

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2024.01.009

天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪设计

王昊^{1,2}, 孙晓兵^{2,3*}, 刘晓^{2,3}, 宋强^{2,4}, 洪津²

(1 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601;

2 中国科学院合肥物质科学研究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;

3 合肥市农业行业首席专家工作室, 安徽 合肥 230031;

4 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 太阳光在地球大气传输过程中产生的散射会呈现出固有的偏振特性, 因此利用大气散射偏振态分布特性及其与太阳照射几何以及地表观测几何之间存在的对应关系, 为地球大气层内导航提供了可能。然而因气象变化造成的大气组分改变会直接影响光散射分布, 从而影响基于偏振态分布的方向定位精度, 因此在偏振导航实际应用过程中, 其方向指引精度受大气状况影响较大。为研究不同气象条件下天空偏振态变化内在机理, 研制了一台天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪。该仪器可按需进行定时段、定天区、多天候天空光谱偏振态测量, 采用分时偏振同时分谱非成像测量体制。仪器主要由偏振分析模块、偏振检测方位定位驱动电机、微型光谱仪、GPS定位模块、嵌入式采集控制模块、二维载重转台等部分组成, 光谱范围为390~960 nm, 光谱分辨率为1.5 nm, 观测视场为3°, 光谱线偏振度测量精度优于98.85%, 偏振角测量精度优于0.1°, 单点观测时间小于9 s。经实验室定标和外场测试, 表明该仪器可在多种气象条件下稳定观测天空光谱偏振态, 其测量数据可用于天空偏振态影响机理相关研究。

关键词: 天空光; 散射; 偏振测量; 气溶胶; 光谱

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2024)01-111-014

Design of automatic measuring instrument for sky visible and near-infrared spectral polarization state

WANG Hao^{1,2}, SUN Xiaobing^{2,3*}, LIU Xiao^{2,3}, SONG Qiang^{2,4}, HONG Jin²

(1 Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;

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

3 Hefei Agricultural Industry Chief Expert Studio, Hefei 230031, China;

4 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The scattering of sunlight during its transmission process in the earth's atmosphere has inherent polarization characteristics. Therefore, utilizing the polarization state distribution of atmospheric scattering and its corresponding relationship with the geometry of solar irradiation and surface observation, provides

基金项目: 航天科技创新计划项目, 卫星应用共性关键技术项目 (30-Y20A010-9007-17/18)

作者简介: 王昊 (1997-), 黑龙江哈尔滨人, 硕士研究生, 主要从事大气偏振模式特性方面的研究。E-mail: cloudw@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙晓兵 (1966-), 安徽合肥人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气偏振辐射遥感、地物偏振特性方面的研究。

E-mail: xbsun@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2022-03-07; **修改日期:** 2022-04-06

*通信作者。

the possibility for navigation in the earth's atmosphere. However, the change of atmospheric composition caused by meteorological changes can directly affect the distribution of light scattering, further affecting the positioning accuracy based on the distribution of polarization state. So, in practical application, the accuracy of polarization navigation guidance is greatly affected by atmospheric conditions. In order to study the inherent mechanism of sky polarization state change under different meteorological conditions, an automatic measuring instrument for sky VIS-NIR spectrum polarization state was developed. The instrument can measure the spectral polarization state of the sky in a fixed time period and in a fixed sky area according to the settings, and adopts a non-imaging measurement method of time division polarization and simultaneous spectrum division. The instrument is mainly composed of a polarization analysis module, a positioning drive motor, a miniature spectrometer, a GPS positioning module, an embedded acquisition control module, a 2-D load turntable and other parts. Its spectral range is 390-960 nm, with spectral resolution of 1.5 nm, observation field of 3°, spectral linear polarization measurement accuracy better than 98.85%, polarization angle measurement accuracy better than 0.1°, and single-point observation time less than 9 seconds. Through laboratory calibration and field tests, it has been verified that the instrument can stably observe the sky spectral polarization state under various meteorological conditions, and its measurement data can be used to study the influence mechanism of sky polarization state.

Key words: skylight; scattering; polarimetry; aerosol; spectrum

0 引 言

太阳光是无偏振的自然光源,在进入大气层之后,受到大气分子、气溶胶粒子以及云的散射和吸收作用等影响,形成了具有一定偏振特性的光辐射,其在半球空间的分布存在一定的规律,称为天空光的偏振模式。在理想空气分子散射情况下,任意位置观测的天空光偏振模式具有相对稳定的特征。但在实际情况中,由于大气的组成成分随时间、空间的变化而发生变化,会对天空光偏振特性的分布状态产生显著的影响。

自然界中许多生物都具有偏振视觉,可以感知天空偏振光并加以利用:觅食蜜蜂可以通过天空偏振光模式的信息来读取和确定飞行方向^[1];沙蚁在嗅觉和视觉信息缺失的沙漠中漫游数百米后,仍能依靠感知天空偏振光返回巢穴^[2]。通过生物学实验研究表明,昆虫对偏振光进行感知主要是其独特的复眼结构:可以感知偏振的背部边缘区域(DRA)小眼,这部分复眼朝向天空,具有极高的偏振敏感性。其视神经叶拥有直径大约60°的视野^[3],可以对获取的天空偏振信息进行整合,从而完成对天空光偏振模式的检测。

受到生物偏振导航机理的启发,通过对天空偏振态的探究,为地球大气层内导航提供理论基础。1981年,Brines和Gould^[4]设计了一种点源式偏振测量系统,通过对天空离散点的测量,得到了全天空偏振分布模型。1997年,Voss和Liu^[5]利用设计的一种成像式偏振测量系统,实现了以较快的速度完成对全天空光偏振模式的测量。2005年8月至9月,Hegedüs等^[6]利用加装鱼眼镜头和偏振片的胶卷相机在北极测试了晴天、多云和雾天的天空偏振分布规律。孙晓兵等^[7]采用PVF021型偏振光谱辐射测量仪在合肥地区进行了大量野外实地测量实验,得到了不同时空条件下的大气偏振分布规律。卢皓等^[8]设计并构建了一种采用连续

旋转检偏器的偏振成像探测装置, 可以高速的进行偏振探测。王成等^[9]设计了一种全偏振大气偏振模式成像系统并进行优化。此外, 还有不少学者利用成像式观测方法对天空偏振模式的特性、影响因素以及定向导航方法进行研究验证^[10-17]。

