^\circ) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $\text{DN}_{i,j}(0^\circ)$ 、 $\text{DN}_{i,j}(45^\circ)$ 、 $\text{DN}_{i,j}(90^\circ)$ 分别为偏振 0°通道、45°通道、90°通道像元(i, j)对应的计数值。像元(i, j)对应的偏振度和偏振角分别表示为

$$P_{i,j} = \frac{\sqrt{Q_{i,j}^2 + U_{i,j}^2}}{I_{i,j}}, A_{i,j} = \frac{1}{2} \arctan \frac{U_{i,j}}{Q_{i,j}} + \alpha, \quad (2)$$

式中: α 是探测系统检偏角度参考系与入射光偏振角参考系之间的差值,是应用过程中根据实际计算需要的人为设定值,对于偏振度计算结果没有影响,偏振角系统探测结果与入射光偏振角相差 α 。对于本偏振探测系统的标定和校正,检偏角度参考系统一设定为本系统偏振 0°通道的检偏角度,即 $\alpha = 0^\circ$ 。求解(1)式中的逆矩阵,得到 I 、 Q 、 U 分量计算公式为

$$\begin{cases} I_{i,j} = \text{DN}_{i,j}(0^\circ) + \text{DN}_{i,j}(90^\circ) \\ Q_{i,j} = \text{DN}_{i,j}(0^\circ) - \text{DN}_{i,j}(90^\circ) \\ U_{i,j} = 2\text{DN}_{i,j}(45^\circ) - \text{DN}_{i,j}(0^\circ) - \text{DN}_{i,j}(90^\circ) \end{cases}. \quad (3)$$

根据各检偏通道响应辐射值与系统入射光偏振分量之间的关系[如(1)~(3)式所示],以及本系统光电响应探测原理,对于偏振度为 P 、偏振角为 A 的入射光,各通道各像元的理论电计数响应值 $\text{DN}_{i,j}(\theta_k)$ 应为^[12]

$$\text{DN}_{i,j}(\theta_k) = [1 + P \cdot \cos 2(\alpha + \theta_k - A)] \cdot D_k \tau_k k_{i,j,k} \cdot A_d L_{in} + \text{DN}_{\text{dark}}, \quad (4)$$

式中: L_{in} 是探测系统入瞳总辐亮度;对于理想探测系统,通道 k ($k = 1, 2, 3$)的检偏角度 $\theta_k = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$;各通道等比例分光, $D_k = 1/3$;各通道光学系统透过率 $\tau_k = 1$;各通道像元(i, j)的光辐射响应率 $k_{i,j,k}$ 一致;各通道成像几何没有偏差,像元面积 A_d

是恒定值;暗电流计数值 $DN_{\text{dark}}=0$ 。

然而,实际探测系统受制造和装配水平限制,上述系统参量存在偏差,使得电计数值 $DN_{i,j}(\theta_k)$ 并非按理论映射关系[(4)式]对入射光辐射正确响应,根据(2)式和(3)式计算的偏振分量也必然存在误差。

其误差项有:各通道偏振片实际装配角度与标称值的误差 a_k ($-45^\circ < a_k < 45^\circ$);分光不均的比例误差 $(1/3 + b_k)$, $-1/3 < b_k < 2/3$, 且 $\sum_{k=1}^3 \left(\frac{1}{3} + b_k\right) = 1$;各通道透镜透过率、偏振片消光比等差异导致的各通道总透过率非一致性误差 c_k ($0 < c_k < 1$);成像非均匀性和探测器响应率不一致引起的各像元辐射响应率非一致性误差 $d_{i,j,k}$;各通道成像几何偏差引起的瞬时视场偏移 e_k ($0 < e_k < 1$)。当 $e_k \geq 1$ 时,说明通道 k 的像元与其他通道对应像元完全错开,误差计算没有意义。 DN_{dark} 一般每次测量会根据暗电流实测值扣除,可不作考虑。因此,各通道各像元的实际电计

数值 $DN_{i,j}^*(\theta_k)$ 表示为

$$DN_{i,j}^*(\theta_k) = [1 + P \cdot \cos 2(\theta_k + a_k - A)] \cdot \left(\frac{1}{3} + b_k\right) \cdot (1 - c_k) \cdot (1 + d_{i,j,k}) k_{i,j,k} \cdot (1 - e_k^2) A_d \cdot L_{\text{in}} \quad (5)$$

假设不同偏振态(偏振度 P 和偏振角 A)的光源入射探测系统,对于各项误差源的分别设置不同数值,根据(5)式分别计算实际电计数值 $DN_{i,j}^*(\theta_k)$,然后根据(2)式和(3)式计算其偏振分量 $[I_{i,j}^*, Q_{i,j}^*, U_{i,j}^*, P_{i,j}^*, A_{i,j}^*]$,对比偏振度和偏振角计算值 $(P_{i,j}^*, A_{i,j}^*)$ 与入射光偏振度和偏振角的差异,分析各项误差源的影响贡献。

设定探测系统入射光偏振角 $A = 0^\circ$, 偏振度 $P = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$, 分别当偏振 45° 通道(即 $k = 2$)存在误差项 $a_2, b_2, c_2, d_{i,j,k}, e_2$ 时,根据(2)式、(3)式和(5)式,计算在探测系统的偏振度测量误差 $|P - P^*|$ 。结果如图 2 所示。

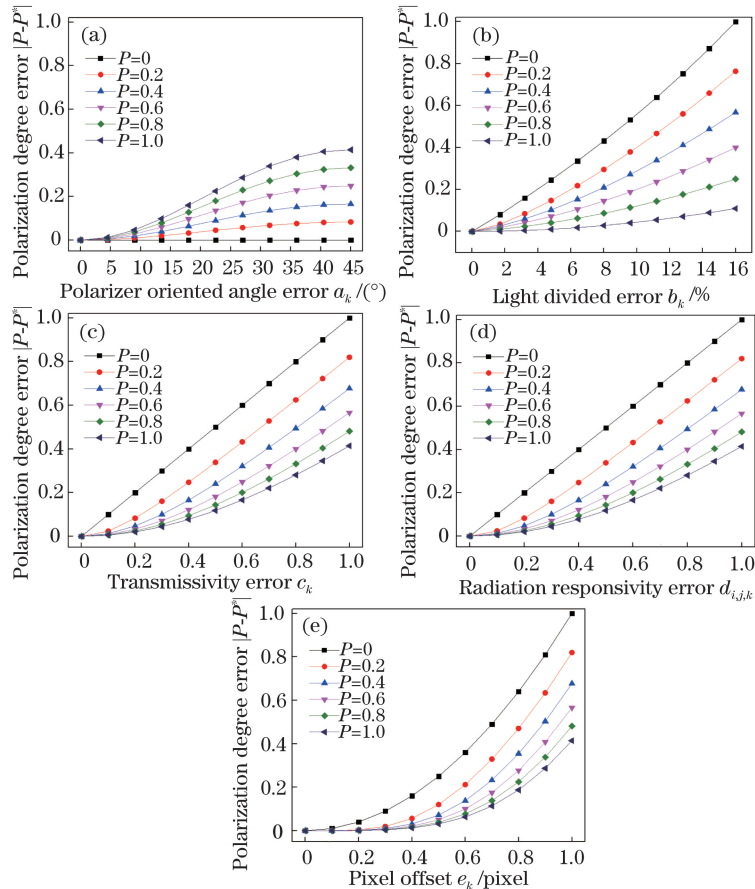


图 2 分束型偏振成像系统各项误差源引起的偏振度测量误差计算结果。(a)检偏角度误差 a_k ; (b)分光比例误差 b_k ;

