

文章编号 1004-924X(2018)04-0816-09

## 天空实时全偏振成像探测器设计与搭建

陈永台, 张 然, 林 威, 褚金奎\*

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:**生物利用天空偏振光进行导航的方式给科研人员很大的启发,越来越多的学者正在进行这方面的研究。精确的天空偏振场图是进行偏振导航的前提条件,为了获取更加准确的天偏振场图,许多成像式偏振探测装置被开发出来。本文提出了一种新型的实时全偏振一体式成像探测传感器,可以获取全参数 Stokes 矢量,进而解算出目标的 AOP、DOP、LDOP 和 CDOP 等信息。基于 C++ 语言和 OpenCV 库,采用 MFC 架构开发了上位机程序,实现了目标偏振信息的实时显示。在最大分辨率下,视频流的刷新率为 3 frame/s,基本满足了实时探测的需要。对晴朗天气条件下天空偏振场图进行了实际探测,实验过程中探测器性能稳定,天空偏振场图与瑞利散射模型具有较高的一致性,太阳子午线动态识别误差为  $0.01^{\circ}\sim 0.23^{\circ}$ ,初步证明了探测器的可靠性,为后续工作奠定了基础。

**关键词:**偏振成像探测;偏振导航;天空偏振场图;图像处理

**中图分类号:**O436.3;V249.32 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182604.0816

## Design and construction of real-time all-polarization imaging detector for skylight

CHEN Yong-tai, ZHANG Ran, LIN Wei, CHU Jin-kui\*

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

\* Corresponding author, E-mail: chujk@dlut.edu.cn

**Abstract:** Researchers have been highly inspired by the bio-use of polarized light navigation, and increasing number of studies are being conducted at the same time. A precise sky polarization field map is one of the prerequisites for polarization navigation and many imaging polarization detectors have thus been developed for attaining a more accurate sky polarization field map. This study proposes a novel real-time all-polarization imaging detector that can obtain all the parameters of the Stokes vector, and can thereby calculate various attributes of Angle of Polarization (AOP), Degree of Polarization(DOP), Degree of Linear Polarization(LDOP), and Degree of Circular Polarization (CDOP). By incorporating the MFC architecture through C++ programming language and the OpenCV library, the host computer program was developed for implementing the real-time display function of a target's polarization information. Refresh rate of the video stream was 3 frame/s at maximum resolution, which primarily satisfies the need of real-time detection. Observation of the sky polarization field map

收稿日期:2017-07-19;修订日期:2017-08-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51675076, No. 51505062);国家自然科学基金创新研究群体项目(No. 51621064);中央高校基本科研业务费资助项目(No. DUT17GF109);联合基金资助项目(No. 6141B08100303)

was performed under clear weather conditions and the performance of the detector was found to be stable during the course of the proposed experiment. The obtained experimental results are in good agreement with the Rayleigh scattering model, and the dynamic recognition deviation of the solar meridian can range from  $0.01^\circ$  to  $0.23^\circ$ , which corroborates the reliability of the proposed detector and lays the foundation for future work.

**Key words:** polarization imaging detection; polarization navigation; sky polarization field map; image processing

## 1 引言

太阳光经大气中粒子散射后在整个天宇范围内形成稳定的天空偏振模式,这个模式被称作天空偏振场图<sup>[1-2]</sup>,天空偏振场图与太阳位置密切相关。太阳子午线是天空偏振场图的特征之一,它与太阳位置随时间同步变化,具有较高的稳定性和规律性。相比传统的导航方式,偏振导航的自主性和抗电磁干扰能力强,误差不随时间积累,有较高的鲁棒性<sup>[3]</sup>,可以作为新的导航手段<sup>[4-5]</sup>。天空偏振场图的探测与分析对于构建偏振导航传感器系统环境的特征模型,明确偏振导航传感器的应用外场条件,具有非常重要的意义<sup>[6]</sup>。

