

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.04.009

## 多波段偏振成像仪的实验室定标研究

丁满超<sup>1,2</sup>, 翟文超<sup>2</sup>, 张 权<sup>2</sup>, 庞伟伟<sup>2</sup>, 李 新<sup>2\*</sup>, 郑小兵<sup>2</sup>

( 1 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;

2 中国科学院安徽光学精密机械研究所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 )

**摘 要:** 介绍一种多波段偏振成像仪的集成设计及实验室偏振定标方案。通过可调偏振度光源验证仪器偏振定标精度, 在 $10^\circ$ 视场内, 当光源偏振度低于0.6时, 仪器490 nm通道偏振度测量相对误差优于1.6%, 670 nm通道偏振度测量相对误差优于1.7%。设计了多波段偏振成像仪的系统软件, 详细介绍了各个功能模块及自动化观测算法, 通过敦煌辐射校正场外场试验, 验证了仪器野外运行的稳定性以及系统软件设计的合理性与实用性。

**关键词:** 偏振成像仪; 偏振定标; 敦煌辐射校正场; 像元配准

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)04-0303-010

## Laboratory Calibration of a Multi-Band Polarization Imager

DING Manchao<sup>1,2</sup>, ZHAI Wenchao<sup>2</sup>, ZHANG Quan<sup>2</sup>, PANG Weiwei<sup>2</sup>,  
LI Xin<sup>2\*</sup>, ZHENG Xiaobing<sup>2</sup>

( 1 Institute of Environment Science and Photoelectric Technology, University of Science and Technology of China,  
Hefei 230026, China;

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

**Abstract:** The integrated design and laboratory calibration method of a multi-band polarization imager were presented. The polarization calibration accuracy was validated by a polarized light source whose degrees of polarization (DOP) is adjustable. The results showed that the relative DOP errors of 490 nm and 670 nm band are less than 1.6% and 1.7%, respectively, when the DOP of the polarized light source is less than 0.6. The software system of the multi-band polarization imager was designed as well, and the function modules

**基金项目:** Supported by National Natural Science Foundation of China(国家自然科学基金, 61505222), Director's Fund of Anhui Institute of Optical Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences(中国科学院安徽光学精密机械研究所所长基金, AGHH201503)

**作者简介:** 丁满超 (1991 -), 男, 研究生, 主要从事遥感器偏振定标方面的研究。

**E-mail:** mchding@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 郑小兵 (1969 -), 男, 安徽合肥人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学精密测量的先进方法与仪器、卫星光学传感器的高精度定标、光学遥感和海洋光学、辐射定标等方面的研究。 **E-mail:** xbzheng@aiofm.ac.cn

**收稿日期:** 2018-03-28; **修改日期:** 2018-05-03

\* **通信联系人.** E-mail: xli@aiofm.ac.cn

and automatic observation algorithm of the software were described in detail. Finally, the field operation stability of the instrument as well as the function and practicability of software design were verified by its field deployment in Dunhuang radiation calibration site, Gansu, China.

**Key words:** polarization imager; polarization calibration; Dunhuang radiation calibration site; pixel registration.

## 1 引言

传统的成像技术通过目标强度探测, 获得目标二维空间的光强分布, 形成直观影像, 实现目标的观测、识别等功能。偏振成像技术在此基础上额外获得目标的光谱信息和偏振特性信息(偏振度、偏振角等), 具有目标综合信息获取的显著优势, 在目标探测、生物医学、天文观测、大气遥感等<sup>[1-6]</sup>方面展现出广泛的应用前景和价值。

就偏振探测方式而言, 主要有分时偏振探测<sup>[7]</sup>和分振幅同时偏振探测<sup>[8,9]</sup>方式。分时偏振探测方式主要采用机械旋转偏振光学元件, 分时序获得不同偏振方向的目标光辐射信息, 此种方法主要适用于静态目标的观测。分振幅探测方式通过光路的多路分束并在每个分束光路中内置固定偏振方向的偏振片, 实现多个偏振光路的同时观测, 具有实时观测的优势。

本文采用商品化的三分束偏振相机, 通过集成滤光片转轮、二维运动转台, 实现了一种多角度观测的多波段偏振成像仪。下文详细介绍了该多波段偏振成像仪的软硬件设计和实验室定标方法。利用该设备在敦煌辐射校正场开展了外场试验, 对成像仪软硬件设计进行了实地检验, 获得了场地反射辐射的偏振特性的初步结果。