(c)透过率非一致性误差 c_k ; (d)辐射响应率非一致性误差 $d_{i,j,k}$; (e)成像几何偏差 e_k

Fig. 2 Calculation results of polarization measurement errors caused by various error sources of beam splitting polarization imaging system. (a) Polarizer oriented angle error a_k ; (b) light divided ratio error b_k ; (c) transmissivity non-uniformity error c_k ; (d) radiation responsivity non-uniformity error $d_{i,j,k}$; (e) pixel offset e_k

设定探测系统入射光偏度 $P=0.4$, 偏振角 $A=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ$, 分别当偏振 45° 通道 (即 $k=2$) 存在误差项 $a_2, b_2, c_2, d_{i,j,k}, e_2$ 时, 根据 (2) 式、(3) 式和 (5) 式, 计算在探测系统的偏振度测量误差 $|A-A^*|$ 。结果如图 3 所示。

根据上述结果对各项系统误差源对探测系统偏振分量测量误差的影响作用进行分析: 实际探测系统中, 检偏角度误差 a_k 估计不超过 5° , 此时它引起的偏振度测量误差小于 0.02, 偏振角测量误差小于 5° , 影响并不十分显著; 完全等比例三束分光较为困难, 分光比例误差 b_k 估计在 $2\% \sim 10\%$ 之间, 对于偏振度和偏振角测量精度的影响皆不能忽视, 且偏

振度越小, 引起的误差越大; 各通道光学系统设计一致, 且器件采用相同规格, 透过率非一致性误差 c_k 估计不超过 0.2, 此时对于强偏光, 引起的偏振度测量误差小于 0.05, 对于弱偏光影响很大, 尤其对于无偏光, 会线性引入 0.2 偏振度的虚假偏振信息; 三通道虽然使用同规格 CCD, 但辐射响应率差异, 即非一致性误差 $d_{i,j,k}$ 达到 0.4 也是有可能的, 其对偏振度测量精度的影响程度与透过率非一致性误差 c_k 相当, 对偏振角测量精度的影响更甚; 通道间成像几何偏差 e_k 有 1~2 个像元也属常见, 严重影响测量精度, 但根据图中 e_k 与偏振度和偏振角测量误差呈二次和三次关系, 若是能够校正至 0.2 个像元,

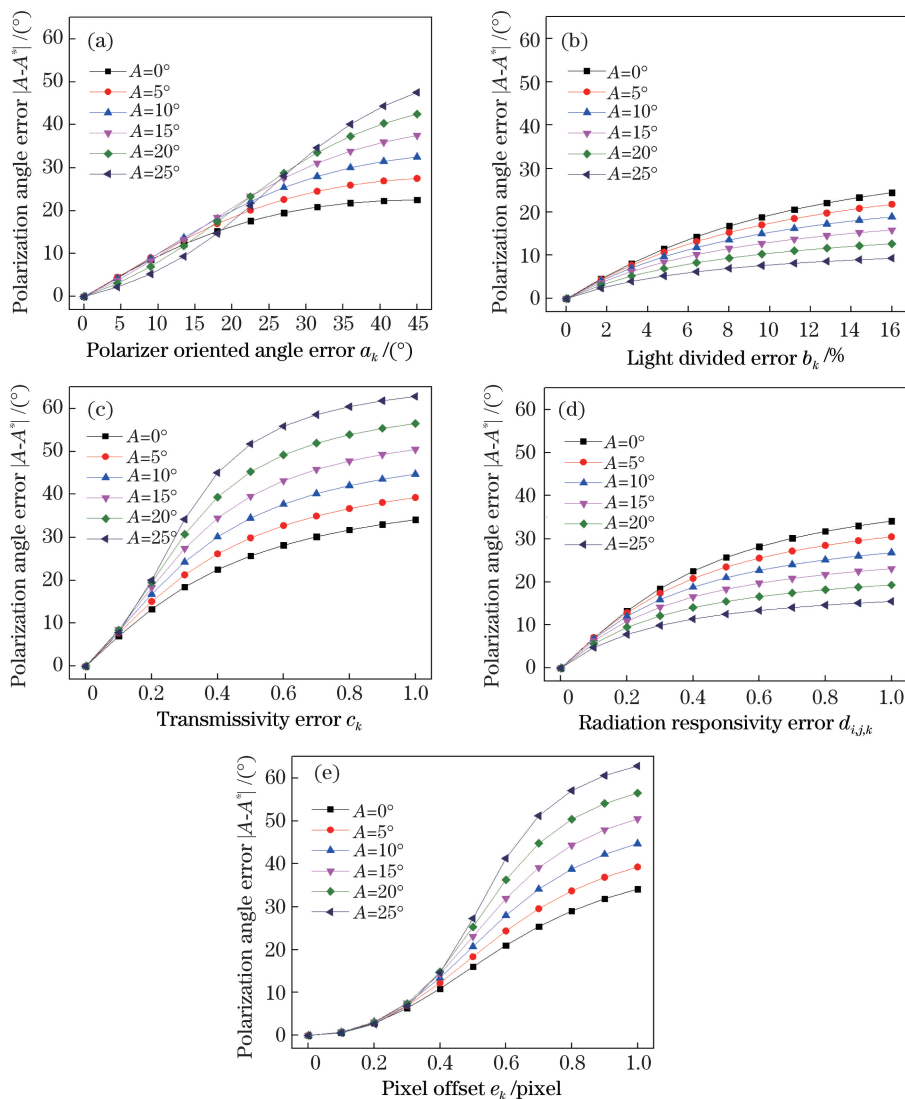


图 3 分束型偏振成像系统各项误差源引起的偏振角测量误差计算结果。(a)检偏角度误差 a_k ; (b)分光比例误差 b_k ; (c)透过率非一致性误差 c_k ; (d)辐射响应率非一致性误差 $d_{i,j,k}$; (e)成像几何偏差 e_k

