

文章编号 1004-924X(2026)11-1721-11

精密扫描式天空偏振光探测系统

盖泰龙¹, 褚金奎^{1,2}, 于 灏¹, 张 然^{1,2*}

- (1. 大连理工大学 辽宁省微纳米系统重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315020)

摘要:针对传统点源式偏振光传感器存在的多通道间一致性误差问题,为提升偏振光测量装置的测角精度与可靠性,构建了一种精密扫描式天空偏振光探测系统。基于大气偏振模式分布规律和偏振光检测原理,利用精密转台带动偏振片旋转,则转台定位精度直接影响偏振角测量精度,再将其编码器提供的原始数据处理得到的高分辨率、高精度角度信息作为偏振信息解算时的相位参考,通过采集离散角位置下的偏振光强数据,采用线性最小二乘拟合法将数据拟合得到理论偏振响应模型,从而解算偏振角。然后,通过载体定位系统获取的实时时间与经纬度信息,计算出地理坐标系下的太阳理论方位角,系统实时采集并解算得到载体坐标系下的太阳观测方位角。最后,将上述两组数据在统一的时间轴上对齐,并以时间偏移为变量进行逐点比对与统计分析,即可计算出系统的测角精度与稳定性指标。在室内及晴朗空旷的室外环境下分别进行实验,结果表明,该偏振光探测系统的室内测角精度可以达到 $\pm 0.01^\circ$,室外环境下测角精度可达 $\pm 0.02^\circ$,验证了其偏振角测量的高精度和有效性。

关键词:仿生导航;偏振光探测器;扫描式;单通道

中图分类号: TP212; TH741 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20263411. 1721 **CSTR:** 32169. 14. OPE. 20263411. 1721

Precision scanning sky polarized light detection system

GE Tailong¹, CHU Jinkui^{1,2}, YU Hao¹, ZHANG Ran^{1,2*}

- (1. Liaoning Provincial Key Laboratory of Micro-Nano systems, Dalian University of Technology,
Dalian 116024, China;
2. Ningbo Research Institute, Dalian University of Technology, Ningbo 315020, China)
* Corresponding author, E-mail: zhangr@dlut.edu.cn

Abstract: To address consistency errors among multiple channels in conventional point-source polarized light sensors and to improve the accuracy and reliability of angular measurements, a precision scanning polarized light detection system is proposed. Based on the distribution characteristics of atmospheric polarized light and the principles of polarization detection, a precision turntable is employed to drive the rotation of a polarizer. The positioning accuracy of the turntable directly determines the accuracy of polarization angle estimation. Encoder raw data are processed to obtain high-resolution, high-precision angular information, which is used as the phase reference for polarization calculation. Polarized light intensity data are acquired at discrete angular positions and fitted to a theoretical polarization response model using a linear least-squares method, enabling accurate determination of the polarization angle. Real-time temporal and

收稿日期: 2026-01-30; 修订日期: 2026-03-03.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 52275281)

geographic coordinate information provided by the carrier positioning system are used to calculate the theoretical solar azimuth angle in the geographic coordinate system, while the observed solar azimuth angle is simultaneously derived in the carrier coordinate system. By aligning these datasets along a unified time axis and performing point-by-point comparison and statistical analysis with time offset as a variable, the system's angular measurement accuracy and stability are quantified. Experimental results obtained in indoor and clear, open outdoor environments demonstrate that the proposed system achieves angular measurement accuracies of $\pm 0.01^\circ$ and $\pm 0.02^\circ$, respectively, thereby confirming its high precision and effectiveness in polarization angle measurement.

Key words: biomimetic navigation; polarized light detector; scanning type; single channel

1 引言

随着现代科技的进步,导航技术在陆地、航海、航空等领域的要求越来越高。目前,常见的主要导航方式有天文导航、地磁导航、惯性导航和卫星导航。其中,天文导航主要利用天文现象来确定方向,特别是观测天空中的特定天体,如北极星;地磁导航利用地球磁场来确定方向,这种原理测量的主要特点是操作简便、易于携带和使用,但测量精度会受地球磁场变化、电磁干扰等因素影响;惯性导航(陀螺仪导航)利用陀螺仪的定轴性和地球自转效应来实现导航,其主要特点是精度高、测量速度快且不受气候条件影响,但陀螺仪的性能和稳定性需要定期维护和校准;卫星导航的特点是精度高,测量速度快,但依赖于卫星信号^[1-4]。