## 2 多光谱偏振成像仪

### 2.1 多光谱偏振成像仪的集成设计

多波段偏振成像仪, 主要由成像仪头部和二维转台组成。成像仪头部集成了偏振相机, 滤光片转轮和通讯路由, 三维模型参见图 1(a)。偏振相机是商品化的三分束同时成像 CCD 相机, 内部光路采用分振幅型探测光路<sup>[10]</sup>, 如图 1(b) 所示, 偏振相机使用 3 个 CCD 探测器, 每个 CCD 前安装偏振片, 偏振片相对参考方向的角度分别为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ , 即探测器 1 的偏振方向为  $0^\circ$ , 探测器 2 的偏振方向为  $45^\circ$ , 探测器 3 的偏振方向为  $90^\circ$ , 相机可实现对目标的同时偏振观测。滤光片转轮共 5 个通道, 包括三个光谱通道(目前仅安装  $490\text{ nm}$  和  $670\text{ nm}$  带通滤光片), 一个全色通道(无任何光学器件)和一个遮光通道(安装遮光板)。遮

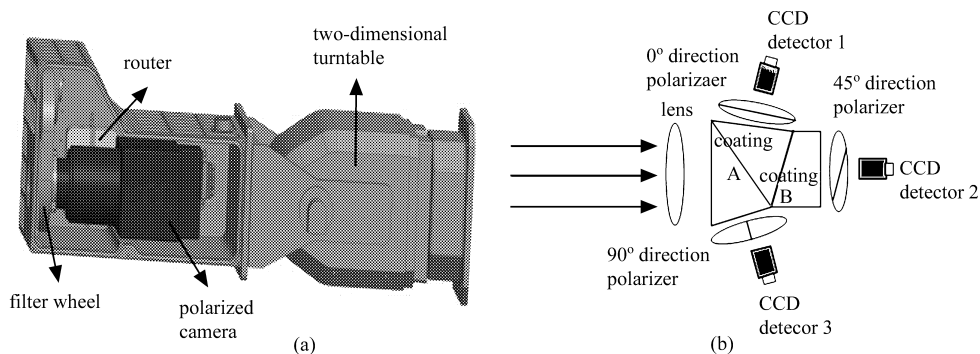


图 1 (a) 多波段偏振成像仪三维模型图; (b) 偏振相机内部组件<sup>[10]</sup>

Fig.1 (a) 3D model of multi-band polarized imager; (b) internal components of the polarized camera<sup>[10]</sup>

光通道用于获得本底信号, 依次切换至滤光片位置, 可实现多光谱观测, 切换至全色通道, 可实现全色偏振探测。通讯路由, 主要用于偏振相机和上位机软件的通讯 (使用 GigE Version 标准的网络协议)。偏振成像仪吊装在二维转台上, 二维转台用于改变偏振成像仪的观测天顶角和方位角进而改变成像仪的观测几何, 实现多角度偏振观测的功能。

## 2.2 偏振探测原理

采用 Stokes 向量法描述光的偏振态, 用参量  $I, Q, U, V$  来表述, 如公式 (1) 所示

$$S = [IQUV]^T, \quad (1)$$

其中  $I$  为非偏振分量,  $Q, U$  为两个方向上的线偏振分量,  $V$  为圆偏振分量, 在自然界中, 地表反射的圆偏振分量较小, 故暂不考虑, 默认  $V = 0$ 。简化推导过程可得,

$$I_{\text{out}} = \frac{1}{2}(I + Q \cos 2\theta + U \sin 2\theta), \quad (2)$$

公式 (2) 中,  $I_{\text{out}}$  是 CCD 相机的探测光强,  $\theta$  是偏振片透光轴相对参考方向的角度。多波段偏振成像仪有三个偏振探测方向 ( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ), 根据公式 (2), 可联立三个方程

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2a & \sin 2a \\ 1 & \cos 2b & \sin 2b \\ 1 & \cos 2c & \sin 2c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{\text{out}a}/T_0 \\ I_{\text{out}b} \\ I_{\text{out}c}/T_2 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $a, b, c$  表示偏振探测方向,  $I_{\text{out}a}, I_{\text{out}b}, I_{\text{out}c}$  各自偏振方向探测的光强,  $T_0, T_2$  表示  $a$  方向,  $c$  方向相对  $b$  方向的相对透过率。根据公式 (3) 可得到  $I, Q, U$ , 进而利用公式 (4) 得到入射光  $S$  的偏振度  $P$

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}. \quad (4)$$

## 3 多波段偏振成像仪的实验室偏振定标

多波段偏振成像仪在正式使用前, 进行了实验室偏振定标, 本章详细介绍多波段偏振成像仪的实验室偏振定标方案和流程。

### 3.1 瞬时视场的图像配准

多波段偏振成像仪采用棱镜分光的分振幅同时成像光路, 进行偏振成像探测。由于仪器内部使用了 3 个独立的 CCD 以及探测通道, 光学器件的偏差和 CCD 的安装误差, 可能造成同时成像的 3 幅图像存在