Fig. 3 Calculation results of polarization angle measurement errors caused by various error sources of beam splitting polarization imaging system. (a) Polarizer oriented angle error a_k ; (b) light divided ratio error b_k ; (c) transmissivity non-uniformity error c_k ; (d) radiation responsivity non-uniformity error $d_{i,j,k}$; (e) pixel offset e_k

其误差影响程度尚可接受。

注意上述分析仅针对一个通道存在单项误差源的偏振探测误差影响情况,多通道存在多项误差源的情况组合较多,可根据前述误差模型进行分析计算,在此不作枚举。

3 定标与处理方法

分束型偏振成像系统的成像非均匀性、分光比例不一致性、辐射响应率差异、成像几何偏差、检偏角度误差皆属于固有的系统误差项,因此采用实验室测量进行标定和修正。由于上述系统误差项综合影响着最终的系统偏振探测精度,对其标定和修正应基于合理正确的处理流程逐个环节先后进行。

3.1 研究对象

定标与处理方法研究对象是从 Fluxdata 公司定制的三分束偏振成像相机,其中,CCD 相机型号为索尼 Sony ICX285AL,镜头型号是蔡司 Zeiss Planar NIR,系统主要参数如表 1 所示,其中 FPS 为帧频,FOV 为视场角。

表 1 偏振成像系统参数

Table 1 Polarization imaging system parameters

Parameter	Value
Detection band /nm	500-1000
Pixel number	1392 × 1040
Pixel size /($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	6.45 × 6.45
CCD size /($\text{cm} \times \text{cm}$)	24 × 36
Digitalizing bit	8 or 12
Max FPS /(frame/s)	30
Focal length /mm	51.7
Polarization angles /($^\circ$)	0,45,90
Camera FOV /($^\circ$)	10 × 7.6

3.2 定标与校准流程设计

第一步,各通道的成像非均匀性,即各像元之间的辐射响应率差异是各通道独立的固有特性,应最先进行标定和校正。

$$\text{DN}'_{i,j}(\theta_k) = K_{i,j,k} \text{DN}_{i,j}(\theta_k) + B_{i,j,k}, \quad (6)$$

式中: $\text{DN}'_{i,j}(\theta_k)$ 是经过均匀性校正之后的像素值; $K_{i,j,k}$ 和 $B_{i,j,k}$ 是通道 k 各像元均匀性校正系数。

第二步,解决各通道之间的辐射响应率差异性问题。这里可根据经典辐射定标方法,利用无偏光源建立各通道理论入射辐射量($L_{\text{in}}/3$)与各通道探测值之间的线性映射关系,

$$\begin{cases} \overline{\text{DN}}(0^\circ) = R(0^\circ) \cdot L_{\text{in}}/3 + V(0^\circ) \\ \overline{\text{DN}}(45^\circ) = R(45^\circ) \cdot L_{\text{in}}/3 + V(45^\circ), \\ \overline{\text{DN}}(90^\circ) = R(90^\circ) \cdot L_{\text{in}}/3 + V(90^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\overline{\text{DN}}$ 是各通道图像均值; $R(\theta_k)$ 和 $V(\theta_k)$ 是各通道辐射定标系数。

在实验室无偏光入射条件下测量并确定各通道的 $R(\theta_k)$ 和 $V(\theta_k)$,根据(7)式的方程组得到 $\overline{\text{DN}}(45^\circ)$ 、 $\overline{\text{DN}}(90^\circ)$ 与 $\overline{\text{DN}}(0^\circ)$ 之间的关系,从而利用下式得到经辐射响应率一致性校正后的 $\text{DN}''_{i,j}(\theta_k)$,使偏振 45° 、 90° 通道的辐射响应率与偏振 0° 通道一致,消除因分光比例、透过率、CCD 响应率差异综合引起的通道辐射响应不一致性。

$$\begin{cases} \text{DN}''_{i,j}(0^\circ) = \text{DN}'_{i,j}(0^\circ) \\ \text{DN}''_{i,j}(45^\circ) = \frac{R(0^\circ)}{R(45^\circ)} \cdot \text{DN}'_{i,j}(45^\circ) + \\ V(0^\circ) - \frac{R(0^\circ)V(45^\circ)}{R(45^\circ)} \\ \text{DN}''_{i,j}(90^\circ) = \frac{R(0^\circ)}{R(90^\circ)} \cdot \text{DN}'_{i,j}(90^\circ) + \\ V(0^\circ) - \frac{R(0^\circ)V(90^\circ)}{R(90^\circ)} \end{cases} \quad (8)$$

第三步,各通道检偏角度的标定和校正可独立进行,但由于检偏角度误差作用于(1)式中的斯托克斯参量计算矩阵中,而且根据前述误差分析,无偏光入射条件下,检偏角度误差对于各偏振通道辐射响应没有影响,因此可在基于无偏光源的辐射响应差异修正后,标定检偏角度误差 a_k 。

第四步,各通道成像几何偏差标定和校正主要根据各通道图像匹配进行,实际上是对数字图像的进行像元配准,虽然各通道之间的像差固定,但与前几步不同,并非是对探测系统的物理属性直接修正。而且,像素偏移量计算和配准依赖像素灰度值分布,也应在成像非均匀性和各通道辐射响应差异修正后进行,因此,成像几何偏差标定和修正放在最后一步。像素偏移校正表示为

$$\text{DN}'''_{i,j}(\theta_k) = \frac{\text{DN}''_{i+\langle\Delta x_k\rangle, j+\langle\Delta y_k\rangle}(\theta_k)}{(1 - |\Delta x_k - \langle\Delta x_k\rangle| \cdot |\Delta y_k - \langle\Delta y_k\rangle|)}, \quad (9)$$

式中: $\text{DN}'''_{i,j}(\theta_k)$ 是经像元偏差修正后的像素值; Δx_k 、 Δy_k 是偏振 45° 通道($k=2$)和偏振 90° 通道($k=3$)与偏振 0° 通道($k=1$)的行、列方向像素偏移量; $\langle\Delta x_k\rangle$ 和 $\langle\Delta y_k\rangle$ 是对 Δx_k 和 Δy_k 四舍五入的结果,其意义是先整数偏移像元位置,再根据余下的亚

像元偏移量补偿修正像素值。显然 $DN''_{i,j}(0^\circ) = DN'_{i,j}(0^\circ) = DN'_{i,j}(0^\circ)$ 。

最后,经过上述标定和校准计算各像元的斯托克斯参量。

$$\begin{bmatrix} I''_{i,j} \\ Q''_{i,j} \\ U''_{i,j} \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} 1 & \cos 2a_1 & \sin 2a_1 \\ 1 & \cos 2(45^\circ + a_2) & \sin 2(45^\circ + a_2) \\ 1 & \cos 2(90^\circ + a_3) & \sin 2(90^\circ + a_3) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} DN''_{i,j}(0^\circ) \\ DN''_{i,j}(45^\circ) \\ DN''_{i,j}(90^\circ) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$P''_{i,j} = \frac{\sqrt{Q''_{i,j}{}^2 + U''_{i,j}{}^2}}{I''_{i,j}}, A''_{i,j} = \frac{1}{2} \arctan \frac{U''_{i,j}}{Q''_{i,j}}, \quad (11)$$