太阳光是横电磁波,电矢量振动方向垂直其传播方向。阳光进入大气层后,经空气分子、气溶胶等散射及地表反射,转变为具有特定偏振分布的部分偏振光,形成半球天空中的大气偏振模式。该模式的分布特征由太阳位置、大气条件与地表特性三者共同动态调制,呈现稳定可测的偏振结构,为仿生偏振光导航提供了理论与信息基础,支持通过解析天空偏振信号实现自主定向^[5-6]。

对于点源式偏振传感器的研究,基于大气偏振模式以及生物偏振导航原理,Lambrinos 等在 1997 年最早成功设计了点源式偏振光导航传感器样机,该样机模仿蟋蟀对 3 个不同偏振敏感方向的感知机理,分别设置了检偏器透光轴方向为 0° , 60° 和 120° 的 3 组传感器通道。每组传感器主要由蓝色滤光片、线性检偏器、光电二极管与对

数放大器组成,最后根据 3 组传感器产生的信号确定机器人相对太阳子午线的方向。3 个通道的信号满足相位差互为 60° 的类三角函数关系,并在移动机器人平台进行了测试,验证了偏振光导航的可行性^[7-8]。

近年来,国内偏振光导航传感器研究取得了较大的进展。大连理工大学褚金奎团队通过模仿沙蚁的 3 对不同偏振角度敏感的偏振神经元,利用偏振片、光电二极管和对数运算放大器,把偏振光信号转化为三路电压信号,设计搭建了六通道的仿生导航传感器,利用传感器搭载的时钟模块和卫星导航模块获取地理位置的正北信息,求解体轴与正北方向的夹角实现导航^[9-12]。之后,课题组利用纳米压印工艺,在硅基光电二极管上制作了 6 个不同偏振方向的双层纳米金属光栅,并利用该光栅制成了新型的微偏振导航器件,实现了点源式偏振导航传感器的集成化。经过测试,得到的原始误差在 $\pm 0.8^\circ$ 以内,补偿后误差在 $\pm 0.1^\circ$ 以内。该传感器可以较好地满足偏振导航的要求^[13-15]。赵开春等采用相机成像结合旋转偏振片的方案,通过连续旋转电机带动偏振片进行周期性转动,可连续采集不同偏振方向下的光强信息,从而重构出完整的偏振模式。该方法不仅有效增强了系统对环境干扰的抑制能力,也显著提升了偏振探测的整体可靠性与稳定性^[16-17]。中北大学康健等在斯托克斯矢量的偏振光测量原理的基础上采用单个偏振光传感器通道设计并且搭建了一种快速旋转式天空偏振光信息探测系统^[18],通过 GPS 授时确定太阳子午线的位置,进而实时解算出航向角数据,在室内和天气晴朗、空旷的室外条件下完成了数据采集,

最大误差为 1.047° , 平均误差为 0.378° 。

传统点源式偏振光传感器发展时间长, 技术较成熟, 体积小, 实时性较好, 单次测量周期短, 虽实现了集成化, 但存在多通道一致性误差, 参数标定较为繁琐^[19-23]。现有采用成像式方案的旋转式偏振光传感器, 其高维像素级的偏振信息解算算法复杂度和硬件门槛较高; 而点源式旋转型单通道偏振光传感器部分部件采用齿轮传动, 存在装置传动误差且解算偏振信息所用数据量少, 影响测量精度。针对上述问题, 本文构建了一种精密扫描式天空偏振光探测系统, 基于光电检测模型, 完成了单通道偏振光检测光路结构设计和整体装置搭建。利用精密转台带动偏振片旋转对天顶偏振信息进行扫描采集, 转台定位精度直接影响偏振角测量精度, 再将其编码器提供的原始数据处理得到的高分辨率、高精度角度信息作为偏振信息解算时的相位参考, 通过对角度-电压数据对进行线性最小二乘拟合, 解算出理论偏振响应模型, 然后进行偏振信息分析, 实现了偏振角的高精度测量。

2 偏振光探测器的检测模型

太阳光进入地球大气层后, 与大气中的气体分子、气溶胶等成分发生瑞利散射与米氏散射等复杂相互作用, 从而转化为具有一定偏振特性的部分偏振光。因此, 在大气偏振光学与天空偏振模式探测研究中, 斯托克斯矢量成为对偏振光进行完整数学描述与定量表征的主流方法。基于该理论, 典型的大气偏振光传感器通常采用旋转检偏器的光路结构。待测的入射光首先通过一个绕光轴匀速旋转的线偏振片, 该偏振片作为检偏器, 将入射光的偏振信息调制为随时间周期性变化的光强信号。随后, 该信号由后端的光电探测器接收并转换为相应的电信号。