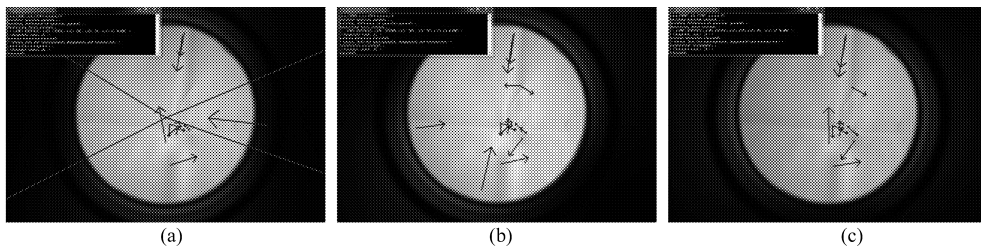


图 2 图像特征点提取与标记。(a)  $0^\circ$  偏振方向特征点; (b)  $45^\circ$  偏振方向特征点; (c)  $90^\circ$  偏振方向特征点

Fig.2 Extraction and mark of image feature points. (a)  $0^\circ$  polarized direction feature point; (b)  $45^\circ$  polarized direction feature point; (c)  $90^\circ$  polarized direction feature point

像元位置偏差,因此图像处理过程中首先需要对图像进行配准,即在同一坐标系中将三幅图像对齐。主要采用基于 SIFT 算法<sup>[11]</sup>检测图像中的特征点,进行图像配准。

图 2 的图像是偏振成像仪 490 nm 光谱通道对灰阶靶标的成像。图中箭头的尾部是特征点位置,箭头的方向是特征点的方向。根据表 1 所示,0° 偏振方向探测器 1 和 45° 偏振方向探测器 2 的特征点对的欧式距离小于一个像素,可不必进行额外对齐,45° 方向探测器 2 和 90° 方向探测器 3 的特征点对的欧式距离约为 8 个像素,对表 1 中 45° 方向和 90° 方向的特征点对的坐标进行差值, X 坐标相差约 8 个像素, Y 坐标相差约 2 个像素,在做图像处理时,需要进行配准。

表 1 图像的特征点坐标

Table 1 The feature point coordinates of the images

Detector 1(0°)	Euclidean distance	Detector 2(45°)	Euclidean distance	Detector 3(90°)
(502.1,732.7)	0.57	(502.5,732.3)	8.47	(510.6,734.8)
(509.4,712.8)	0.92	(508.7,712.2)	8.27	(516.7,714.3)
(527.6,738.8)	0.50	(527.3,738.5)	8.38	(535.3,741.0)
(532.3,799.7)	0.72	(531.9,799.1)	7.88	(539.6,800.8)
(550.3,741.5)	0.72	(549.7,741.1)	7.91	(557.4,742.9)
(683.7,716.7)	0.78	(683.1,716.2)	8.27	(691.1,718.3)

### 3.2 偏振片透光轴检偏

多波段偏振成像仪采用分振幅探测原理,定标偏振片透光轴相对参考方向的角度对系统 Mueller 矩阵的推导具有重要意义。实验仪器主要有可见波段检偏器,步进电机转台,积分球无偏光源。

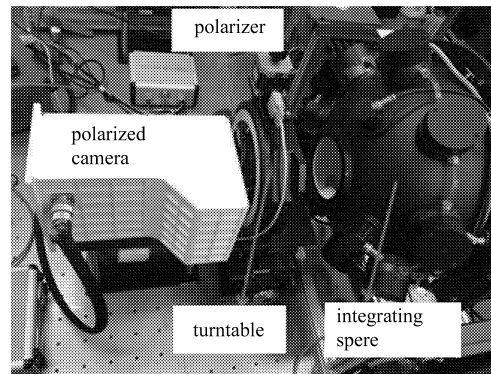


图 3 仪器内部偏振片透光轴检偏实验图

Fig.3 Experiment diagram of polarizer transmissive axis direction detection

图 3 所示实验过程中,需要屏蔽杂散光,实验在暗室中进行。转动外部偏振片,根据仪器测得的信号的变化,通过数据处理可获得内部偏振片的透光轴方向。外部偏振片固定在步进电机上,步进电机旋转角度采用 10° 间隔,旋转范围 [0°, 180°],拍摄 19 次图像。数据处理采用正弦函数拟合,仪器内部的第一个偏振片的透光轴方向作为基准 0° 方向,其余两个偏振片的透光轴方向为相对 0° 偏振片透光轴方向的角度。图 4 是两波段检偏结果,两波段偏振片的相对角度见表 2。