式中: a_1, a_2, a_3 分别是偏振 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 通道的检偏角度误差。系统定标和校准流程如图 4 所示。

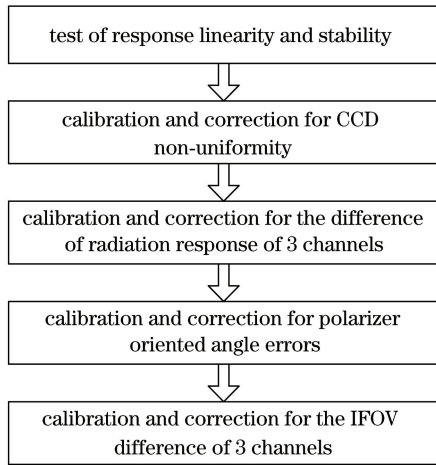


图 4 分束型同时偏振成像系统定标预处理流程图

Fig. 4 Flow chart of pre-processing calibration for beam splitting simultaneous polarization imaging system

3.3 成像非均匀性标定与校正

鉴于本系统的 CCD 是线性辐射响应,各探元间的响应差异可用一次线性方程进行标定和校正。利

用积分球均匀光源覆盖入射成像系统,如图 5 所示。设置不同的积分球出射光强度,得到多组图像均值和像元输出值。

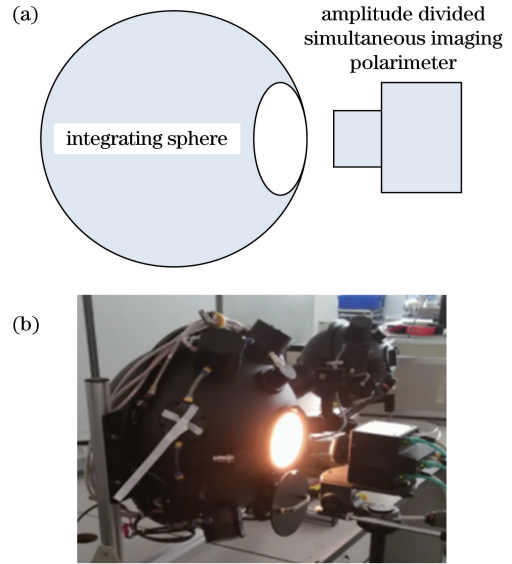


图 5 CCD 非均匀性标定系统。(a)示意图;(b)实物图

Fig. 5 Calibration system of CCD non-uniformity.

(a) Schematic diagram; (b) physical graph

选取积分球某一输出光强度下(积分球开启 4 盏灯时)的三通道原始图像,其各像元电计数值如图 6 所示。

三通道图像的像素值变化范围大致分别为 $[1100 \sim 1400], [1250 \sim 1600], [800 \sim 1600]$ 。将图像各像素值标准差比上图像均值来表示图像非均匀度 σ ,计算公式为

$$\sigma_k = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_N |DN_{i,j,k} - \overline{DN}_k|}}{\overline{DN}_k} \times 100\%, \quad (12)$$

式中: \overline{DN} 是图像均值; N 是像元个数; k 代表通道序号。

对于积分球不同输出强度(开启灯数不同)下的图像非均匀度计算结果如表 2 所示。

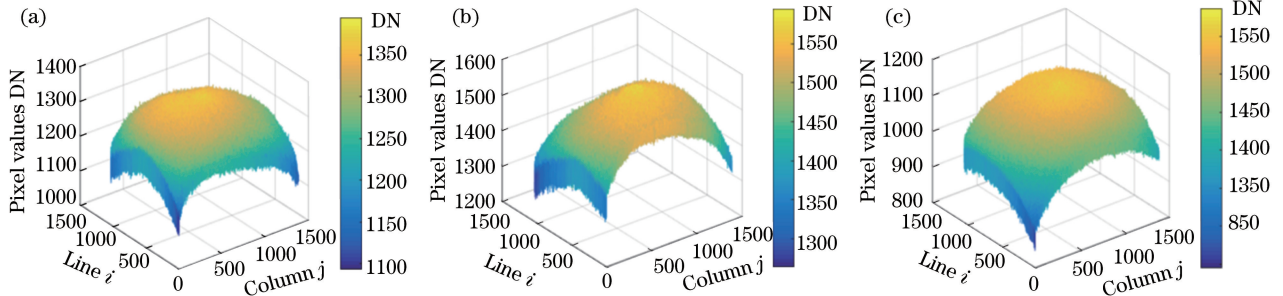


图 6 三通道原始图像像素值。(a)偏振 0° 通道图像;(b)偏振 45° 通道图像;(c)偏振 90° 通道图像

Fig. 6 Three-channel original image pixel value. (a) Image of 0° polarizer; (b) image of 45° polarizer; (c) image of 90° polarizer

表 2 三通道原始图像的不均匀度 σ
Table 2 Non-uniformity σ of three-channel original image

Light	original image			unit: %
	σ_1	σ_2	σ_3	
1	2.74	2.84	3.33	
2	2.57	2.76	2.94	
3	2.55	2.69	2.79	
4	2.42	2.71	2.72	
5	2.37	2.62	2.66	
6	2.38	2.62	2.62	
7	2.33	2.59	2.60	
8	2.39	2.60	2.58	
Average	2.47	2.68	2.78	

利用多点法求解每个像元的均匀性校正系数 $K_{i,j,k}$ 和 $B_{i,j,k}$,

$$\begin{cases} \overline{DN(\varphi_1)} = K_{i,j,k} DN_{i,j,k}(\varphi_1) + B_{i,j,k} \\ \overline{DN(\varphi_2)} = K_{i,j,k} DN_{i,j,k}(\varphi_2) + B_{i,j,k} \\ \vdots \\ \overline{DN(\varphi_n)} = K_{i,j,k} DN_{i,j,k}(\varphi_n) + B_{i,j,k} \end{cases}, \quad (13)$$

式中: $DN_{i,j,k}(\varphi)$ 是通道 k 在积分球输出光强为 φ 时各像元输出的电计数值; $\overline{DN_k}(\varphi)$ 是图像均值。

根据(6)式对进行图像均匀性校正,校正后图像像素值如图 7 所示,均匀性明显提高,三通道图像的像素值变化范围大致分别为[1280~1300],[1470~1530],[1050~1120]。