待测光的偏振态用斯托克斯矢量表示为:

$$S = [S_0, S_1, S_2, S_3]^T = [I, Q, U, V]^T, \quad (1)$$

其中: S_0 或 I 为检测到的总光强, S_1 或 Q 为水平 0° 与垂直 90° 方向线偏振光强度之差, S_2 或 U 为 45° 与 135° 方向线偏振光强度之差, S_3 或 V 为右旋与左旋圆偏振光强度之差(通常大气偏振中圆偏振分量极弱, 可近似为 0)。

当光通过一个光学元件(如检偏器, 也就是

线偏振片)时, 其偏振状态会发生改变。这个过程在数学上可以用穆勒矩阵 M 与入射斯托克斯矢量 S_{in} 的乘积来描述:

$$S_{out} = M \cdot S_{in}. \quad (2)$$

对于理想偏振片(透光轴方向为 θ), 其穆勒矩阵为:

$$M_p(\theta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由于光电探测器只响应光强(即斯托克斯矢量的第一个分量 S_0), 这里只关注 S_0^{out} 。

出射光强 I_{out} 为:

$$I_{out} = \frac{1}{2} [1 \quad \cos 2\theta \quad \sin 2\theta \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

将矩阵乘法展开可以得到偏振光测量的理论响应模型:

$$I(\theta) = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \sin 2\theta] = \frac{1}{2} [I + Q \cos 2\theta + U \sin 2\theta], \quad (5)$$

其中: $I(\theta)$ 是当检偏器方向为 θ 时, 光电探测器读取的光强(电压), θ 是检偏器角度, I, Q, U 是入射光的未知偏振参数。

计算偏振角 ϕ , 得到:

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan 2(U, Q). \quad (6)$$

该模型将偏振检测的物理过程转化为易于数学处理和参数提取的简洁形式, 为偏振态测量提供了理论依据和实用方法。

3 偏振光探测系统设计

3.1 系统工作方式

精密扫描式天空偏振光探测系统的偏振检测模块上, 一个完整的偏振响应单元主要由蓝光滤光片、线偏振片和光电二极管构成。一般大气条件下, 天空中蓝色波段的偏振度最高, 偏振模式最稳定, 故采用蓝色滤光片^[24]。其后放置的线偏振片通过其特定方向的透光轴, 从入射光中提取出特定振动方向的线偏振分量, 每个单元输出

的微弱电信号首先经过模拟放大电路进行调理增强,随后通过高精度模数转换器转换为数字电压信号,最终传输至上位机进行后续处理与分析。精密扫描式天空偏振光探测系统光电检测示意图如图 1 所示。

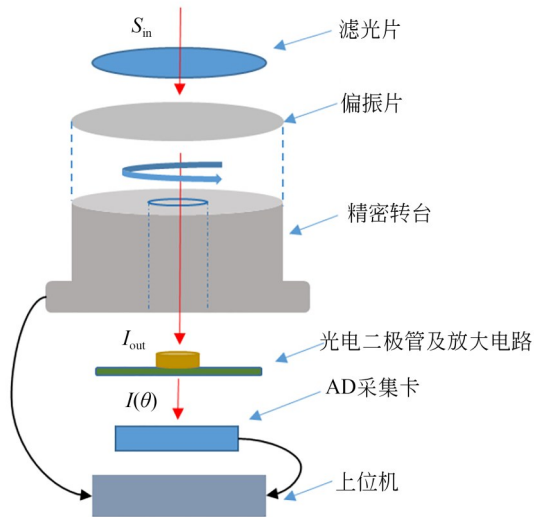


图 1 光电检测原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photoelectric detection principle

精密扫描式天空偏振光探测系统通过将单个偏振光探测通道集成于一套精密转台之上,构建了动态旋转探测方案。在转台运行期间,其驱动电机精确控制转子部分进行匀速旋转,而光学探测的核心元件线偏振片被安装在转子之上,随之进行高速旋转。光电器件等关键部件则被稳定安置于转台的定子部分底部,确保它们在测量过程中保持绝对静止。这种转子动、定子静的特殊构型,实现了偏振片的旋转扫描与光电信号的稳定接收相分离,从而在物理层面上将光波的偏振态变化直接编码为随时间变化的电信号。将精密转台编码器提供的原始信号进行脉冲计数处理并进行角度插值,可以得到角度信息。最终,系统将解算出的角度序列与同步采集到的电压信号序列进行严格的时间对齐与配对,生成了精确且相互对应的海量“角度 (θ) -电压 $I(\theta)$ ”数据对。这些数据对完整记录了被测光信号强度随偏振片透光轴方向变化的完整周期曲线,即理论偏振响应曲线。偏振信息采集过程如图 2 所示。