相比点源式偏振探测器,成像式偏振探测传感器由于其较好的直观性、交互性以及较大的视场和分辨率受到越来越多的关注和研究。2002年,国外学者 Craig A. Farlow 等人研制了一种全偏振参量成像探测装置,但该装置体积庞大,只能固定在室内平台上,无法应用于室外实验<sup>[7]</sup>。2010年, Xiaojin Zhao 和 Amine Bermak 等人发明了一种应用于可见光范围内的全 Stokes 矢量微偏振阵列<sup>[8]</sup>。我国在该领域的研究起步较晚。2001年,安徽光机所的乔延利等设计了一种航空光谱偏振 CCD 相机,并进行了相关实验研究<sup>[9]</sup>。2005至今,大连理工大学褚金奎课题组对不同天气条件下的天空偏振模式进行了一系列研究,并应用于实际导航<sup>[10-17]</sup>。2009年~2011年,北京大学晏磊等研究了利用天空偏振模式进行导航的方法<sup>[18-19]</sup>。2013年,清华大学的赵开春等搭建了一套天空光偏振模式自动探测装置,并进行了相关实验研究<sup>[6]</sup>。2014年,合肥工业大学高隼等提出了多次散射因素下天空偏振模式解析模型并进行了实验验证<sup>[20]</sup>。2015年,国防科技大学曹毓等学者研制了一种集成化的天空偏振模式探测装置,

并进行了相关实验研究<sup>[21-22]</sup>。国内还有许多相关研究,但目前能够实现全偏振实时探测的一体式成像系统鲜有报道。

为了更高效地获取目标的偏振信息,需要提高成像式偏振探测器的实时性和偏振全参性,为多信息偏振融合提供支撑。本文根据天空光偏振模式的形成机理<sup>[23-24]</sup>和偏振光探测方法<sup>[25-27]</sup>,充分参考了国内外偏振探测仪器的设计方案<sup>[28]</sup>,构建了一种可以获取全参数 Stokes 矢量的全偏振实时成像探测器,并对其性能进行了初步测试,以及天空偏振场图探测的动态实验研究。

## 2 天空偏振场图形成机理及探测方法

### 2.1 Rayleigh 散射

太阳光在大气层传播过程中会发生散射,根据产生散射的微粒的大小,散射可分为 Rayleigh 散射和 Mie's 散射<sup>[6,25]</sup>。Rayleigh 散射是由直径比光线波长小得多的微粒引起的,而 Mie's 散射是由等于或大于光线波长的微粒引起的。天空在晴朗条件下主要存在由大气分子和少量气溶胶引起的 Rayleigh 散射。

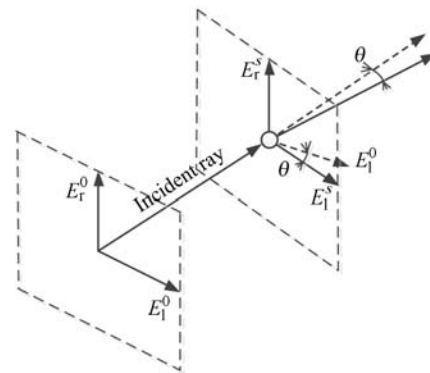


图1 Rayleigh 散射示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Rayleigh scattering

Rayleigh 散射的过程如图 1 所示,光线入射到粒子后发生  $\theta$  角度的散射。定义  $E_r^0$  与  $E_l^0$  分别为太阳光发出自然光的垂直分量和水平分量,光线经过粒子散射后激发出散射电场分量  $E_r^s$  与  $E_l^s$ ,  $E_r^0$  与  $E_r^s$  互相平行,而  $E_l^0$  与  $E_l^s$  成  $\theta$  角,因此,  $E_l^s$  与  $E_l^0 \cos \theta$  成正比。光强可以由  $I = E^2$  表示,因此有:

$$\begin{cases} I_r^0 \propto I_r^s \\ I_l^0 \cos^2 \theta \propto I_l^s \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知, Rayleigh 散射改变了光的偏振状态。偏振度(Degree of Polarization, DOP)定义为:

$$P(\theta) = \frac{I_r(\theta) - I_l(\theta)}{I_r(\theta) + I_l(\theta)} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)得:

$$P(\theta) = \frac{1 - \cos^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} = \frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} \quad (3)$$