目前, 国内外对天空偏振态的相关研究大多为采用单波段或宽波段成像式观测仪器对天空偏振特性及影响因素进行研究。但实际上大气组分具有时空观变化性, 大气散射辐射存在波长选择性, 从而导致大气偏振模式在不同波长处有各自的特点。针对不同天气条件下对天空光谱偏振信息存在的特点进行研究分析, 选择对应天气条件下观测天空光偏振模式的最优谱段, 对于天空偏振态变化研究和偏振导航具有重要意义。因此, 发展一种便捷、自动化观测的偏振光谱测量仪器用于研究天空偏振态具有一定的应用意义。本文开发设计的天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪, 可按预设观测天区进行定时段自动开展多天候天空光谱偏振态测量, 能够方便地为研究不同气象条件下天空偏振态变化内在机理提供一手大量资料。

1 天空偏振测量原理及系统设计

1.1 观测坐标系的建立

在晴朗无云的清洁大气条件下, 太阳光在大气下行传输时将发生 Rayleigh 散射, 任意观测位置下的天空偏振模式具有相对稳定的特征。此时天空光的偏振模式存在两条特征线: 一条特征线是经过太阳主平面的太阳子午线, 天空光偏振模式的偏振度关于其呈现对称分布, 偏振角关于其呈现逆对称分布; 另一条是与太阳所在方位呈 90° 夹角的偏振最大线, 天空光偏振模式的偏振度分布距离特征线越远, 偏振度越小。

但在实际情况下, 大气中存在的气溶胶粒子、云、雾等散射介质会将散射方式转变为米散射或者几何散射, 天空光偏振模式中偏振度、偏振角的分布将不再有明显的特征。

为了便于描述天空光偏振模式的分布, 建立仪器观测坐标系, 如图 1 所示。观测系统以观测点为中心、观测点到天顶的直线为 Z 轴正向方向, 太阳主平面自天顶向太阳方向的子午线投影为 X 轴正向方向, 逆时针 90° 方向为 Y 轴正向方向, 坐标轴的方向满足右手法则。待测点 P 与观测点 O 之间的连线在 XOY 平面内的投影与 X 轴正向夹角称为相对方位角 A , 点 P 与点 O 连线 PO 在 XOY 平面内投影与连线 PO 的夹角称为高度角 h 。测量系统将以观测坐标系的 X 轴正向方向为基准, 其水平旋转角度即为相对方位角 A , 俯仰观测角度即为高度角 h 。

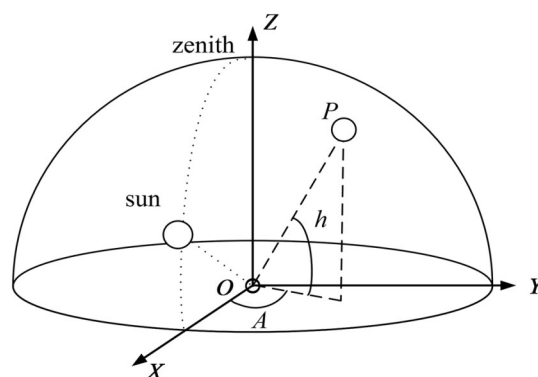


图 1 观测坐标示意图

Fig. 1 Diagram of observation coordinate

1.2 天空偏振测量原理

光波的偏振信息可由 Stokes 参量计算表示,其包含 4 个分量: $\mathbf{S}=(I, Q, U, V)^T$ 。其中, \mathbf{S} 为 Stokes 参量, I 为总辐射强度, Q 和 U 分别代表水平方向与垂直方向上的线偏振光分量差以及 45° 方向与 135° 方向上的线偏振光分量差, V 代表左旋圆偏振光与右旋圆偏振光分量差。在实际的大气散射辐射中圆偏振分量很小,可以忽略不计,通常假定 V 为 0。因此,天空光的偏振特性研究以线性偏振为主。

天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪采用分时偏振同时分谱非成像体制采集天空偏振信息。以线性偏振分析模块透过轴起始角度为 0° , 记录光路中的线性偏振分析模块透过轴旋转至 0° 、 60° 、 120° 三个不同偏振化方向时各个波段获取的辐射能量,可以计算得到入射光的 Stokes 参量分别为

$$\begin{cases} I(\lambda_i) = \frac{2}{3} [I(0^\circ) + I(60^\circ) + I(120^\circ)] \\ Q(\lambda_i) = \frac{2}{3} [2I(0^\circ) - I(60^\circ) - I(120^\circ)], \\ U(\lambda_i) = \frac{2\sqrt{3}}{3} [I(60^\circ) - I(120^\circ)] \end{cases} \quad (1)$$

式中 $I(\lambda_i)$ 、 $Q(\lambda_i)$ 和 $U(\lambda_i)$ 分别为波长为 λ_i 处的 Stokes 参量, $I(0^\circ)$ 、 $I(60^\circ)$ 、 $I(120^\circ)$ 分别表示在 0° 、 60° 和 120° 三个偏振化方向上观测得到的辐射能量。利用计算得到的 Stokes 参量,可进一步得到线性偏振度 (DOLP, P_L)、偏振角 (AOP, γ) 等偏振信息。 P_L 、 γ 的计算公式分别为

$$\begin{cases} P_L = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (0 \leq P_L \leq 1) \\ \gamma = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right), \quad (0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

1.3 仪器主要功能模块设计

天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪主要由以下 8 部分组成: 限视场光阑、偏振分析模块、偏振检测方位定位驱动电机、微型光谱仪、嵌入式采集控制模块、二维载重转台、GPS 定位模块和外置存储器。图 2 为测量仪工作原理框图。

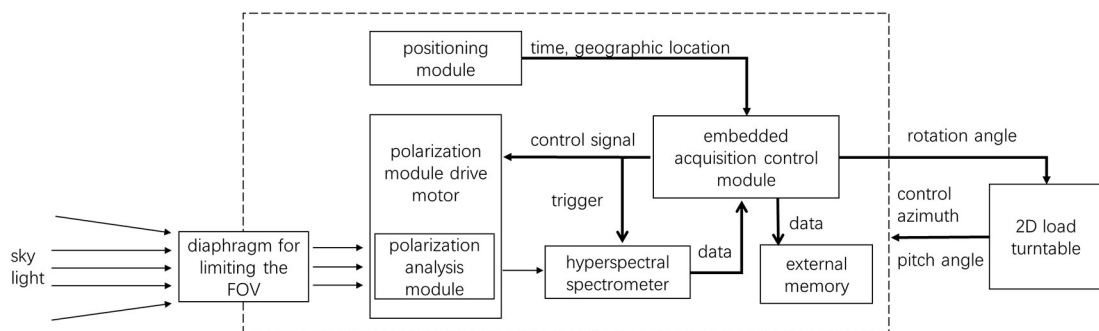


图 2 偏振探测装置工作原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of polarization detection device