将得到的海量“角度 (θ) -电压 $I(\theta)$ ”数据对进

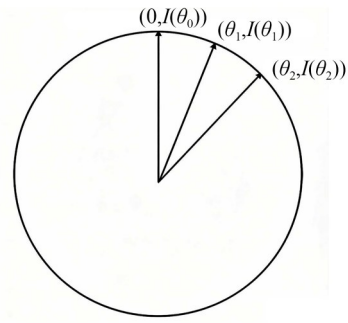


图 2 偏振信息采集过程

Fig. 2 Polarization information acquisition process

行数据处理。为了从这些离散的测量点中精确提取稳定的偏振信息,系统采用线性最小二乘拟合算法对数据进行处理,其主要目的在于获取一个理论模型来描述采集的实验数据:

$$I(\theta) = \frac{1}{2} [I + Q \cos 2\theta + U \sin 2\theta]. \quad (7)$$

拟合算法通过调整模型中的未知参数,使得模型计算出的曲线与所有实验数据点之间的整体误差平方和达到最小,从而提高拟合的稳定性和精度。当拟合完成后,算法直接输出最优参数解,进行进一步解算。

通过载体定位系统获取的实时时间与经纬度信息,可计算出地理坐标系下的太阳理论方位角,实时采集并解算得到载体坐标系下的太阳观测方位角。精密扫描式天空偏振光探测系统偏振信息测量流程如图 3 所示。

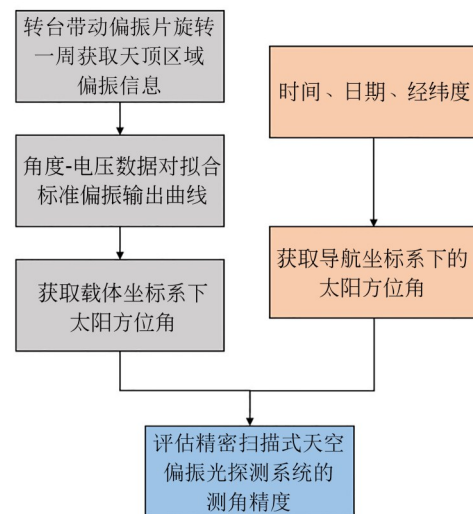


图 3 精密扫描式天空偏振光探测系统的工作流程

Fig. 3 Workflow of precision scanning sky polarized light detection system

3.2 系统结构设计

光电二极管作为核心光电转换器件,被固定在精密转台的底部底座(定子部分)上,确保其在测量过程中位置绝对静止。在转台的中轴空间内安装了一个内部设有光阑的镜筒,该镜筒顶部放置了一块平凸透镜,其作用是将大范围的人射光汇聚,有效增强到达探测面的光强,从而使整个探测系统在环境光较弱时仍能获取足够信噪比的输出信号。镜筒的底部则固定安装了光电二极管的配套镜头,确保经透镜汇聚后的光束能准确聚焦于镜头的中心感光点,最大化光能利用率并提升空间定位精度。在光路的最前端,即偏振片上方增加了蓝光滤光片,该滤光片严格筛选入射光的波段,让偏振度最强的蓝光入射,减少其他入射光对偏振信息的干扰。精密扫描式天空偏振光探测系统整体结构示意图如图 4 所示。

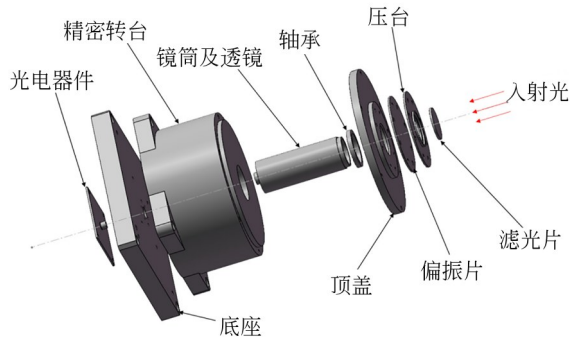


图 4 精密扫描式天空偏振光探测系统整体结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of overall structure of precision scanning sky polarized light detection system