由式(3)可知,当  $\theta$  为  $0^\circ$  和  $180^\circ$  时,偏振度等于 0,此时无偏振状态,散射光为自然光;当  $\theta$  为  $90^\circ$  时,偏振度为 1,此时散射光为完全偏振光;当  $\theta$  取其它值时,偏振度位于 0 和 1 之间,此时散射光为部分偏振光。但在实际中,由于大气中微粒的多次散射以及地表反射,散射光的偏振度会降低,这种现象被称作退偏作用。在地球上的固定观测点观察天空某一时刻的散射光时,由于不同天球点散射角度不同,其偏振度也有很大的差别,且整个天球上的偏振度分布满足一定的规律,这种规律可以用天空偏振场图来描述<sup>[6,15]</sup>,如图 2 所示。

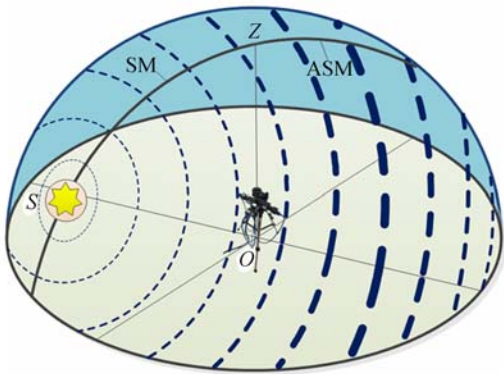


图 2 天空偏振场原理图

Fig. 2 Schematic map of sky light polarization pattern

## 2.2 偏振描述与计算

Stokes 矢量模型是描述偏振光的一种常用

方法<sup>[29]</sup>,其优点在于宏观可测量性。Stokes 矢量是具有强度的量,拥有 4 个参数,分别是:  $I, Q, U, V$ ,即  $S = [I \ Q \ U \ V]^T$ ,每个参数的定义如下:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90^\circ} \\ I_0 - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中:  $I$  表示光的总强度,  $Q$  表示  $0^\circ$  方向偏振分量和  $90^\circ$  方向偏振分量的强度差,  $U$  表示  $45^\circ$  方向偏振分量和  $135^\circ$  方向偏振分量的强度差,  $V$  表示右旋圆偏振分量和左旋圆偏振分量的强度差。根据定义, DOP 是完全偏振光强占整个光强的比例,它可以表示如下<sup>[30]</sup>:

$$DOP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}}{I} \quad (5)$$

当  $V=0$  时,求得线偏振度为:

$$LDOP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (6)$$

当  $Q=0, U=0$  时,求得圆偏振度为:

$$CDOP = \frac{\sqrt{V^2}}{I} \quad (7)$$

进一步地, AOP 可以通过下式计算:

$$AOP = \frac{1}{2} \arctan \left[ \frac{U}{Q} \right] \quad (8)$$

只要求得 Stokes 参量的 4 个参数,就可以计算出天空偏振场图信息 DOP、LDOP、CDOP 和 AOP。经过进一步解算,可以从天空偏振场图中获取需要的导航信息<sup>[6,27,31]</sup>。

## 3 偏振成像探测器设计

### 3.1 探测器硬件系统

为了获取天空偏振场图,本文搭建了一种实时全偏振成像探测器,光路原理和实物图如图 3 所示。传感器光路主要由非偏振分光棱镜、中继透镜、四分之一波片和偏振片组成,其放置位置如图 3 所示。光路的入口安装有大广角鱼镜头,出口有 4 个工业相机接收偏振调制后的图像。安装角度  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $135^\circ$  为偏振片极化方向在系

统坐标系投影与 X 轴正向的夹角,且四分之一波片快轴在系统坐标系投影与 X 轴平行。目标表面反射光进入系统后,由非偏振分光棱镜分为 4 路光束,每路光束再经偏振器件调制得到相应偏振态的出射光,对 4 种不同偏振态的图像进行反演解算出目标的全偏振信息。

将本系统中 4 个光路的穆勒矩阵分别记为  $M_{\text{path}0^\circ}$ ,  $M_{\text{path}45^\circ}$ ,  $M_{\text{path}90^\circ}$  和  $M_{\text{path}135^\circ}$ , 它们分别表述为:

$$M_{\text{path}0^\circ} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$M_{\text{path}45^\circ} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$M_{\text{path}90^\circ} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$M_{\text{path}135^\circ} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