限视场光阑的视场角为 3° , 整体为两端开孔的圆筒状, 用于约束视场消除杂散光, 其内壁有螺纹, 涂黑色消光漆, 可以有效地消除由视场外倾斜方向入射的杂散光以及由内壁反射形成的杂光。偏振分析模块

由线性偏振片和退偏器组成,用于对入射光的偏振检测,由偏振检测方位定位驱动电机控制旋转角度。为了提高偏振检测模块旋转的精度和稳定性,偏振检测方位定位驱动电机选用具有高速率涡轮的步进电机。

GPS 定位模块用于获取观测实验的时间信息和地理信息,以确定实验时间和太阳主平面位置。根据昆虫偏振观测视场^[3],选用可调俯仰角为 $35^{\circ}\sim 90^{\circ}$ (90° 为天顶位置)、观测锥角为 110° 、可调方位角 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 的可控支撑云台作为二维载重转台。表 1 为天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪相应技术参数。

表 1 天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪相应技术参数

Table 1 Corresponding parameters of automatic measuring instrument for sky visible and near-infrared spectral polarization state

Name	Parameter
Detector	Sony ILX511B (2048-pixel silicon-based CCD line array)
Spectral range/nm	390-960 (After calibration experiment)
Spectral resolution/nm	1.5
Single observation point field of view/ $^{\circ}$	3
Scannable angle range/ $^{\circ}$	Horizontal direction: 0-360
	Vertical direction: 35-90 (90° is the zenith angle)
	Observation cone angle: 110
Single point observation speed/s	< 9
Built-in power supply working time/h	7

为了提高整机的便携性,可在野外进行较长时间的观测实验,在机身内置一块可稳定供电的电池。同时,系统加装一张可触摸操控的小屏幕,方便人机交互。观测获取的数据存贮至外置储存器,可以在观测实验结束后直接取下,便于后期处理。

为了使测量仪轻量化,选用铝合金板作为内部支撑骨架,同体积下铝合金板的重量要比不锈钢轻 66.8%,且结构强度更符合要求。外壳采用树脂 3D 打印,外层涂以白漆,减少太阳光的吸收,降低由温度带来的影响。此外,机身内部结构紧凑封闭,考虑到在外场试验中长时间暴晒可能会导致内部积热,对测量仪的正常工作和观测产生影响,为了加大散热效率,在测量仪内部加装两枚小型风扇用于增加空气交换。偏振探测装置内部 3D 结构如图 3 所示。

1.4 工作流程

天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪在进行外场观测实验时分为观测环境配置和自动观测两部分,观测环境配置主要为调整测量仪的姿态、系统初始化以及设置实验参数,之后测量仪将按照设定的观测方案进行自动观测。观测实验及工作流程如图 4 所示。

测量仪运行前需将二维载重转台正面面向正北放置,利用水平仪将转台支撑面调至水平。二维载重转台通电后开始自检,自检完成后可保证转台支撑面仍为水平。实验开始前需将所需的实验参数(如实验时段、观测时间间隔、数据存储路径等)进行输入设置。

测量仪开始运行时,首先 GPS 定位模块自动启动,将获取数据通过串口传输给嵌入式采集控制模块,并将时间信息和地理信息显示在显示屏幕上,用于进行实时监测。当到达预设观测时间时,嵌入式采集控制模块利用定位模块获取的时间信息和地理信息计算得到太阳方位角,并转化为串口指令发送至二维载重

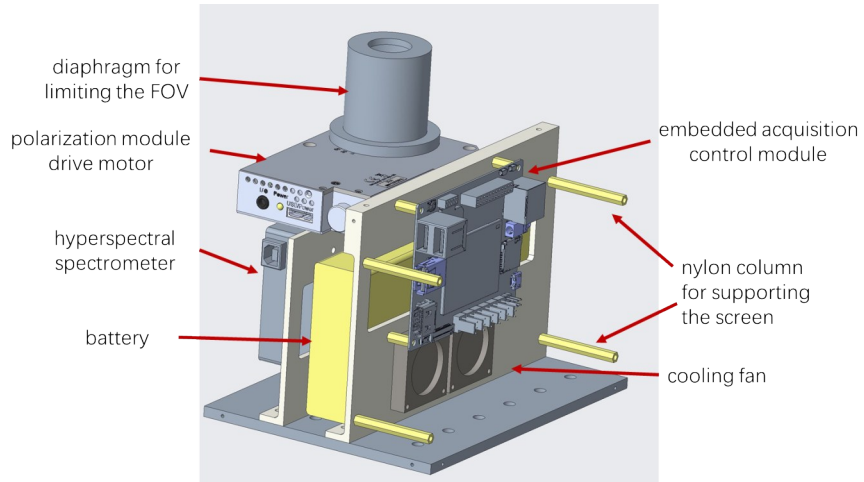


图3 偏振探测装置内部3D结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the internal 3D structure of the polarization detection device