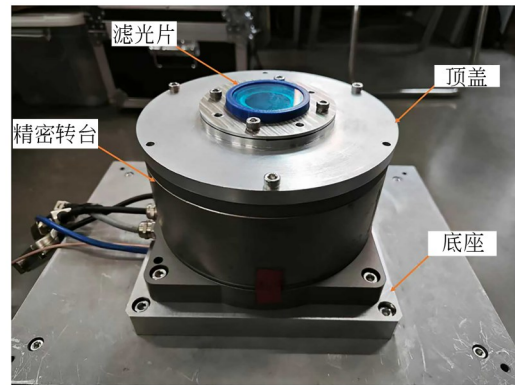


图 5 精密扫描式天空偏振光探测系统实物
Fig. 5 Physical diagram of precision scanning sky polarized light detection system

图 5 所示为精密扫描式天空偏振光探测系统实物图,其主要部件采用数控机床加工而成,其核心设计在于实现了光路中旋转部分与静止部分的机械解耦。镜筒及其内部透镜、底部光电器件的镜头作为一个整体,与顶盖及其所集成的滤光片、偏振片组件之间通过高精度轴承进行连接。该结构将系统划分为动态与静态两个模块:顶盖及以上光学部件随转台转子高速、平稳旋转,镜筒及以下部件则保持光学基准的静止状态。轴承不仅保障了旋转过程的高速平稳性,更使得处于装置顶部(旋转侧)与底部(静止侧)的全部核心光学元件始终维持在极高的机械同轴度范围内,从而为偏振信息的精确采集提供了稳定的结构基础。表 1 所示为相关硬件参数。

单通道光路设计中,内部光路根据焦距设计等距三级光阑,将光完全汇聚到光电二极管半径为 1.5 mm 的镜头上。

表 1 偏振光探测系统的相关硬件参数

Tab. 1 Relevant hardware parameters of polarized light detection system

硬件名称	关键参数	型号
光电二极管	光谱响应范围:190~1 100 nm	S8745-01
偏振片	工作波长:400~700 nm 消光比:9 000:1	XP42
滤光片	中心波长:(450±5) nm	bp450
透镜	工作波长:350~700 nm	GLA11-030-100
精密转台	主要尺寸:160 mm×160 mm×95 mm 编码器原始分辨率:(sin/cos)16384 定位精度:±30"	DDM170095

3.3 转台编码器数据处理

基于精密转台的扫描式天空偏振光探测系统,以精密转台高分辨率的角度输出作为偏振信息解算的核心相位参考。为确保解算精度,必须保证转台输出角度信息的准确性与可靠性。因此,本系统采用多通道同步 ADC 高速采集卡,对精密转台编码器输出的三路信号与光电器件的光强响应信号进行实时高速同步采集。通过软件控制采集卡启动,采集卡内部使用 4 颗独立 ADC 分别控制 4 个采集通道,来保持四路信号在时域上的完全对齐与采样时刻一致性,从而为后续的偏振信息解算提供无时偏的原始数据基础。

本系统对编码器输出的 A 相 ($\pm \sin$)、B 相 ($\pm \cos$) 正交信号与 Z 相(标志位)零位脉冲进行协同处理。采集得到的原始编码器模拟信号和电压信号相对应,基于编码器技术手册提供的原始信号周期参数,首先对 A、B 两路正交信号进行 4 倍频细分,因为截取数据段($360^\circ \sim 720^\circ$)转台是匀速转动的;基于 4 倍频脉冲计数对得到的编码器输出进行角度换算和线性插值,得到角度与电压数据对。处理过程中,Z 相脉冲作为绝对位置

基准,用于标定旋转周期的起始点并对连续角度数据进行逻辑分段,确保角度输出的连续性与循环一致性。在通过重复性实验验证数据处理结果的准确性与代码可靠性之后,对核心算法进行优化调整,以支持采集速度的灵活配置。需要说明的是,单通道扫描式偏振光探测系统属于分时采集系统,而在室外实验中,太阳方位角随时间持续变化。为避免因扫描周期过长而引入显著的方位角测量误差,必须保证系统具备足够高的采集速度,以满足其测量精度要求,同时还要保证编码器数据稳定计数所需要的样本量。

因为太阳方位角随时间变化,在采集速率限制下,需快速采集。本系统设定采集速度为 $360^\circ/\text{s}$,目标角度为 800° ,该采集速度能够保证编码器数据准确处理所需样本量,采集卡以最大采样率 192 kS/s 工作。编码器 0° 位置与偏振片 0° 方向经过实验标定,数据处理时,以编码器绝对 0° 位置作为起始参考,选取根据 Z 相信号截取的数据段,该段对应转台处于匀速转动状态,数据量约为 193k,数据处理所截取数据段信号持续时间为 1.029 s 。编码器脉冲计数结果如图 6 所示。