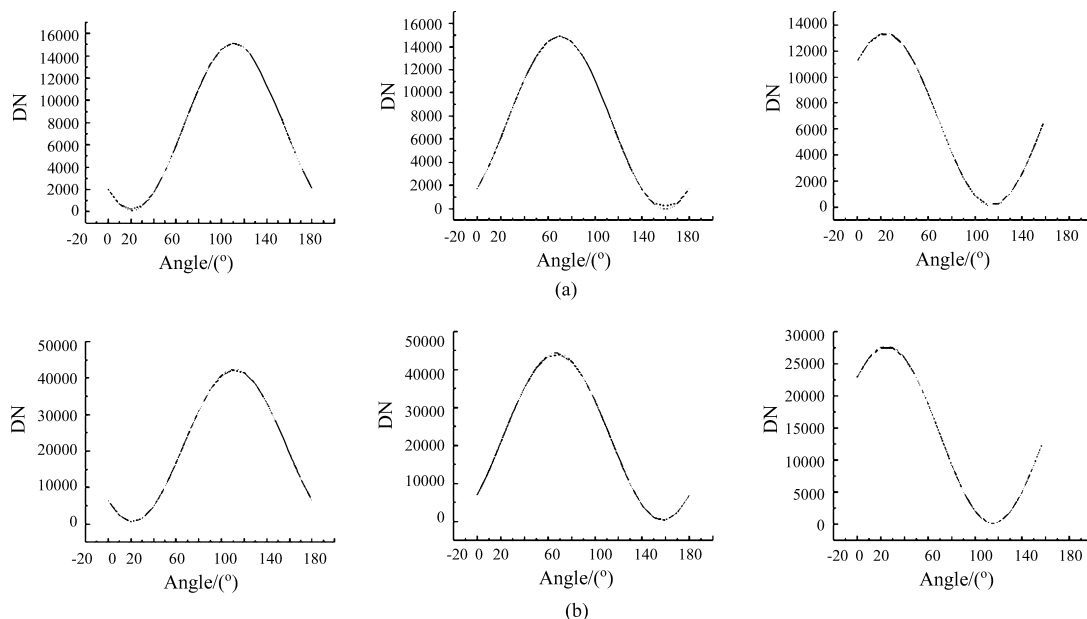


图 4 (a)490 nm 检偏结果; (b)670 nm 检偏结果

Fig.4 (a) Result of 490 nm; (b) result of 670 nm

表 2 相对角度

Table 2 Relative polarization direction

Band	Detector 1 angle(°)	Detector 2 angle(°)	Detector 3 angle(°)
490 nm	0	41.29	87.03
670 nm	0	44.36	86.61

### 3.3 CCD 面阵均匀性校正

CCD 响应的不均匀程度 (PRUN) 可以用各光敏元件在二分之一饱和曝光量的条件下, 均匀曝光时, 各自输出信号的标准差与其平均响应的比值来表示。采用“一点校正法”, 即每一个光敏像素的实际响应, 与 CCD 10° 视场的面阵范围内所有光敏像素响应值的平均值做相对校正<sup>[10]</sup>。

$$\bar{V} = \frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} V_{i,j}, \tag{5}$$

$\bar{V}$  是响应平均值,  $V_{i,j}$  表示第  $(i, j)$  个像素的响应值,  $NM$  为所统计的视场内像素总数。每个像元的校正系数  $h_{i,j}$  为

$$h_{i,j} = \frac{\bar{V}}{V_{i,j}}. \tag{6}$$

经过均匀性校正后的响应值  $V''_{i,j}$  和实际探测值为  $V'_{i,j}$  的关系为

$$V''_{i,j} = h_{i,j}V'_{i,j}. \tag{7}$$

对 CCD 面阵均匀性校正时移除了光路上的步进电机转台和检偏器校正效果如图 5, 图中所示为 490 nm 波段三个偏振通道对积分球光源 (无偏) 的成像及校正结果。670 nm 通道结果与此类似, 不再赘述。