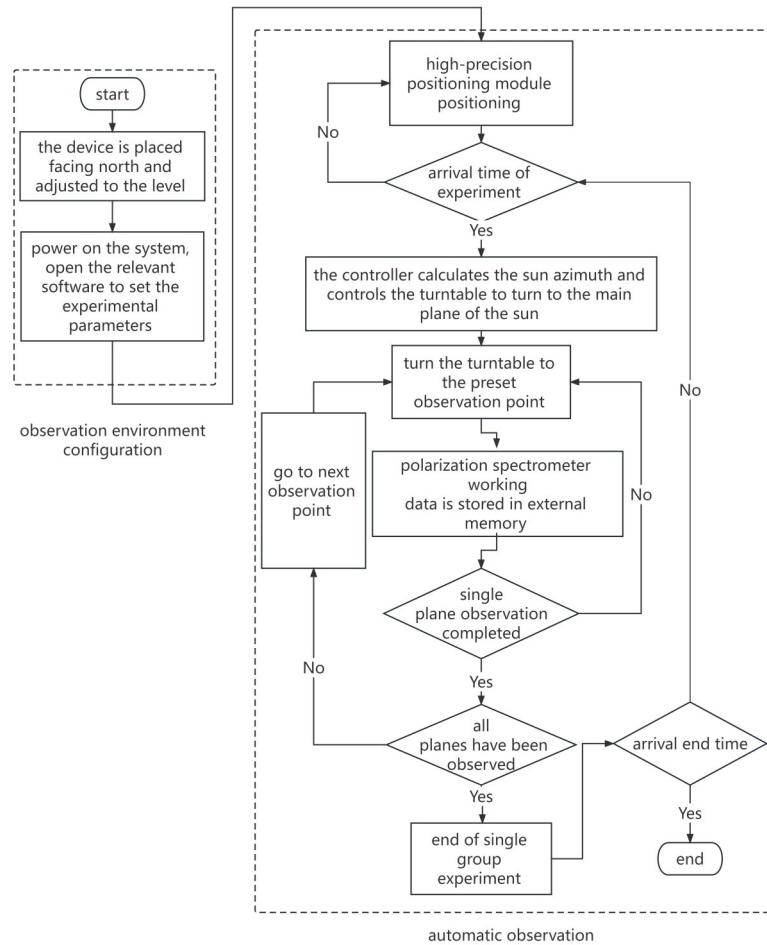


图4 天空偏振态观测实验流程

Fig. 4 Experiment process of sky polarization state observation

转台，控制二维载重转台转至太阳主平面，同时，转台的俯仰角转至预设待测角度。

天空光在经过限视场光阑后消除了其他入射方向的杂散光，首先穿过偏振分析模块中的线性偏振片，

形成带有特定偏振方向的线性偏振光, 再经过退偏器的退偏作用转化为能量大小不变的非偏振光, 进入光谱仪。采集控制模块控制偏振检测方位定位驱动电机和光谱仪同步工作, 分别记录偏振分析模块透过轴旋转至 0° 、 60° 及 120° 时测得的偏振光谱数据, 并通过 USB 存储至外置存储器。观测结束后对获得的偏振光谱数据利用式 (1) 计算处理即可得到各观测点各波长的 Stokes 参量, 利用式 (2) 进而计算得到各观测点光谱的线偏振度、偏振角等偏振信息。

2 测量系统的实验室定标

为了保证自行研制的天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪观测数据的准确性, 在外场观测实验前对偏振光谱仪部分进行辐射定标、偏振度精度测试、偏振分析模块透过轴方位角度定标和偏振角测量精度测试。仪器的测试和定标实验均在专用光学实验室内进行。

2.1 辐射定标

辐射定标利用偏振光谱仪和标定过的标准光谱仪对同一光源进行观测, 以标准光谱仪获取的辐亮度信息为标准, 建立偏振光谱仪 DN (Digital number) 值与实际辐射能量之间的转换关系, 求得偏振光谱仪各个波段的定标系数之间的关系为

$$L(\lambda) = kDN + c, \quad (3)$$

式中, $L(\lambda)$ 为标准光谱仪、被定标偏振光谱仪接收的辐亮度, 单位为 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$; DN 为偏振光谱仪显示的观测值, 为无量纲量; k 为定标斜率, 单位为 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$; c 为定标截距, 单位为 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。

在进行辐射定标实验过程中, 通过积分球获得稳定的非偏振光, 将自动测量仪和标准光谱仪探头放置于积分球出光口。待积分球光源稳定后, 同时测量在积分球输出光亮度等级分别为 1~6 时的光谱辐射数据, 分别记为 DN 值和标准辐亮度。利用式 (3) 对仪器在每个波长处获得的 DN 值与标准辐亮度值建立对应关系, 求得自动测量仪各波长处的定标斜率和定标截距, 并保存为定标系数文件。图 5 为辐射定标实验的实拍图。

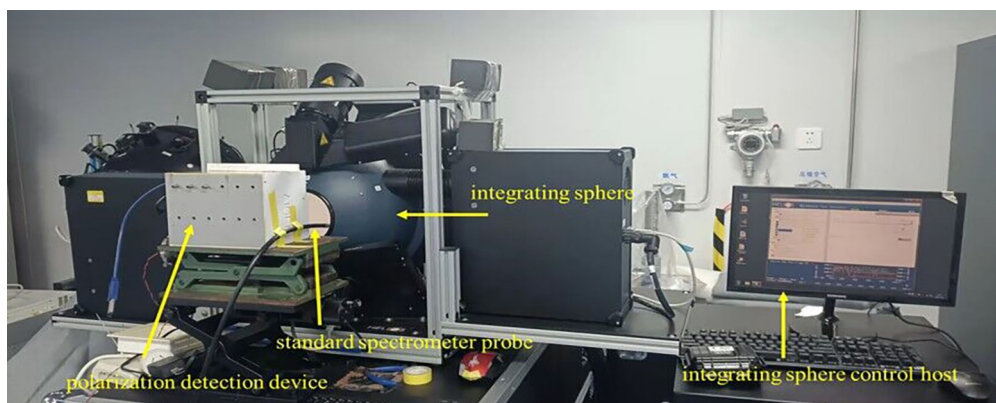


图 5 辐射定标实验实拍图

Fig. 5 The photo of radiation calibration experiment

2.2 偏振度测量精度测试

偏振度测量精度测试是利用可调偏振度光源输出带有指定偏振度的偏振光, 通过计算偏振光谱仪各波

段的线偏振度,与光源输出的偏振度信息分析对比,得到测量仪的线偏振度测量精度的一种方法。可调偏振度参考光源分为入射光源和偏振态调节部分,实验中选用积分球作为入射光源,高精度偏振发生器作为偏振态调节器。早期观测实验利用实验室现有检偏设备进行观测,主要以可见光波段为主。后期通过更换偏振片和匹配的退偏器将观测波段扩展为可见光—近红外波段。

在对自动测量仪的偏振度测量精度进行检测时,将积分球出光口与高精度偏振发生器入射口、出射口与自动测量仪探测口放置在同一水平面内,保持测量仪探测口在整体光路中轴上。在偏振分析模块中不加装退偏器和加装退偏器两种情况下,仪器分别测量高精度偏振发生器输出光偏振度为0~0.3时,偏振分析模块透过轴位于0°、60°和120°三个检偏角度下的偏振光谱数据。进行数据分析时,利用辐射定标获取的定标系数将 DN 值转化为辐亮度,通过式(1)、(2)分别计算加装退偏器和不加装退偏器两种情况下的偏振度光谱,与标准偏振度作对比,得到仪器的偏振敏感性大小和线偏振度测量精度。图6为偏振度测量精度检测实验实拍图。