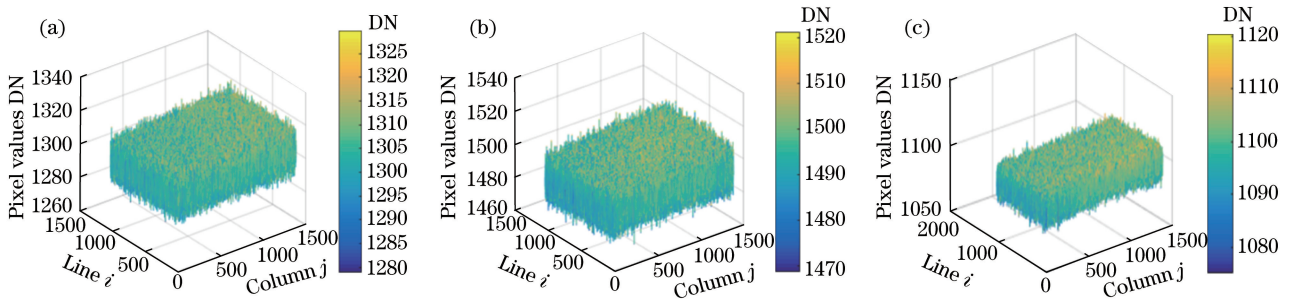


图 7 均匀性校正后三通道图像像素值。(a)偏振 0° 通道图像;(b)偏振 45° 通道图像;(c)偏振 90° 通道图像
Fig. 7 Three-channel image pixel value after uniformity correction. (a) Image of 0° polarizer; (b) image of 45° polarizer; (c) image of 90° polarizer

均匀性校正后三通道图像不均匀度计算结果如表 3 所示。经过校正后,三通道图像的不均匀度(图像标准差比均值)平均值由 2.64% 提高至 0.40%。

表 3 均匀性校正后三通道图像的不均匀度 σ

Table 3 Non-uniformity σ of three-channel image after uniformity correction

Light	after uniformity correction			unit: %
	σ_1	σ_2	σ_3	
1	0.82	0.80	0.95	
2	0.46	0.44	0.53	
3	0.40	0.36	0.44	
4	0.33	0.32	0.38	
5	0.29	0.27	0.33	
6	0.30	0.28	0.34	
7	0.26	0.24	0.31	
8	0.22	0.19	0.26	
Average	0.39	0.36	0.44	

利用光谱仪(型号:SVC HR-1024)对光源强度进行同步监测,可将三通道的输出结果校正到一致。实验系统如图 8 所示。

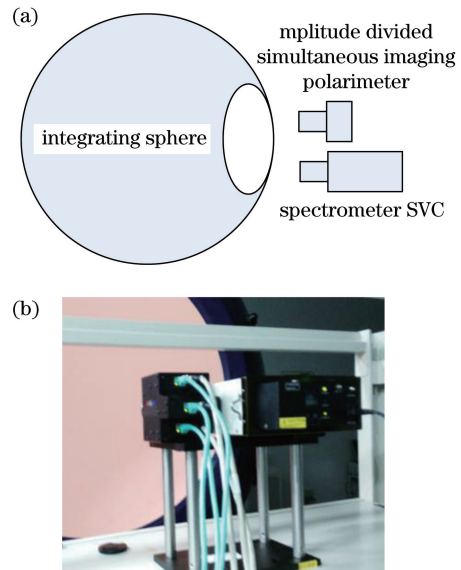


图 8 三通道辐射响应差异标定系统。(a)示意图;(b)实物图
Fig. 8 Three-channel radiation response difference calibration system. (a) Schematic diagram; (b) physical graph

3.4 多通道辐射响应差异标定与校正

三通道辐射响应差异是三通道的分光比例差异、光学透过率差异和探测器辐射响应差异的综合作用。采用积分球输出的无偏均匀光作为入射源,

根据多组积分球光源强度和探测器输出 DN, 根据(7)式求解出各通道辐射定标系数 $R(\theta_k)$ 和 $V(\theta_k)$, 将其代入(8)式, 得到

$$\begin{cases} DN''_{i,j}(0^\circ) = DN'_{i,j}(0^\circ) \\ DN''_{i,j}(45^\circ) = 0.84 \cdot DN'_{i,j}(45^\circ) - 13.84. \\ DN''_{i,j}(90^\circ) = 1.17 \cdot DN'_{i,j}(90^\circ) - 17.77 \end{cases} \quad (14)$$

分别对不同积分球光源强度(当开启 2、4、6、8 盏灯时)的探测图像进行校正。首先根据(6)式对三通道原始图像进行均匀性校正, 得到 $DN'_{i,j}(0^\circ)$ 、 $DN'_{i,j}(45^\circ)$ 、 $DN'_{i,j}(90^\circ)$, 然后根据(14)式得到辐射响应一致性校正后的像素值 $DN''_{i,j}(0^\circ)$ 、 $DN''_{i,j}(45^\circ)$ 、 $DN''_{i,j}(90^\circ)$, 分别求各通道的像素平均值, 结果如

表 5 辐射响应一致性校正前后三通道图像均值相对差异率

Table 5 Relative difference ratio of average DN of 3 channel images before and after radiation responsivity uniformity correction unit: %

Light		2	4	6	8	Average
ϵ_2	Original	15.34	16.45	17.14	17.23	16.54
	Corrected	-0.18	-0.21	0.09	0.00	-0.08
ϵ_3	Original	-19.59	-18.27	-17.32	-17.04	-18.06
	Corrected	-0.11	-0.42	0.10	0.14	-0.07

$$\begin{cases} \epsilon_2 = \epsilon(45^\circ) = \frac{\overline{DN}(45^\circ) - \overline{DN}(0^\circ)}{\overline{DN}(0^\circ)} \times 100\% \\ \epsilon_3 = \epsilon(90^\circ) = \frac{\overline{DN}(90^\circ) - \overline{DN}(0^\circ)}{\overline{DN}(0^\circ)} \times 100\% \end{cases} \quad (15)$$

经过校正, 偏振 45° 与偏振 0° 通道的辐射响应差异率平均由 16.54% 减小到 -0.08%, 绝对值降低了 16.47% ($= |16.54\%| - |-0.08\%|$); 偏振 90° 与偏振 0° 通道的辐射响应差异率平均由 -18.06% 减小到 -0.07%, 绝对值降低了 17.98% ($= |18.06\%| - |-0.07\%|$)。

3.5 检偏角度误差标定与校正

检偏角度误差标定与校正的目的是检测出各偏振通道偏振片的装配角度误差, 从而予以修正, 实验系统如图 9 所示。将分束型偏振成像系统对准实验室无偏光源(积分球)。在系统入瞳前端, 与其主光轴垂直放置一个消光性能良好的线偏振片。偏振片固定在电动转台上, 可电驱动旋转。