分别取  $M_{\text{path}0^\circ}$ 、 $M_{\text{path}45^\circ}$ 、 $M_{\text{path}90^\circ}$  和  $M_{\text{path}135^\circ}$  的首行向量并自上而下组成系统穆勒矩阵,记为  $A$ :

$$A = \begin{bmatrix} 0.125 & 0.125 & 0 & 0 \\ 0.125 & 0 & 0.125 & 0 \\ 0.125 & -0.125 & 0 & 0 \\ 0.125 & 0 & 0 & -0.125 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

将 4 个光路得到的光强度值分别用  $i_0, i_{45}, i_{90}, i_{135}$  表示,自上而下组成列向量  $I$ ,则有:

$$I = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{45} \\ i_{90} \\ i_{135} \end{bmatrix} = A \cdot S = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}. \quad (14)$$

在  $I = A \cdot S$  的两边同时乘以  $A^{-1}$  则有:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot I = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 4 & 0 \\ 4 & 0 & -4 & 0 \\ -4 & 8 & -4 & 0 \\ 4 & 0 & 4 & -8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{45} \\ i_{90} \\ i_{135} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

对式(15)进行整理后有:

$$\begin{cases} I = 4i_0 + 4i_{90} \\ Q = 4i_0 - 4i_{90} \\ U = -4i_0 + 8i_{45} - 4i_{90} \\ V = 4i_0 + 4i_{90} - 8i_{135} \end{cases}. \quad (16)$$

通过式(16)中的 4 个参数  $I, Q, U, V$ , 就可以计算出天空偏振场图信息 DOP、LDOP、CDOP 和 AOP。

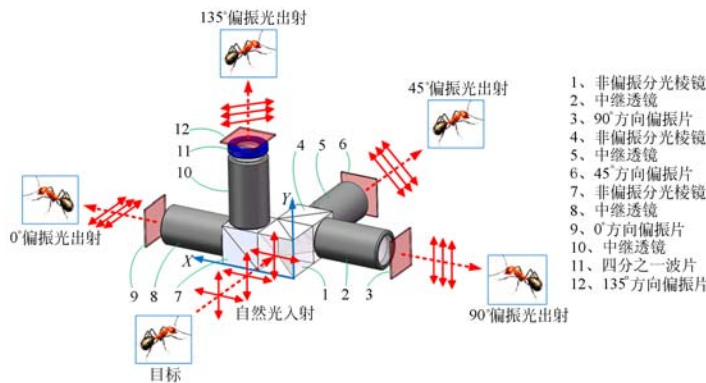


图 3 探测器光路原理图及实物图

Fig. 3 Principle diagram of light path and photo of sensor

### 3.2 探测器上位机程序开发

基于 C++ 语言和 OpenCV, 采用 MFC 架构开发了上位机程序, 其流程图如图 4 所示。

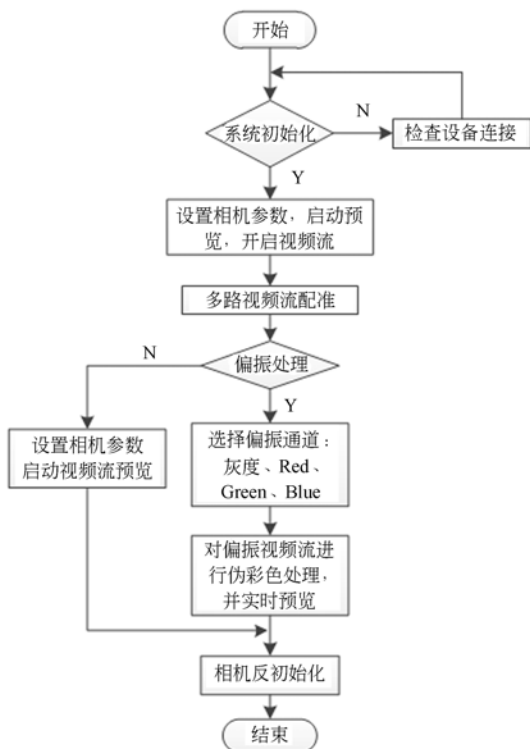


图 4 实时全偏振成像探测器的程序流程图

Fig. 4 Program flow chart of real-time all-polarization imaging detector

本程序主要包括相机参数设置模块、图像预处理模块、图像配准模块、视频流偏振处理模块和采集模块等 5 个部分。其中, 图像配准模块可实现亚像素水平的配准。视频流偏振处理模块可通过灰度、Red、Green 和 Blue 4 个通道的选择来适应不同的目标颜色背景, 获取最优目标偏振特征。通过偏振视频流伪彩色处理, 将目标从灰度空间映射到伪彩色空间, 实现目标偏振特征分布的直观化, 其中, 通过设置不同的阈值可以突出显示感兴趣区域的偏振特征。