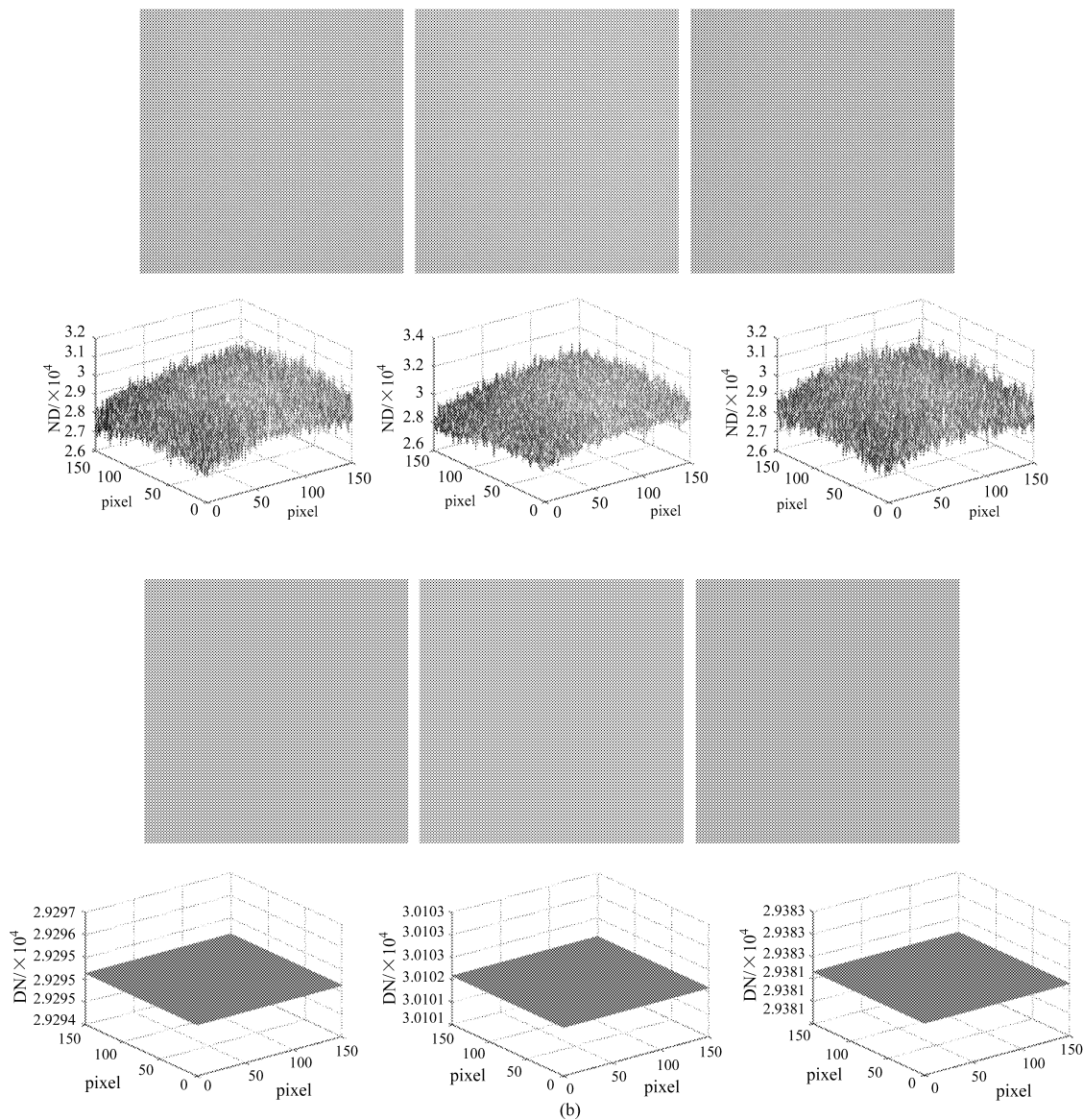


图 5 (a) 原始图像; (b) 校正后图像

Fig.5 (a) Original images; (b) corrected images

### 3.4 相对透过率

相对透过率为在一束无偏光输入条件下, 偏振相机三个偏振方向探测的响应值的相对比值。实验在二分之一饱和曝光量的条件下, 均匀曝光, 使用各自 CCD 相机  $10^\circ$  视场范围内的各光敏元件响应的平均值, 作为相对校正的系数。

$$\bar{V}_1 = h_2 \bar{V}_2 = \dots = h_n \bar{V}_n, \quad (8)$$

$\bar{V}_1$  表示第一个 CCD 探测器响应平均值,  $\bar{V}_n$  表示第  $n$  个 CCD 探测器响应平均值。则相对通道透过率系数  $h_i$  为

$$h_i = \frac{\bar{V}_1}{\bar{V}_i}, \tag{9}$$

处理后的响应平均值  $\bar{V}_i''$  和实际探测平均值为  $= \bar{V}_i'$  的关系为:

$$\bar{V}_i'' = \bar{V}_i' h_i. \tag{10}$$

相对透过率以  $45^\circ$  偏振方向透过率为基准, 不同波段的通道间的相对透过率见表 3。

表 3 不同波段的通道间相对透过率

Table 3 Ratio of relative transmission between channels in different bands

Band(nm)	Detector 1	Detector 2	Detector 3
490	0.978	1	0.986
670	1.031	1	0.530

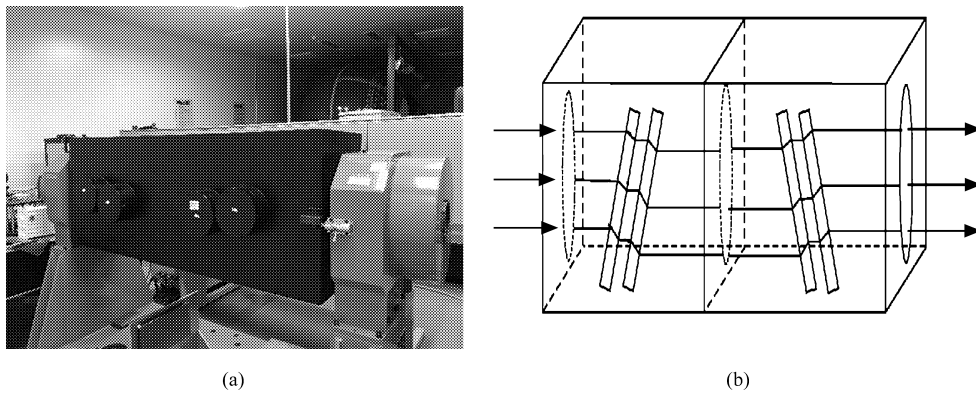


图 6 (a) 可调偏振度光源调节器; (b) 调节器的原理图 [12]

Fig.6 (a) Adjustable degree of polarization light source regulator; (b) Schematic diagram of the regulator [12]

表 4 仪器实际测量数据

Table 4 Actual measurement data of instrument

Band(nm)	Actual value	Measurement value	Error	Relative error
	0	0	.....	.....
490	0.05	0.0494	-0.0006	1.2%
	0.2	0.2022	0.0022	1.1%
	0.3	0.3036	0.0036	1.2%
	0.6	0.6097	0.0097	1.6%
	0	0	.....	.....
670	0.05	0.0507	0.0007	1.4%
	0.2	0.1966	-0.0034	1.7%
	0.3	0.2951	-0.0049	1.6%
	0.6	0.5946	-0.0054	0.9%

### 3.5 偏振定标精度验证

采用可调偏振度光源<sup>[11]</sup>验证了偏振定标的结果,如图6所示。积分球为无偏光,入射进入可调偏振度光源的偏振盒,出射相应偏振态的线偏振光,使用多波段偏振成像仪进行偏振探测,实验表明仪器偏振度测量相对误差优于1.6%(490 nm 通道)和1.7%(670 nm 通道),如表4所示。

## 4 系统软件设计方案

系统软件用于实现多波段偏振成像仪的控制以及后续的数据处理。根据设计目标,设计了软件的各个模块。软件包含了仪器组件控制模块,实验室定标模块,数据处理模块,自动观测模块及其自动观测算法。

### 4.1 控制模块

控制模块的功能是进行仪器的控制,如图8所示,包括相机的控制模块,滤光片转轮控制模块和二维转台控制模块。相机模块的主要功能是对相机的控制,包括相机的硬件连接,图像曝光增益设置,图像的采集,存储和显示。图像显示采用伽玛变换,进行图像锐化处理显示,原始图像数据保持不变。滤光片转轮模块主要进行光谱通道的切换,实现多波段拍摄。二维转台模块控制仪器的观测几何。

### 4.2 数据处理模块和实验室定标模块

数据处理模块,集成实验室定标参数,进行图像配准,获得图像之间的变换关系,检测偏振片透光轴方向,获得实际透光轴相对方向,CCD面阵均匀性校正,获得图像像素级的校正系数,检测相对透过率,获得相对透过率校正系数,带入公式(3)和(4)计算,获得图像的偏振度。程序最终将图像数据处理成为偏振度数值并将结果保存在文本文件中。