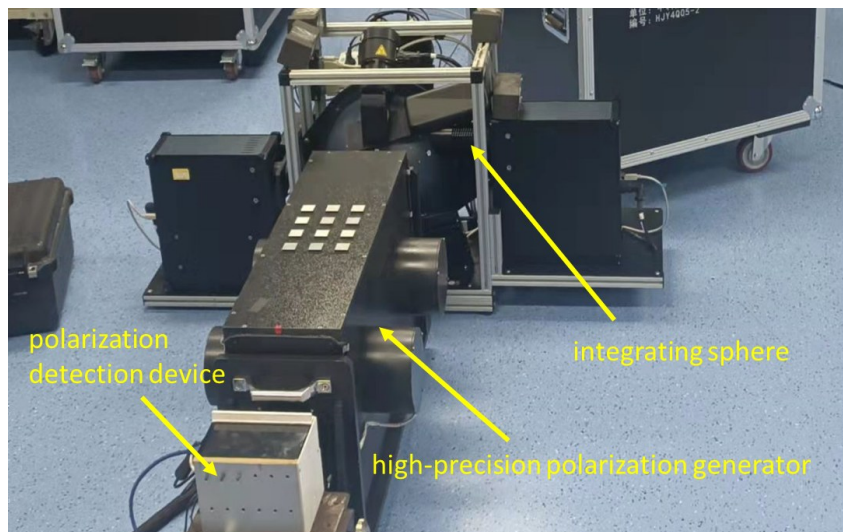


图6 偏振度测量精度检测实验实拍图

Fig. 6 The photo of detection experiment for polarization measurement accuracy

测量仪选用的微型光谱仪为光栅光谱仪,自身存在一定偏振敏感性,为了评估光谱仪自身偏振敏感性的大小^[18],在偏振度测量精度测试实验同时也对仪器的偏振敏感性进行了分析,分别测量了不加退偏器和加装退偏器两种情况下线偏振度(DOLP)光谱数据。图7为计算得到的偏振度随波段的分布。

由图7可知,在未安装退偏器的情况下,测量结果与标准偏振度值相差较大,最大偏差为0.18。各波长处计算得到的线偏振度与标准偏振度值存在等间隔的偏移。在安装退偏器的情况下,测量结果与标准值相接近。对测量结果的标准差进行测量精度分析,经计算,在光谱覆盖范围为415~700 nm内,线偏振度测量精度优于1.54%。计算结果与标准值对比可以发现,415~700 nm波段计算结果与标准值几乎恒差0.01,认为仪器本身测量精度存在固定偏差0.01。除去固定误差后线偏振度测量精度优于0.704%。

前期观测实验主要以可见光波段为主,后期对仪器进行了技术升级,通过更换偏振片和匹配的退偏器将观测波段扩展为可见光-近红外波段。在已知仪器存在偏振敏感性且对线偏振度测量结果影响较大的情况下,升级后的仪器无需再次进行对偏振敏感性分析。精度测试结果如图8所示。

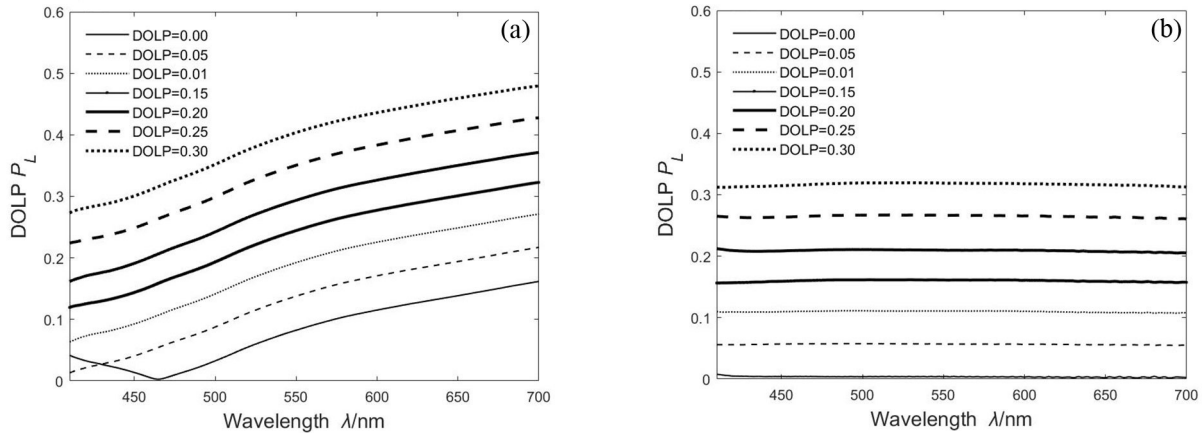


图 7 实验得到的线偏振度随波长的分布。(a) 无退偏器情况下; (b) 有退偏器情况下

Fig. 7 The distribution of DOLP with wavelength obtained by experiment. (a) Without depolarizer; (b) with depolarizer

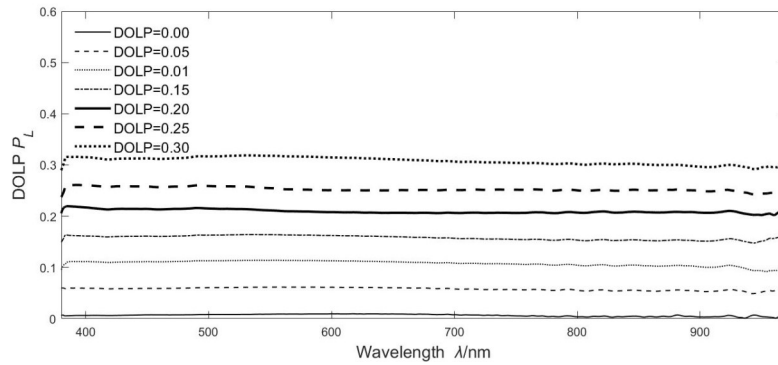


图 8 仪器升级后测量线偏振度分布随波长的分布

Fig. 8 DOLP distribution with wavelength after upgrade

经计算, 更换偏振分析模块后偏振光谱仪的可用光谱覆盖范围为: 390~960 nm, 在该观测波段内各波长处线偏振度的测量误差如图 9 所示, 误差整体范围为 0.2%~1.15%, 波长为 532 nm 时的测量线偏振度测量误差最大, 为 1.15%。认为仪器精度测量结果符合设计要求。