这里提到的探测器具有实时偏振探测的功能。图像配准后, 分别提取 4 台工业相机视频流中同时刻的一帧图像, 对此 4 帧图像进行偏振处理。根据目标探测需要, 通过设置预览视场获得不同的分辨率。采用最大分辨率进行视频流偏振处理时, 由于数据量大, 处理速度会降低, 但也能实现偏振视频流 3 frame/s 的刷新率, 基本实现

了实时偏振探测。由于大气结构的宏观性, 在 1 s 内可以认为天空的几何、物理特性没有显著改变, 所以天空偏振场图在此短时间内是稳定一致的。最低 3 frame/s 的刷新率能够基本满足应用要求。

探测器所使用的偏振片的消光比为 1 000 : 1, 波段为 450 ~ 675 nm; 四分之一波片的波段为 400 ~ 800 nm。探测器的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 全偏振成像探测器的主要性能指标

Tab. 1 Main performance indicators of all-polarization imaging detector

项目	指标
分辨率/pixel	1 024 × 1 280
像元尺寸/ $\mu\text{m}$	5.3
像素位深/bit	8
视场角(安装鱼镜头)/ $(^\circ)$	180
偏振图像实时预览帧速 (最大分辨率)/(frame $\cdot$ s $^{-1}$ )	3
波段/nm	450 ~ 675

本程序没有苛刻的硬件和运行环境限制, 主流配置的电脑都可满足运行要求。

## 4 测量实验与结果

本文在室内积分球下验证了探测器的全偏振探测功能, 基本满足设计要求。为了探究本探测器的外场性能, 于 2015 年 12 月 4 日 15:00 至 15:50 在大连理工大学机械工程学院 2 号楼楼顶进行了时长近 1 h 的实验, 实验过程中天气晴朗, 每 10 min 采集一组图片, 共采集 6 组, 获取了天空偏振场图的 AOP、DOP、LDOP 和 CDOP 图像, 并进行了分析。

### 4.1 瑞利散射模型理论偏振角和偏振度

经查阅 15:00 时刻实验地点的太阳高度角为  $13.6^\circ$ , 太阳方位角为  $46.0^\circ$ , 带入模型中得到理论偏振角和偏振度如图 5 所示。

由理论模型的 AOP 图中可以看出过太阳和天顶点有一条直线存在, 此直线就是太阳子午线, 且 AOP 绕天顶点相对太阳子午线对称分布。DOP 图中存在两个中性点, 两个中性点的连线对应 AOP 图中的太阳子午线, 且 DOP 在天空中呈对称的环状分布。