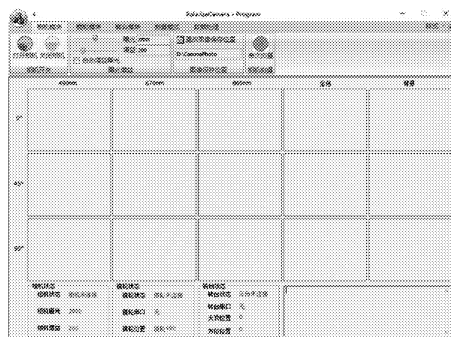


图7 多波段偏振成像仪的软件界面

Fig.7 Graphic user interface of the multi-band polarized imager software

### 4.3 自动化观测模块

针对场地自动化观测,设计了两种自动观测模式,定点长时间观测模式和场地多角度观测模式。定点长时间观测模式,固定成像仪的观测几何,设置拍摄时间间隔和总时长,偏振成像仪针对同一目标或场景进行连续自动化拍摄,计时结束则自动结束拍摄。场地多角度观测模式,通过程序控制二维转台运动,实现多角度自动观测。算法流程如图9(a)所示,多角度观测模式运动轨迹简图见图9(b)。算法输入参数包括:设置天顶测量角度间隔和测量范围,设置方位测量角度间隔和测量范围,设置每个位置成像仪采集次数。每个位置P通过3个标识进行标记,记为 $P(\theta_1, \theta_2, A/Z)$ ,其中 $\theta_1$ 表示天顶角, $\theta_2$ 表示方位角, $A$ 和 $Z$ 分别表示方位角移动和天顶角移动。例如, $P1(60^\circ, 0^\circ, A)$ 表示P1位置的天顶角度是 $60^\circ$ ,方位角度是 $0^\circ$ ,移动类型为方位角移动。



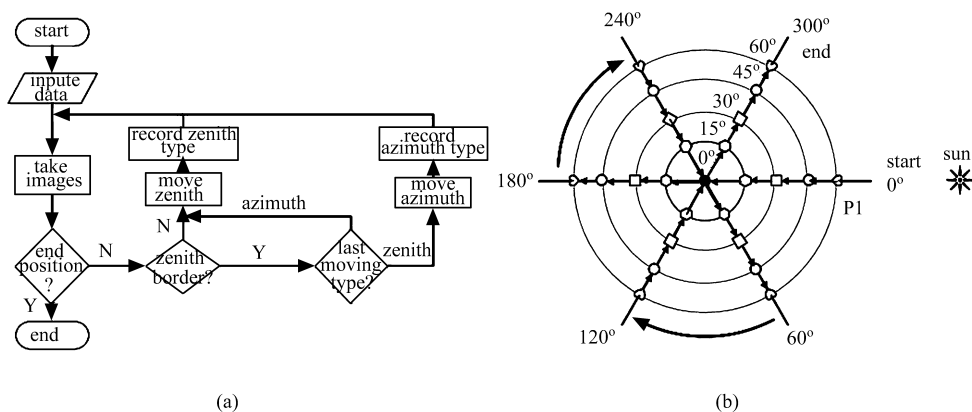


图 8 (a) 场地自动观测算法流程; (b) 场地观测测量位置点

Fig.8 (a) Algorithm flow of automatic site observation; (b) measurement positions

### 5 外场实验验证

在敦煌辐射校正场外场实验中, 使用多波段偏振成像仪测量场地反射辐射多角度偏振分布。图 10(a) 是实验现场图。仪器倒装在塔吊的吊篮上, 进行场地观测。图 10(b) 为实验结果数据, 测量过程中, 使用了系统软件的场地多角度观测模式进行测量, 算法输入参数包括: 设置天顶测量角度间隔和测量范围 (天顶间隔  $15^\circ$ , 测量范围  $[-60^\circ, 60^\circ]$ ), 设置方位测量角度间隔和测量范围 (方位间隔  $30^\circ$ , 测量范围  $[0^\circ, 360^\circ]$ ), 设置每个位置成像仪拍摄次数 (3 次), 测量位置共 54 个。多角度观测模式可以将一轮扫描时间可缩短在 15 min 以内, 减少了因太阳位置的改变, 造成的测量误差, 场地多角度偏振度分布, 参见图 10(b) 和 (c)。此次外场实验验证了仪器野外运行的稳定性以及系统软件设计的合理性与可用性。