设计简单程序, 使电动转台与该待检偏振相机配合工作。电动转台共旋转 180° , 在此过程中, 每转 1° 转台记录偏振片角度, 同时偏振相机采集图像, 计算图像平均值, 经拟合形成分束型偏振成像系

表 4 所示。

表 4 辐射响应一致性校正后三通道图像均值
Table 4 Three-channel image average after radiation response uniformity correction

Light	2	4	6	8
$\overline{DN}(0^\circ)$	556.44	1138.65	1685.00	2249.34
$\overline{DN}(45^\circ)$	555.43	1136.24	1686.51	2249.34
$\overline{DN}(90^\circ)$	555.85	1133.84	1686.63	2252.58

计算偏振 45° 、 90° 通道与偏振 0° 通道图像均值的相对差异率 $\epsilon(45^\circ)$ 和 $\epsilon(90^\circ)$, 作为通道 k 的辐射响应差异率 ϵ_k ($\epsilon_1 = 0$), 对比较正前后的通道图像均值相对差异率, 如表 5 所示。

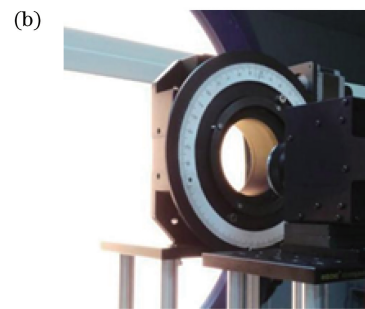
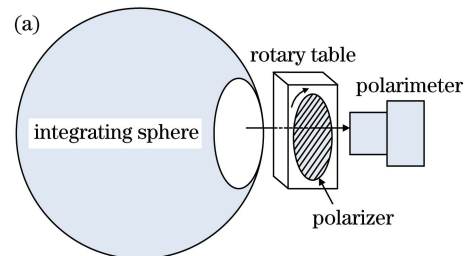


图 9 检偏角度标定系统。(a)示意图;(b)实物图
Fig. 9 Calibration system for polarizer oriented angle.

(a) Schematic diagram; (b) physical graph

统三通道像素均值随偏振片旋转角度变化的曲线, 如图 10 所示。

由图 10 可知, 三条拟合曲线极大值分别出现在 17.4° 、 60.7° 、 105.8° 。在极大值处, 偏振片快轴方向分别与系统三个通道的偏振方向一致。其中, 将

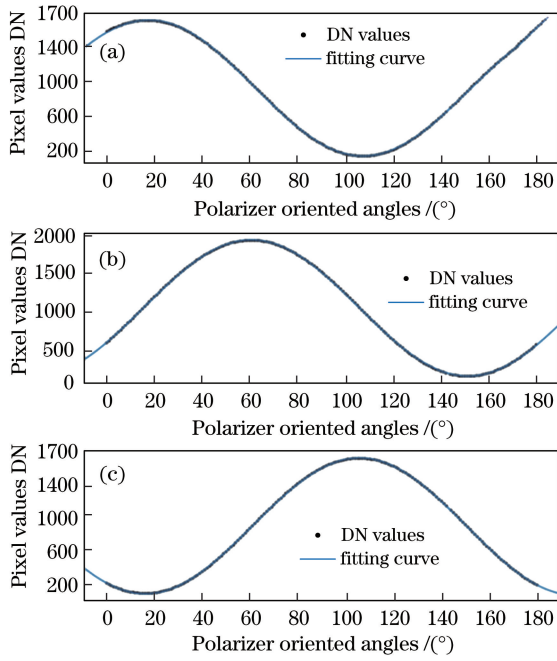


图 10 不同检偏角度下像素值的拟合曲线 (a) 偏振 0°通道; (b) 偏振 45°通道; (c) 偏振 90°通道

Fig. 10 Fitting curves of pixel values of different polarized angles. (a) 0° polarization channel; (b) 45° polarization channel; (c) 90° polarization channel

17.4°定为系统偏振 0°,得到系统三通道实际偏振方向,如表 6 所示。

表 6 偏振片方向角度检偏结果

Table 6 Measuring results of polarizer oriented angles

Nominal value / (°)	Measuring value / (°)	Polarizer oriented angle error / (°)
0	0.00	0.00
45	43.26	-1.74
90	88.32	-1.68

3.6 多通道几何像差标定与校正

分束型同时偏振成像系统,各偏振通道的光学系统和 CCD 相机,由于固有的装配误差,导致三通道成像之间必然存在一定的像差。这个像差由各通道视场差异造成,视场偏差是固定值。因此采用实验室测量方法进行标定。

固定分束型同时偏振成像系统,对准标准黑白棋盘格,系统主光轴与棋盘格平面垂直,拍摄成像。以偏振 0°通道图像为基准,分别检测并计算偏振 45°通道、偏振 90°通道图像与偏振 0°通道图像的匹配特征点对之间的平均偏移量,

$$\Delta P_{\text{offset}} = \frac{1}{N} \sum \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \quad (16)$$

式中: Δx 和 Δy 分别是特征点水平和垂直像素偏移量。基于加速稳健特征(SURF)算法分别将偏振 45°、90°通道图像与偏振 0°通道图像配准,并计算配准后图像匹配特征点偏移量,如此重复 10 次测量计算取平均。

最终结果为,以偏振 0°通道为基准,偏振 45°通道几何像差为 2.01,校正后降至 0.22。偏振 90°通道几何像差为 2.12,校正后降为 0.18。

4 校正精度评估与应用效果实验

4.1 校正精度评估

成像型偏振探测系统,每一个像元都是偏振信息探测器,利用均匀的偏振标准光源验证偏振探测精度可能并不充分。另一方面,本文系统误差标定主要基于对积分球均匀光源的实验室测量,以相同光源作为标准源进行校正精度验证可能不具有足够的可信度。

因此,在标准光源条件存在一定限制的情况下,使用系统探测误差理论计算分析的方法进行验证。将实验室标定的系统误差项,代入 2.2 节的系统误差模型中,通过计算比较校正前后偏振度和偏振角的系统探测误差,评估校正效果,对本文使用的分束型偏振成像系统标定和校准方法有一定程度的验证作用。

在前述标定和校准中,将分光比例误差、通道光学透过率、探测器辐射响应率、各像元响应率不一致性误差,综合等效为通道辐射响应差异率和各通道图像非均匀度进行了标定和修正。即在(5)式表示的系统误差模型中,代表上述误差和传递环节的 $(\frac{1}{3} + b_k) \cdot (1 - c_k) \cdot (1 + d_{i,j,k})$ 对应调整为 $(1 - \epsilon_k) \cdot (1 + \sigma_k)$, 式中 ϵ_k 和 σ_k 分别是通道 k 的辐射响应差异率和图像非均匀度,那么(5)式可改为

$$DN_{i,j}^*(\theta_k) = [1 + P \cdot \cos 2(\theta_k + a_k - A)] \cdot (1 - \epsilon_k) \cdot (1 + \sigma_k) k_{i,j,k} \cdot (1 - e_k^2) A_d \cdot L_{in} \quad (17)$$