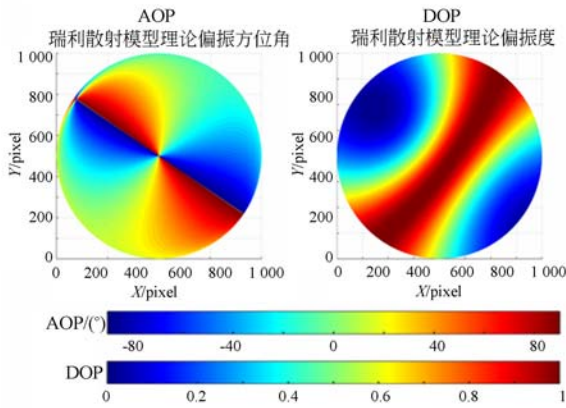


图 5 瑞利散射模型的理论偏振角和偏振度

Fig. 5 AOP and DOP diagrams of Rayleigh scattering

### 4.2 天空偏振场图的实验探测

首先对 15:00 采集到的图片进行偏振解算,得到对应的 AOP、DOP、LDOP 和 CDOP 图,如图 6 所示。

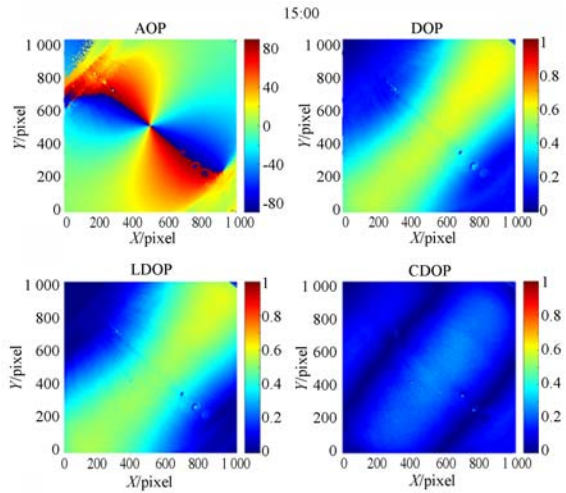


图 6 AOP、DOP、LDOP 和 CDOP 的实际测量结果

Fig. 6 Results of actual measurement of AOP, DOP, LDOP and CDOP

从本组实验结果可以看到 AOP 图和 DOP 图的分布模式和理论模型一致,都存在规律的对称结构。其中,实验 DOP 和理论 DOP 在数值上存在偏差,这是因为理论模型是以 Rayleigh 散射理论为前提的,而由于大气污染等原因,实际目视晴朗的天空中不仅存在着 Rayleigh 散射,还存在着 Mie 散射,产生退偏效应。在 AOP 和 DOP 基础上计算了 LDOP 和 CDOP,LDOP 的数值分布和 DOP 基本一致,而 CDOP 则拥有较小的数值区间,是由于在该时刻天空中中线偏振光占主要地

位。在 CDOP 图中存在着较明显的几何特征,该特征可能是 Rayleigh 散射和 Mie 散射共同作用的结果,有待进一步的研究。AOP、DOP、LDOP 和 CDOP 的解算及获取说明本探测器初步具备了全偏振探测功能,为多场景应用打下了基础。

将其它 5 个时刻的实验结果进行分析后,得到相同的结论。各个时刻的实验结果与理论模型的对比如图 7 所示(图 7 中子图与图 6 中子图拥有相同的横纵坐标定义)。

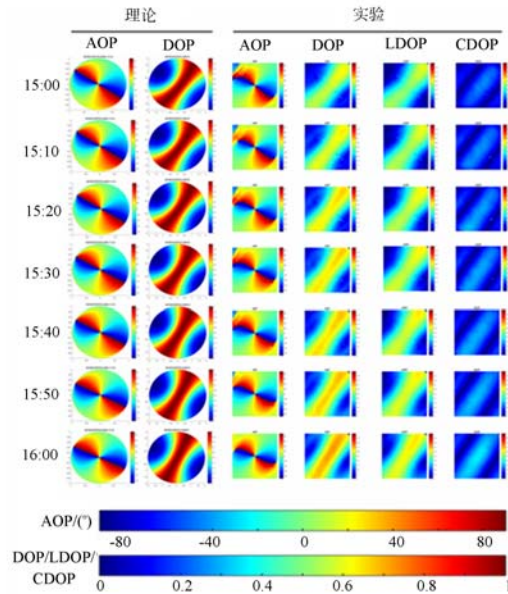


图 7 理论模型和实际测量的结果对比

Fig. 7 Comparison of theoretical model and actual measurement results

表 2 天空偏振场图 AOP 理论变化和实验变化对比

Tab. 2 Comparison of theoretical and experimental variation of AOP (°)

时间	15:00-	15:10-	15:20-	15:30-	15:40-
区间	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50
理论增量	1.9	1.8	1.8	1.7	1.7
实测增量	1.72	1.81	2.03	1.74	1.73
绝对误差	0.18	0.01	0.23	0.04	0.03

图 7 和表 2 表明,探测器实测结果中的 AOP 和 DOP 能较好地吻合瑞利散射模型,在不同时刻能够探测到天空偏振场图绕天顶的运动特征。在 15:00 至 15:50 的时间段内,太阳子午线的动态识别误差为 0.01°~0.23°,该探测器具备一定的实时监测能力。