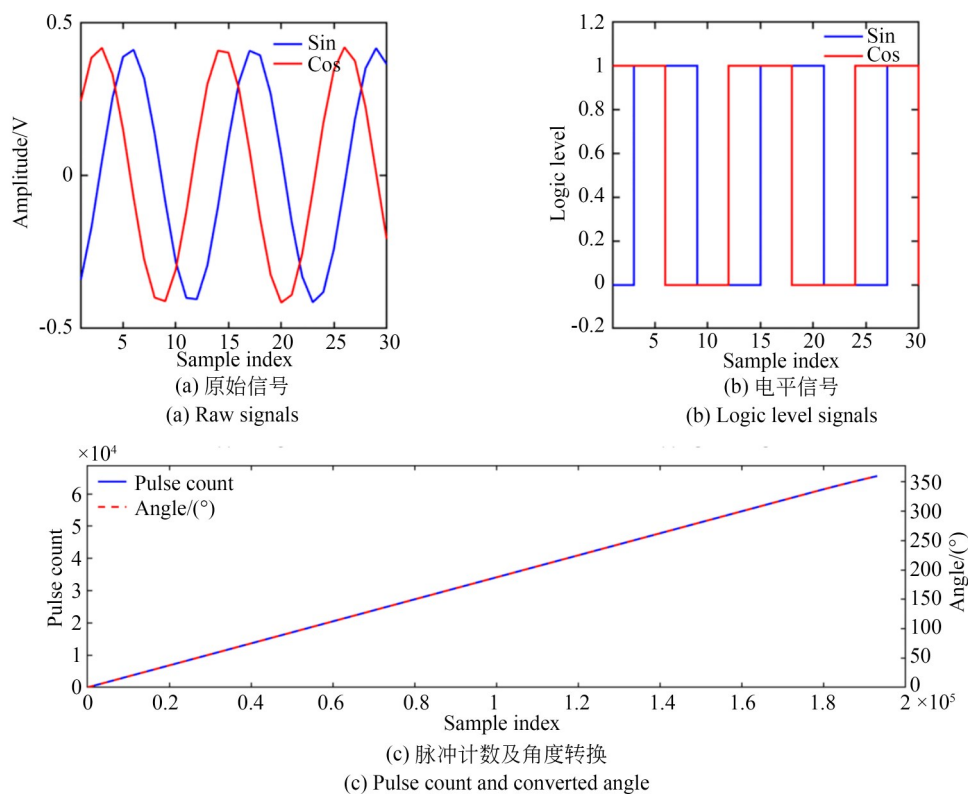


图 6 编码器脉冲计数处理

Fig. 6 Encoder pulse counting and processing

4 测量实验与结果

4.1 室内实验测角精度验证

为系统评估精密扫描式天空偏振光探测系统的测量可靠性及绝对测角精度,搭建室内实验平台进行验证。平台的核心光源采用积分球,其能提供均匀、稳定且无偏振特性的准自然光,为后续实验建立了可重复的基准光场。在该积分球光源的输出光路中,接入一套由精密转台驱动的标准偏振片,构成一个方向可精确调控的偏振光源系统。通过控制该转台的旋转角度,可生成某一固定偏振方向的线偏振光,作为采集装置的输入标准。将偏振光源转台与待测的采集装置转台刚性安装于同一光学平台之上。设计一套固定板材,确保两个转台的旋转轴心高度一致,使两转台表面安装的偏振片平面平行,尽可能实现两系统光轴的对准。室内实验平台搭建示意图如图 7 所示。

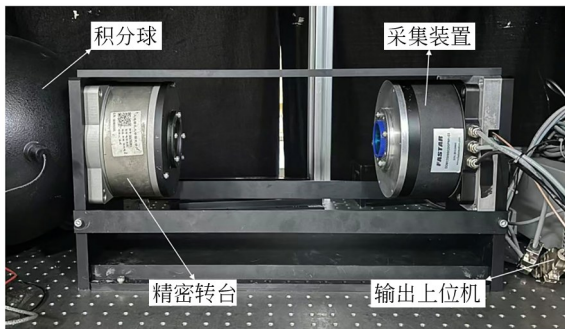


图 7 室内实验平台搭建

Fig. 7 Setup of indoor experimental platform

实验采用双转台结构,左侧积分球光源前方加装有精密旋转偏振片的转台,构成一个偏振方向可精确设定的标准光源,右侧则放置待测的偏振光采集装置。实验时,控制左侧转台依次旋转至 $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, \dots, 180^\circ$ 等预设角度 α , 右侧采集装置依次采集 0° 与预设角度 α 的偏振光信息,每个角度重复 5 次实验取平均值,以获取统计稳定的数据。完成数据采集后,对原始数据处理进行解算得到各设定角度下理论模型公式, 0° 位置对应:

$$I_0(\theta) = \frac{1}{2} [I_0 + Q_0 \cos 2\theta + U_0 \sin 2\theta]. \quad (8)$$

预设角度输出模型为:

$$I_\alpha(\theta) = \frac{1}{2} [I_\alpha + Q_\alpha \cos 2\theta + U_\alpha \sin 2\theta]. \quad (9)$$

将理论角度变化值与实际测量结果的变化

值逐点比较,计算测角误差,即:

$$\epsilon = (\phi_\alpha - \phi_0) \cdot \frac{180}{\pi} - (\alpha - 0). \quad (10)$$

图 8 所示为室内实验误差分布。经实验验证,在室内环境下,精密扫描式天空偏振光探测系统的 3σ 测角精度能达到 $\pm 0.01^\circ$, 均方根误差 (RMSE) 为 0.0031° 。相较于传统点源式偏振光传感器室内实验测角精度,提升了一个数量级^[25]。

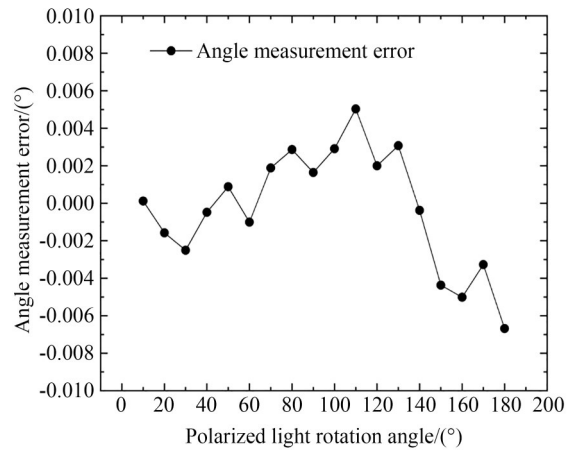


图 8 室内实验测角误差

Fig. 8 Indoor angular measurement error

同时进行部分偏振光实验,在积分球前方转台偏振片上方加入一个四分之一波片,通过转动波片模拟线偏振度变化。在积分球等其他环境条件不变的情况下,分别在不同偏振度下重复进行室内实验,将偏振光角度理论变化值与测量变化值对比,计算 RMSE,实验结果如表 2 所示。

表 2 不同偏振度下测量结果的均方根误差

Tab. 2 RMSE of measured result under different DoP (Degree of Polarization) levels

幅值/V	偏振度	RMSE/(°)
7	0.689 2	0.003 1
5	0.492 4	0.006 9
3	0.295 6	0.009 5

由室内实验可知,当偏振度下降时,其测角精度均方根误差变大,测量精准度降低。

4.2 室外实验测角精度验证

将采集装置布设于户外实验场地进行验证,本次实验选址在大连理工大学西部校区(北纬 $38^\circ 52' 58''$, 东经 $121^\circ 30' 37''$),采用相对测角精度

的验证方案展开。该系统目前用于静态场景固定点位安装使用,针对装置平面度,采用高精度水平仪进行调整优化。实验过程中,首先将采集装置安置于操场周围开阔无障碍的位置。安装完成后使用水平仪对装置采集平面进行调平,确保其两轴方向的平面度均调整至 $0\sim 0.05^\circ$ 内。装置通电稳定运行一段时间后,开始进行数据采集,每隔一分钟采集一次。每完成一组数据(一个方向测量10组)采集后,将装置在原地沿顺时针方向旋转约 90° ,重新调平后继续进行数据采集。依此方法,在多个不同方向重复上述步骤,完成多组、多方向的数据采集工作,室外实验平台搭建如图9所示。