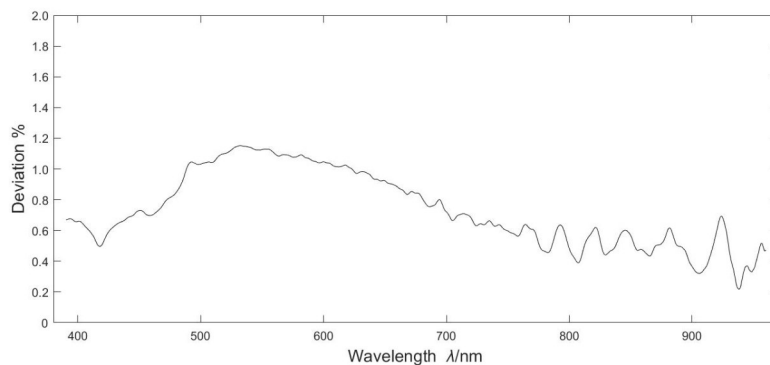


图 9 偏振光谱仪线偏振度测量误差随波长的分布

Fig. 9 Distribution of DOLP measurement error with wavelength of the polarization detection device

2.3 偏振分析模块透过轴方位角度定标

在仪器的偏振测量坐标系中,认为偏振检测模块透过轴与偏振检测方位定位驱动电机的 0° 角方向是一致的。但是在实际手动安装过程中,由于固定压圈和偏振片之间存在摩擦力,偏振检测模块的主轴与偏振检测方位定位驱动电机的 0° 角方向会存在一定角度偏差。为了确定安装误差角的大小,进行偏振分析模块透过轴方位角度定标。在积分球光源与光谱仪之间放置一线偏振片,其主轴垂直向下,测量驱动电机在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内旋转间隔 1° 时的光谱数据。分别选取波段:460、500、570、600、675、750 nm,以旋转角度为横坐标、 DN 值为纵坐标绘制图像并进行拟合,观察其测量值在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 变化曲线的波峰波谷,依据偏振光的特性,选取其最大值和最小值所在角度即为偏振分析模块主轴方向所在角度和垂直于偏振分析模块主轴方向所在角度。实验结果如图10所示。

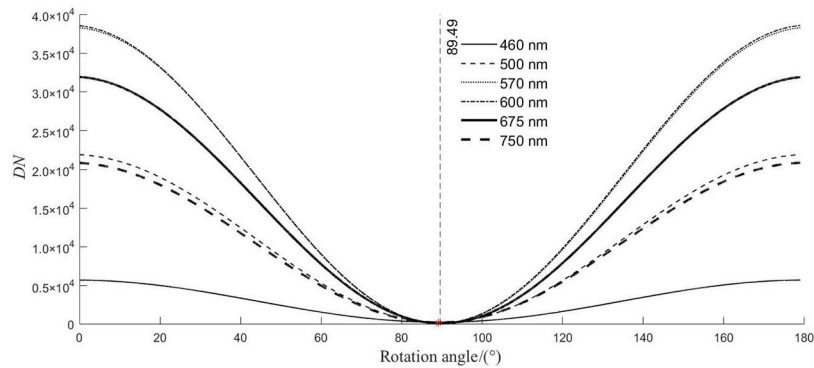


图10 偏振分析模块透过轴方位角度定标

Fig. 10 Determination of the direction angle of polarization transmission axis

由图10可知:观测获取的 DN 值与偏振分析模块透过轴旋转角度成余弦式分布,当偏振分析模块旋转至 89.49° 时,观测获取的 DN 值为最小值。表明偏振检测模块安装时主轴与偏振检测方位定位驱动电机 0° 方向存在的角度偏差为 0.51° ,即安装误差角为 -0.51° 。

2.4 偏振角测量精度测试

以偏振分析模块透过轴方位角度定标的实验为基础,设计偏振角(AOP)测量精度测试。线性偏振片将积分球光源发出的非偏光进行起偏,转变为稳定的完全线偏振光,通过利用偏振检测方位定位驱动电机旋转偏振分析模块,完全线偏振光的偏振方向与偏振分析模块的主轴方向将发生相对运动,即在偏振分析模块的主轴不变的情况下,完全线偏振光的偏振方向进行了稳定的角度偏转,测量获得偏振角变化角度应为驱动电机旋转角度。

将定位驱动电机在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 内每旋转 1° 时记录的光谱数据分为三组($0^\circ \sim 60^\circ$ 、 $60^\circ \sim 120^\circ$ 、 $120^\circ \sim 180^\circ$),分别视为仪器在测量入射线偏振光从 0° 旋转至 60° 时在 0° 、 60° 和 120° 三个检偏方向观测得到的结果,通过计算得到的偏振角变换的角度与实际旋转 1° 的差值,即可得到偏振角的检测精度,通过对60组测量实验结果表明:偏振角精度优于 0.1° ,满足测量实验需求。试验结果如图11所示。

综上,通过对自动测量仪的性能检测和实验室定标实验,确定了仪器的基本参数以及偏振测量精度:仪器在 $390 \sim 960$ nm观测波段线偏振度的测量精度优于 98.85% ,偏振角测量精度优于 0.1° 。偏振检测模块安装误差角为 -0.51° ,认为自动测量仪获取的偏振信息是准确的。

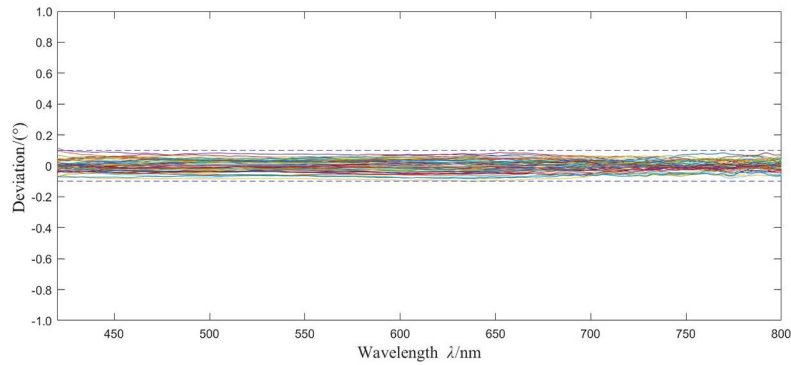


图 11 偏振角误差分布

Fig. 11 The distribution of AOP deviation

3 外场测量结果与分析

外场观测实验地址选为中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所 1 号楼 7 楼天台 (31° 54' 18" N, 117°9' 40" E)。实验时段为北京时间上午 09:00 到下午 05:00, 每组观测时间间隔为 30 min。观测过程中研制的偏振光谱仪与 CIMEL CE318 型太阳光度计同步观测, 获取观测时的光学厚度等信息。天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪观测相对方位角以 45°为间隔测量 0°至 315°、相对高度角以 15°为间隔观测 45°至 90°时待测点的偏振光谱信息。图 12 为天空光偏振模式观测实验实拍图。