## 5 结 论

精确的天空偏振场图是进行偏振导航的前提条件。本文提出了一种实时全偏振成像探测器,该探测器拥有较高的集成度和高扩展性,可以实时获取天空偏振场图的 AOP、DOP、LDOP 和 CDOP 等信息,具有较高的信息量,为多信息偏振融合提供了支撑。软件方面,基于 C++ 语言和 OpenCV 库,采用 MFC 架构开发了上位机程序,实现了目标偏振信息的实时显示,视频流刷新率

为 3 frame/s。在长达一个小时的实验中,对理论天空偏振场图和实测结果进行了分析,太阳子午线的动态识别误差为  $0.01^{\circ} \sim 0.23^{\circ}$ ,实测结果与理论模型具有较高的一致性,初步证明了本探测器的可行性。

本探测器的性能还有待进一步的开发和提升。后续工作主要包括:对探测器的灵敏度、分辨率、误差等性能参数进行分析研究;搭建高精度标定系统,标定探测器的精度参数;进行大时长、多天气下的天空偏振场图探测;优化程序算法,提高偏振视频流刷新率,提升探测效率。

### 参考文献:

- [1] BRINES M L, GOULD J L. Skylight polarization patterns and animal orientation[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1982, 96(1): 69-91.
- [2] POMOZI I, HORVÁTH G, WEHNER R. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(17): 2933-2942.
- [3] 李彬,关乐,刘琦,等.一种基于天空光的新型成像式仿生偏振导航传感装置[J].*传感器与微系统*, 2014, 33(8): 69-72.
- LI B, GUAN L, LIU Q, *et al.*. A novel imaging bionic polarization navigation sensing device based on skylight[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, 33(8): 69-72. (in Chinese)
- [4] KARMAN S B, DIAH S Z M, GEBESHUBER I C. Bio-inspired polarized skylight-based navigation sensors: a review[J]. *Sensors*, 2012, 12(11): 14232-14261.
- [5] BYRNE M, DACKER M, NORDSTRÖM P, *et al.*. Visual cues used by ball-rolling dung beetles for orientation[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2003, 189(6): 411-418.
- [6] 赵开春,卢皓,尤政.天空光偏振模式自动探测装置[J].*光学精密工程*, 2013, 21(2): 239-245.
- ZHAO K CH, LU H, YOU ZH. Automatic detection system for skylight polarized pattern[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 239-245. (in Chinese)
- [7] FARLOW C A, CHENAULT D B, PEZZANITI J L, *et al.*. Imaging polarimeter development and applications[J]. *SPIE*, 2002, 4481: 118-125.
- [8] ZHAO X J, BERMAK A, BOUSSAID F, *et al.*. Liquid-crystal micropolarimeter array for full Stokes polarization imaging in visible spectrum[J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17776-17787.
- [9] 乔延利,杨世植,罗睿智,等.对地遥感中的光谱偏振探测方法研究[J].*高技术通讯*, 2001, 11(7): 36-39.
- QIAO Y L, YANG SH ZH, LUO R ZH, *et al.*. Research on polarized spectral monitoring for remote sensing of earth DCT coefficient and error concealment[J]. *High Technology Letters*, 2001, 11(7): 36-39. (in Chinese)
- [10] 褚金奎,赵开春.仿昆虫复眼偏振敏感测角光电模型研究[J].*微纳电子技术*, 2005, 42(12): 541-545.
- CHU J K, ZHAO K CH. Study of angle measurement optoelectronic model on emulating polarization-sensitive compound eye of insect[J]. *Nano-electronic Device & Technology*, 2005, 42(12): 541-545. (in Chinese)
- [11] CHU J K, ZHAO K CH, ZHANG Q, *et al.*. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 148(1): 75-82.
- [12] ZHAO K CH, CHU J K, WANG T CH, *et al.*. A novel angle algorithm of polarization sensor for