总结前述对(17)式中系统各项误差的标定结果,如表 7 所示。注意,由于标定检偏角度误差、通道辐射响应非一致性、像元偏差时以偏振 0°通道为基准,因此 a_1, ϵ_1, e_1 的数值均为 0; 检偏角度偏差并非直接消除,而是代入斯托克斯参量计算矩阵中 [(10)式] 进行修正,因此表 7 中校正前后 a_k 的值未变。

表 7 系统误差项标定值

Table 7 Calibration values of system errors

Error	$\theta_k / (^\circ)$	$a_k / (^\circ)$	ε_k	σ_k	e_k
Before correction	0	0.00	0.0000	0.0247	0.00
	45	-1.74	0.1654	0.0268	2.01
	90	-1.68	-0.1806	0.0278	2.12
After correction	0	0.00	0.0000	0.0039	0.00
	45	-1.74	-0.0008	0.0036	0.22
	90	-1.68	-0.0007	0.0044	0.18

分别设定不同偏振态(偏振度 P 和偏振角 A)的光源入射探测系统,将系统各项误差 a_k 、 ε_k 、 σ_k 、 e_k 校正前后的数值代入(17)式中计算,分别得到校正前系统各通道像元计数值 $[DN_{i,j}^*(0^\circ), DN_{i,j}^*(45^\circ), DN_{i,j}^*(90^\circ)]$ 和校正后像元计数值 $[DN_{i,j}''(0^\circ), DN_{i,j}''(45^\circ), DN_{i,j}''(90^\circ)]$ 。由于校正前像差 $e_k > 1$ 时,说明通道对应像元完全错开,为了能够进行探测

误差计算,将其校正前 e_k 设为 0。

在计算斯托克斯参量时使用的计算矩阵有所区别,校正前由于检偏角度误差未知,应按检偏角度标称值代入矩阵运算,即将 $[DN_{i,j}^*(0^\circ), DN_{i,j}^*(45^\circ), DN_{i,j}^*(90^\circ)]$ 代入(2)式、(3)式中,计算得到校正前的偏振分量探测结果 $[I_{i,j}^*, Q_{i,j}^*, U_{i,j}^*, P_{i,j}^*, A_{i,j}^*]$ 。

标定后检偏角度误差已知,将 $[DN_{i,j}''(0^\circ), DN_{i,j}''(45^\circ), DN_{i,j}''(90^\circ)]$ 和 $[a_1, a_2, a_3]$ 代入(10)式、(11)式,得到校正后的偏振分量探测结果 $[I_{i,j}'', Q_{i,j}'', U_{i,j}'', P_{i,j}'', A_{i,j}'']$ 。

在不同偏振态光源(不同偏振度 P 和偏振角 A)入射探测系统的情况下,分别计算校正前和校正后的系统偏振度探测误差 $|P - P_{i,j}^*|$ 和 $|P - P_{i,j}''|$, 对比结果如图 11 所示;分别计算校正前和校正后的系统偏振角探测误差 $|A - A_{i,j}^*|$ 和 $|A - A_{i,j}''|$, 对比结果如图 12 所示。

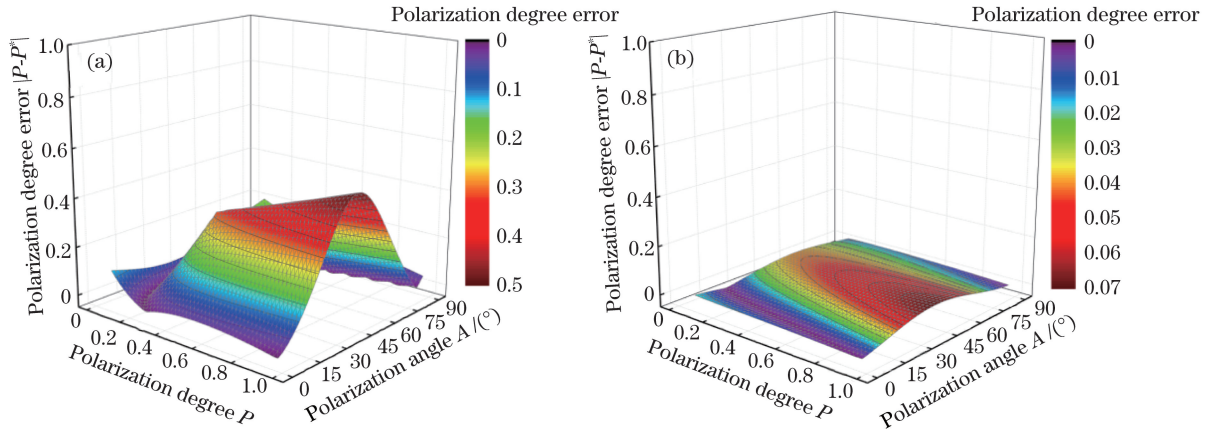


图 11 分束型偏振成像系统误差校正前后偏振度测量误差对比。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 11 Comparison of polarization degree measurement error before and after correction for amplitude divided imaging polarimeter. (a) Before correction; (b) after correction

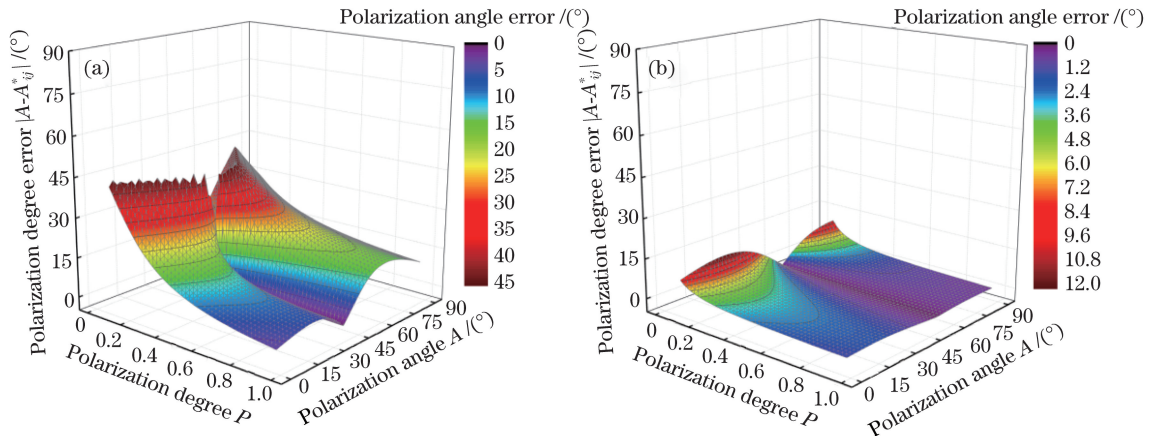


图 12 分束型偏振成像系统误差校正前后偏振角测量误差对比。(a)校正前偏振角测量误差;(b)校正后偏振角测量误差

Fig. 12 Comparison of polarization angle measurement error before and after correction for amplitude divided imaging polarimeter. (a) Before correction; (b) after correction