图 12 天空光偏振模式观测实验实拍图

Fig. 12 The photo of the sky light polarization mode observation experiment

图 13 为前期观测实验中 2021 年 12 月 1 日 12:00 位于垂直于太阳主平面上各点获取的偏振信息随波段的分布图。观测时天气晴朗, 空气质量优。水平能见度约为 36.5 km。太阳高度角和方位角分别为: 36.28°和 180.26°。由太阳光度计观测得到的光学厚度为 0.156 (500 nm 处)。图中 A 和 h 分别为在观测坐标系内的相对方位角和高度角。

由图 13(a) 可知, 在同一高度角处观测得到的线偏振度值相近, 且高度角越大、越靠近太阳主平面方向

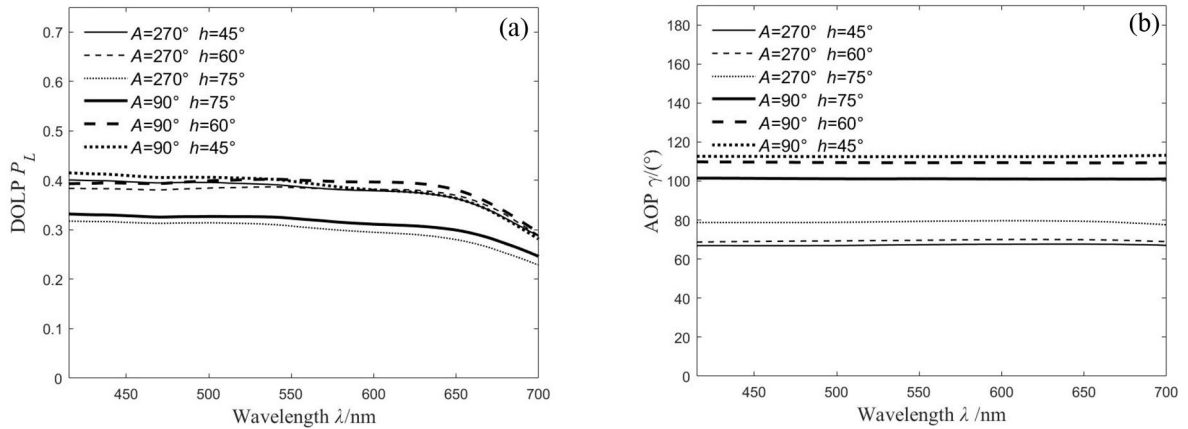


图 13 清洁不垂直于太阳主平面上各点获取的偏振信息随波段的分布。(a) 线偏振度; (b) 偏振角

Fig. 13 The distribution of polarization information obtained at each point perpendicular to the main plane of the sun with the wavelength on a clean day. (a) DOLP; (b) AOP

线偏振度越低。在观测的波长范围内线偏振度随波长的增加而呈现下降趋势：线偏振度整体范围为0.23~0.42，在415~660 nm波段内线偏振度随波长的增加而缓慢减小，在650~700 nm处部分线偏振度对波长减小的幅度增大。偏振角在观测的波长范围内整体趋于稳定，在靠近太阳主平面的方位上更靠近90°。

此外，实验还选取雾霾天气进行观测对比实验。

图 14 为前期观测实验中 2021 年 12 月 9 日 12:00 位于垂直于太阳主平面上各点获取的偏振信息随波段的分布图。观测时天气情况为霾，天空无云，空气质量为中度污染。水平能见度约为 4.6 km。太阳高度角和方位角分别为：35.27°和 181.16°。由太阳光度计观测得到的光学厚度为 0.805 (500 nm 处)。

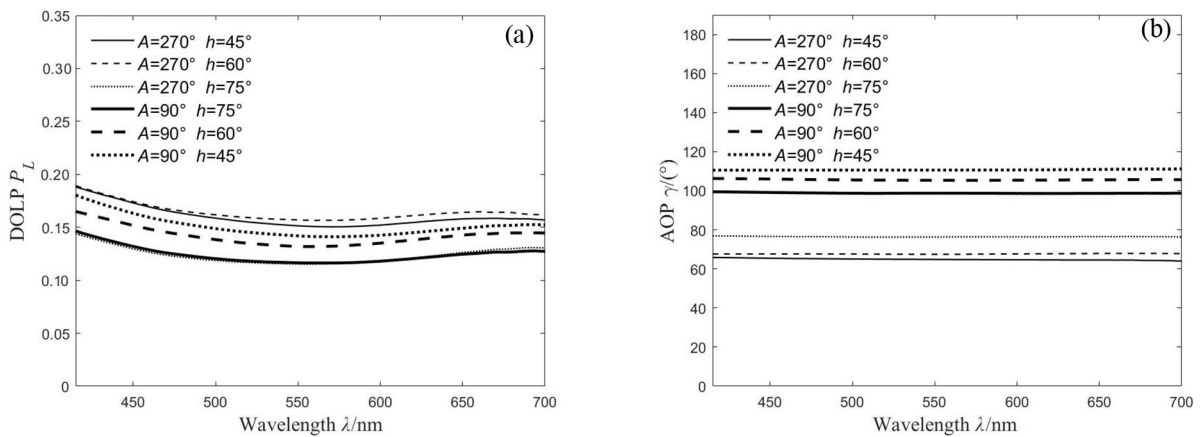


图 14 雾霾天垂直于太阳主平面上各点获取的偏振信息随波段的分布。(a) 线偏振度; (b) 偏振角

Fig. 14 The distribution of polarization information obtained at each point perpendicular to the main plane of the sun with the wavelength on a hazy day. (a) DOLP; (b) AOP