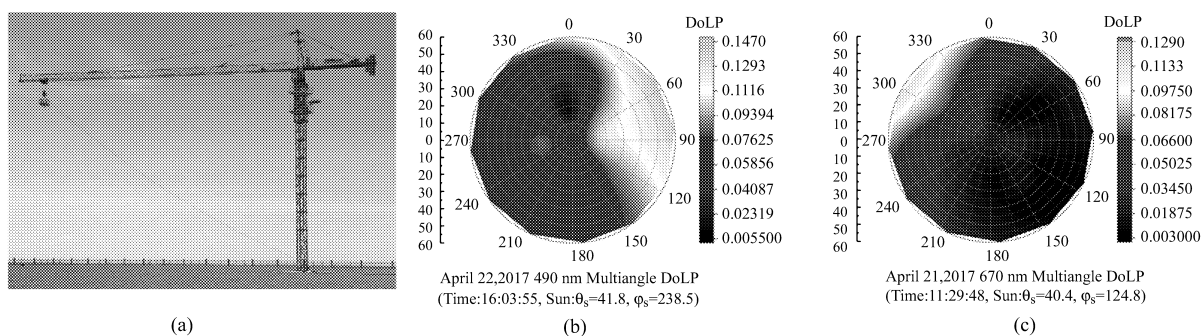


图 9 (a) 实验现场照片; (b)490 nm 波段多角度偏振分布; (c)670 nm 波段多角度偏振分布

Fig.9 (a) Photo of the field experiment; (b) multi-angle polarized distribution of 490 nm band; (c) multi-angle polarized distribution of 670 nm band

### 6 结 论

设计了多波段偏振成像仪, 并详细介绍了其实验室偏振定标流程和结果。结合仪器的应用, 设计了偏振成像仪的软件系统, 通过敦煌外场实验, 验证了仪器野外运行的稳定性和系统软件设计的合理性。仪器现阶段主要用于场地的偏振测量, 后续将针对海面耀斑, 目标识别做进一步研究。

## 参考文献：

- [1] Duggin M J, Loe R S. Calibration and exploitation of a narrowband imaging polarimeter [J]. *Optical Engineering*, 2002, **41**(5):1039-1047.
- [2] Gendre L, Bigué L. Full Stokes polarimetric imaging using a single ferroelectric liquid crystal device [J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(8): 081209.
- [3] Zeng H L, Zhang M W, Liu Z, et al. Experiment of Target Detection Based on Polarization Imaging Using Polarization Parameter [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016(2): 22-26(in Chinese).  
曾恒亮, 张孟伟, 刘 征, 等. 利用偏振特性因子的偏振成像目标探测实验 [J]. *光电工程*, 2016(2): 22-26.
- [4] He H H, Zeng N, Liao R, et al. Progresses of Polarization Imaging Techniques and Their Applications in Cancer Detections [J]. *Progress in Biochemistry & Biophysics*, 2015, **52**(5): 419-433(in Chinese).  
何宏辉, 曾 楠, 廖 然, 等. 偏振光成像技术用于肿瘤病变检测的研究进展 [J]. *生物化学与生物物理进展*, 2015 **52**(5): 419-433.
- [5] Wang G H, Guo Z D, Zhu H, et al. Capability Analysis of Polarized Light Celestial Positioning [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 11-14(in Chinese).  
王光辉, 郭正东, 朱 海, 等. 偏振光天文导航定位能力分析 [J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 11-14.
- [6] Wang G C, Wang J L, Zhang Z D, et al. Influence on Space Target Polarization Imaging Detection Resulting from Atmospheric Turbulence [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(4):131-137(in Chinese).  
王国聪, 王建立, 张振铎, 等. 大气湍流对空间目标偏振成像探测的影响 [J]. *光子学报*, 2016, **45**(4):131-137.
- [7] Zhang H Y, Li Y, Yan C X, et al. Calibration of polarized effect for time-divided polarization spectral measurement system [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2017, **25**(2): 325-333(in Chinese).  
张海洋, 李 颀, 颜昌翔, 等. 分时偏振光谱测量系统的起偏效应校正 [J]. *光学精密工程*, 2017, **25**(2): 325-333.
- [8] Luo J, Liu D, Xu P T, et al. High-Precision Polarizing Beam Splitting System Based on Polarizing Beam Splitter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(12): 239-245(in Chinese).  
罗 敬, 刘 东, 徐沛拓, 等. 基于偏振分光棱镜的高精度偏振分光系统 [J]. *中国激光*, 2016, **43**(12): 239-245.
- [9] Cheng M X, He Z J, Huang Z H. Polarimeter System of Stokes Parameters Based on Division-of-Amplitude [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5): 93-97(in Chinese).  
程敏熙, 何振江, 黄佐华. 分振幅法偏振光斯托克斯参量测量系统 [J]. *光电工程*, 2008, **35**(5): 93-97.
- [10] Huang W J. *Research on Pre-Processing Methods of Dispersive Simultaneous Imaging Polarization Camera* [D]. Hefei: Master's thesis of University of Science and Technology of China, 2016(in Chinese).  
黄文娟. 三分束同时成像偏振相机预处理方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学硕士论文, 2016.
- [11] Lowe D G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91-110.
- [12] Li J J, Sun X B, Kang Q, et al. Polarization detection accuracy analysis of spectropolarimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(1): 230021-230027(in Chinese).  
李金金, 孙晓兵, 康 晴, 等. 偏振光谱仪偏振探测精度分析 [J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(1): 230021-230027.