- navigation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(8): 2791-2796.
- [13] 褚金奎, 陈文静, 王洪青, 等. 基于偏振光传感器的移动机器人导航实验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2419-2426.
- CHU J K, CHEN W J, WANG H Q, *et al.*. Mobile robot navigation tests with polarization sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2419-2426. (in Chinese)
- [14] 褚金奎, 王威, 崔岩, 等. 气溶胶对天空偏振辐射影响的测量[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3): 520-526.
- CHU J K, WANG W, CUI Y, *et al.*. Measurement for influence of aerosols on polarized sky radiance[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 520-526. (in Chinese)
- [15] 崔岩, 高启升, 褚金奎, 等. 太阳光与月光对曙暮光偏振模式的影响[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 34-39.
- CUI Y, GAO Q SH, CHU J K, *et al.*. Influence of sunlight and moonlight on polarization patterns during twilight[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 34-39. (in Chinese)
- [16] WANG Y L, CHU J K, ZHANG R, *et al.*. A novel autonomous real-time position method based on polarized light and geomagnetic field[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9725.
- [17] 褚金奎, 张慧霞, 王寅龙, 等. 多方向偏振光实时定位样机的设计与搭建[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 312-318.
- CHU J K, ZHANG H X, WANG Y L, *et al.*. Design and construction of autonomous real-time position prototype based on multi-polarized skylight[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 312-318. (in Chinese)
- [18] 关桂霞, 晏磊, 陈家斌, 等. 天空偏振光分布的实验研究[J]. *兵工学报*, 2011, 32(4): 459-463.
- GUAN G X, YAN L, CHEN J B, *et al.*. Research on sky polarized light distribution[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(4): 459-463. (in Chinese)
- [19] 晏磊, 相云, 李宇波, 等. 偏振遥感研究进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2010, 5(3): 162-174.
- YAN L, XIANG Y, LI Y B, *et al.*. Progress of polarization remote sensing research[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 162-174. (in Chinese)
- [20] 吴良海, 张骏, 范之国, 等. 多次散射因素影响下天空偏振光模式的解析模型[J]. *物理学报*, 2014, 63(11): 114201.
- WU L H, ZHANG J, FAN ZH G, *et al.*. An analytical model for skylight polarization pattern with multiple scattering [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(11): 114201. (in Chinese)
- [21] ZHANG W J, CAO Y, ZHANG X Z, *et al.*. Sky light polarization detection with linear polarizer triplet in light field camera inspired by insect vision [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(30): 8962-8970.
- [22] ZHANG W J, CAO Y, ZHANG X ZH, *et al.*. Angle of sky light polarization derived from digital images of the sky under various conditions [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 587-595.
- [23] ARAGO F, BARRAL J A, FLOURENS P. *Astronomie Populaire* [M]. Paris: Gide et J. Baudry, 1855.
- [24] STRUTTH J W XXXVI. On the light from the sky: its polarization and colour[J]. *Philosophical Magazine*, 2009, 41(273): 274-279.
- [25] 赵开春, 褚金奎, 姚弘轶, 等. Rayleigh 大气天空光偏振分布仿真与预测[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2007, 39(S1): 287-291.
- ZHAO K CH, CHU J K, YAO H Y, *et al.*. Simulation and prediction for Rayleigh skylight polarization distribution[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2007, 39(S1): 287-291. (in Chinese)
- [26] CUI Y, CAO N N, CHU J K, *et al.*. Design of skylight polarization measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1431-1435.
- [27] CUI Y, CHU J K, CAO N N, *et al.*. Study on measuring system for characteristics and distribution of skylight polarization[J]. *Key Engineering Materials*, 2010, 437: 369-373.

- [28] TYO J S, GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, *et al.*. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [29] HAMAOUI M. Polarized skylight navigation[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3):B37-B46.
- [30] LU H, ZHAO K CH, YOU ZH, *et al.*. Real-time polarization imaging algorithm for camera-based polarization navigation sensors[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(11): 3199-3205.
- [31] TANG J, ZHANG N, LI D L, *et al.*. Novel robust skylight compass method based on full-sky polarization imaging under harsh conditions [J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15834-15844.

#### 作者简介:



陈永台(1989—),男,河北邢台人,博士研究生,2014年于太原理工大学获得学士学位,主要从事偏振光成像探测技术的研究。E-mail: cytmars@sina.com

#### 导师简介:



褚金奎(1965—),男,河南平顶山人,博士,教授,博士生导师,1986年于杭州电子科技大学获得学士学位,1989年于西安科技大学获得硕士学位,1992年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事智能机器人、仿生传感器和微机电测试技术等方面的研究。E-mail: chujk@dlut.edu.cn