对比图 14 和图 13 可知，在天空无云的雾霾天气下与晴好天气下的线偏振度和偏振角在空间上的分布规律基本相同，但在线偏振度大小上雾霾天气要小许多，且在观测的波长范围内变化趋势与晴好天气的变化趋势有所区别。在雾霾天气下，线偏振度整体范围在 0.1~0.2 内，在 415~560 nm 波段内线偏振度随波长的

增加而缓慢减小,在560~700 nm处部分线偏振度随波长增大而缓慢上升;偏振角在观测的波段范围内整体趋势趋于稳定。

通过晴天雾霾两种典型天气对比观测结果可以发现:在无云天气情况下,偏振角具有稳定性,基本不随观测波段的改变而改变,因此可作为偏振导航的依据;线偏振度与大气气溶胶分布状况密切相关,空气污染时偏振度整体降低,且随波段发生变化。观测结果表明,太阳主平面对称的观测点得到的线偏振度相近,偏振角关于90°成逆对称,与理论天空光偏振模式相符。同时,两组实验观测时太阳高度角相近,各观测点获取的偏振角信息也相近,表明仪器测量数据是真实可靠的。

4 结 论

本工作设计并构建了一种可按需求进行定时定点自动进行多天候天空光偏振态测量的天空可见-近红外光谱偏振态自动测量仪。该测量仪通过分时型测量方法测量天空光偏振光谱的辐射强度,计算所需的偏振信息,能够准确地获取天空光的偏振信息。经过实验室定标实验和偏振精度测试确定了测量仪的性能参数,在观测波段390~960 nm内线偏振度的测量精度优于98.85%,偏振角测量精度优于0.1°。使用该测量仪进行外场测试,测量实际大气偏振光谱,并通过对比晴天和雾霾天气的偏振信息进行对比,发现在不同的天气情况下,偏振信息在各个波段的变化趋势有所区别,因此,对不同气象条件下天空偏振态变化内在机理的研究具有一定的理论和现实意义。

参考文献:

- [1] Kraft P, Evangelista C, Dacke M, *et al.* Honeybee navigation: Following routes using polarized-light cues [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2011, 366(1565): 703-708.
- [2] Wehner R. Desert ant navigation: How miniature brains solve complex tasks [J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2003, 189(8): 579-588.
- [3] Gao J, Fan Z G. *Bionic Polarized Light Navigation Method* [M]. Beijing: Science Press, 2014.
高隽, 范之国. 仿生偏振光导航方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [4] Brines M L, Gould J L. Skylight polarization patterns and animal orientation [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1982, 96(1): 69-91.
- [5] Voss K J, Liu Y. Polarized radiance distribution measurements of skylight. I. System description and characterization [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(24): 6083.
- [6] Hegedüs R, Åkesson S, Wehner R, *et al.* Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization? On the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation under foggy and cloudy skies [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 463(2080): 1081-1095.
- [7] Sun X B, Hong J, Qiao Y L. Investigation of measurements of polarized properties of atmospheric scattering radiation [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(1): 111-115.
孙晓兵, 洪津, 乔延利. 大气散射辐射偏振特性测量研究 [J]. 量子电子学报, 2005, 22(1): 111-115.
- [8] Lu H, Zhao K C, Ma Q, *et al.* Design and implementation of detection system for skylight polarized pattern using continuously

- spinning polarization analyzer [J]. *Journal of Astronautics*, 2014, 35(9): 1087-1094.
- 卢皓, 赵开春, 马强, 等. 采用连续旋转检偏器的天空偏振光探测装置设计与实现 [J]. 宇航学报, 2014, 35(9): 1087-1094.
- [9] Wang C, Fan Z G, Jin H H, *et al.* Design and optimization analysis of imaging system of polarized skylight pattern of full polarization [J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(10): 117-125.
- 王成, 范之国, 金海红, 等. 全偏振大气偏振模式成像系统的设计与优化分析 [J]. 物理学报, 2021, 70(10): 117-125.
- [10] Cui Y, Liu Y F, Liu K, *et al.* Effect of surface albedo on sky polarization mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(17): 10-17.
- 崔岩, 刘亚飞, 刘康, 等. 地表反照率对天空偏振模式的影响 [J]. 光学学报, 2021, 41(17): 10-17.
- [11] Hu R, Liang L, Wang F Y, *et al.* Portable measurement of neutral points in atmospheric polarization pattern [J]. *Laser Technology*, 2020, 44(6): 700-705.
- 胡睿, 梁磊, 王方原, 等. 大气偏振中性点的便携式测量 [J]. 激光技术, 2020, 44(6): 700-705.
- [12] Jiang R, Wang X, Zuo Y F, *et al.* Bionic navigation method based on local atmospheric polarization characteristics [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(S2): 724293.
- 蒋睿, 王霞, 左一凡, 等. 基于局部大气偏振特性的仿生导航方法 [J]. 航空学报, 2020, 41(S2): 724293.
- [13] Ren J B, Yang M, Song N. Attitude parameter extraction of carrier based on atmospheric polarized light [J]. *Navigation and Control*, 2021, 20(4): 41-48.
- 任建斌, 杨明, 宋妮. 基于大气偏振光的载体姿态参数提取方法 [J]. 导航与控制, 2021, 20(4): 41-48.
- [14] Chu J K, Guan C L, Liu Z, *et al.* Self-adaptive robust algorithm applied on compact real-time polarization sensor for navigation [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(2): 027107.
- [15] Fan Y, He X F, Fan C, *et al.* Atmospheric polarized light orientation method in cloudy weather [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(9): 324263.
- 范颖, 何晓峰, 范晨, 等. 多云天气条件下的大气偏振光定向方法 [J]. 航空学报, 2020, 41(9): 324263.
- [16] Cai H, Zhang R, Guan L, *et al.* Polarization orientation method for whole sky area in sunny weather [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2021, 50(9): 10-13.
- 蔡弘, 张然, 关乐, 等. 晴朗天气下全天空域偏振定向方法 [J]. 机电工程技术, 2021, 50(9): 10-13.
- [17] Li L L, Liang L, Zhang X S, *et al.* Design and test of a bionic polarization heading measurement system [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2021, 29(3): 356-361.
- 李磊磊, 梁琳, 张旭升, 等. 一种仿生偏振航向测量系统设计与测试 [J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(3): 356-361.
- [18] Li J J, Sun X B, Kang Q, *et al.* Polarization detection accuracy analysis of spectropolarimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0123002.
- 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): 0123002.