由图 11 和图 12 可以看出,经过系统误差标定和校正后,分束型偏振成像系统的偏振测量误差明显降低。偏振度最大测量误差由校正前的 0.50 降低至校正后的 0.07,偏振角最大测量误差由校正前的 45.00° 降低至校正后的 12.16° ,而且这是未考虑校正前像元偏移误差情况下系统偏振测量误差计算结果。

4.2 应用效果实验

利用分束型同时偏振成像系统对实验室周边建筑进行拍摄,设置焦距为无穷远,光圈调节为 F11,积分时间设置为 1 ms。成像目标距离探测系统约为 300 m,天气状况良好,大气起偏效应可忽略不计。系统成像探测得到的原始图像,经本文方法进行校准之后,根据(1)式计算得到斯托克斯分量图像,进而利用通用计算公式得到线偏振度图像和偏振角图像,可增强目标边缘特征,以及不同材质表面粗糙度等物理特性的显示度。如图 13 所示。

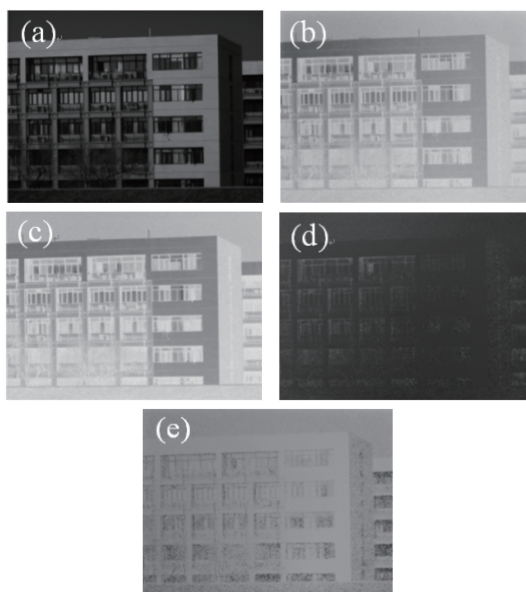


图 13 经预处理后获得的斯托克斯参量图像。(a) I 分量图像;(b) Q 分量图像;(c) U 分量图像;(d) 偏振度图像;(e) 偏振角图像

Fig. 13 Stokes parameter images after preprocessing. (a) Image of I parameter; (b) image of Q parameter; (c) image of U parameter; (d) image of polarization degree; (e) image of polarized angle

对各分量图像进行简单的偏振信息伪彩色融合,结果如图 14 所示。在融合图像中,大楼窗框是金属材料,其反射光偏振特性较强,因此在图中也被突显出来。

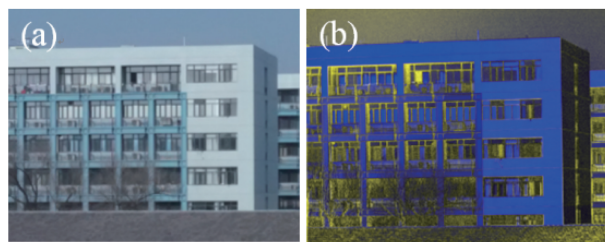


图 14 原始图像与偏振融合后图像对比。(a)原始图像;(b)偏振融合图像

Fig. 14 Comparison between original image and polarization fusion image. (a) Original image; (b) polarization fusion image

5 结 论

通过理论计算,分析了分束型同时偏振成像相机的 CCD 非均匀性、三通道辐射响应差异、成像几何差异、检偏角度误差因素对偏振探测精度的影响和误差贡献。针对这些因素,提出了定标和预处理方法,消除了上述系统偏差,为正确建立仪器穆勒矩阵提供必要准备。

研究表明,对分光不均、辐射响应、几何配准等因素的先期校准,是分束型同时偏振成像系统应用的先期必要基础,可作为同时偏振图像的通用处理流程。

然而,对于分束型同时偏振成像系统是否具有非线性起偏效应,以及系统误差校准方法在偏振光源下的适用性和精度验证,有待基于偏振盒等设备开展进一步的实验研究。

参 考 文 献

- [1] Zhang Y J, Wang X, He S. Polarization properties of rough surfaces based on polarized bi-directional reflectance distribution function [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0329002.
章延隽, 王霞, 贺思. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙表面偏振特性 [J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0329002.
- [2] Tao Z, Liu J M, Zhang C W, et al. Compact polarized spectrometer based on spatial modulation of polarization state [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(5): 557-564.
陶泽, 刘佳敏, 张传维, 等. 基于偏振态空间调制的紧凑型偏振光谱仪 [J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(5): 557-564.
- [3] Wang J J, Liang L, Li S, et al. Correction and implementation of polarization-difference imaging model for underwater target [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1111003.

- 汪杰君, 梁磊, 李树, 等. 水下目标偏振差分成像模型修正与实现 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1111003.
- [4] Ju H J, Liang J, Zhang W F, et al. Simultaneous, real-time, chromatic polarimetric imaging technology with full-polarization-state detection [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(6): 744-748.
巨海娟, 梁健, 张文飞, 等. 全偏振态同时探测实时彩色偏振成像技术 [J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(6): 744-748.
- [5] Fan H M, Kang Q, Qiu Z W, et al. Polarization calibration for multi-spectral aperture-divided simultaneous detection system [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0228001.
范慧敏, 康晴, 裘桢炜, 等. 多光谱分孔径同时探测系统偏振定标方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0228001.
- [6] 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.
- [7] 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. 基于斯托克斯椭偏测量系统的多点定标法 [J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1108013.
- [8] 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.
- [9] Hou J F, Wang D G, Deng Y Y, 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.
- [10] Li S, Qiu Z W. Polarization orientation calibration of simultaneous imaging polarimeter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(12): 4100-4104.
李双, 裘桢炜. 同时偏振成像仪检偏方位校正研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(12): 4100-4104.
- [11] Weng J W, Yuan Y L, Zheng X B, et al. Method for measuring response non-uniformity of polarization channels in directional polarization camera [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0828001.
翁建文, 袁银麟, 郑小兵, 等. 多角度偏振成像仪偏振通道响应非一致性测量方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0828001.
- [12] Kang Q, Yuan Y L, Li J J, et al. Polarization calibration methods of channel-type polarization remote sensor [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2015, 10(4): 343-349.
康晴, 袁银麟, 李健军, 等. 通道式偏振遥感器偏振定标方法研究 [J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(4): 343-349.