使用卫星导航实时记录偏振光探测装置所在位置的经纬度信息,并同步采集系统时间(精

度至毫秒级)。结合天文年历,可准确计算出对应时间与地点的太阳理论方位角。在连续观测过程中,记录理论太阳方位角随时间的变化序列,并将其与探测系统通过采集、解算得到的载体坐标系下的太阳方位角变化序列进行对比。通过计算二者差值,评估系统的测角精度。为排除系统累积误差对评估结果的影响,在每个固定方向的多次重复测量中,均以该方向首次采集的数据为基准,计算后续各次测量相对于该基准的偏差。分别以时间推移计算载体在 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 方向的测角误差并绘制误差分布,如图10所示。在室外晴朗天气、无云环境下,精密扫描式天空偏振光探测系统相对测角精度能够达到 $\pm 0.02^\circ$,RMSE为 0.0115° 。

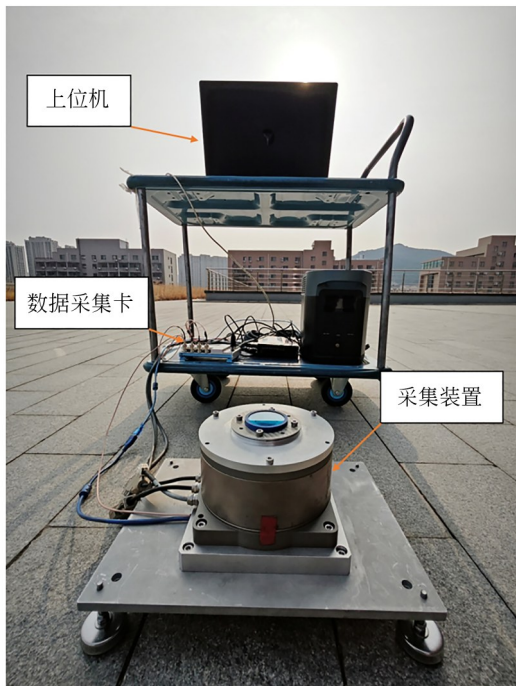


图9 室外实验平台搭建

Fig. 9 Outdoor experimental platform construction

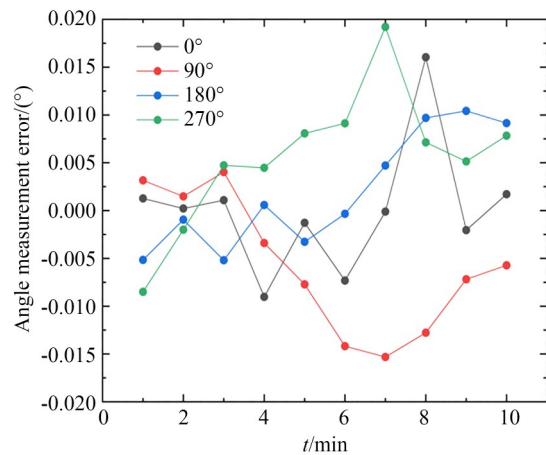


图10 室外实验测角误差分布

Fig. 10 Distribution of outdoor experiment angular error

在不同太阳高度、不同天气环境下,进行多次实验,分别计算测角误差的RMSE,实验结果及实验对应天气情况如表3和图11所示。可以发现,云层、太阳高度造成偏振度降低等影响,也会在一定程度上降低测角精度。

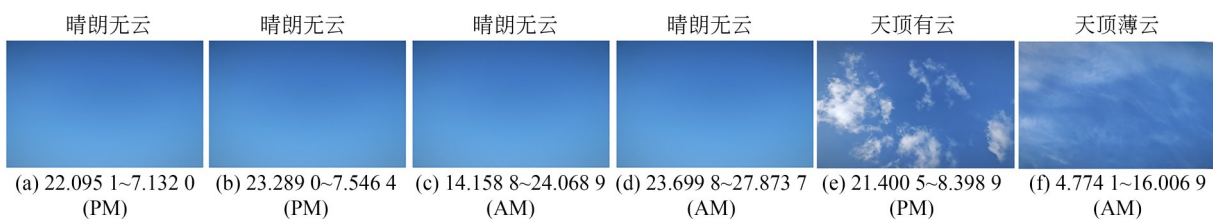


图11 每次实验对应天气情况

Fig. 11 Weather conditions for each experimental trial

表 3 不同天气环境下实验结果

Tab. 3 Experimental results under different weather conditions

序号	太阳高度角变化/ (°)	太阳方位角变 化/(°)	RMSE/ (°)
A	22.095 1~7.132 0 (下午)	216.965 4~ 238.079 2	0.012 6
B	23.289 0~7.546 4 (下午)	215.008 4~ 237.247 1	0.012 8
C	14.158 8~24.068 9 (上午)	126.823 6~ 141.376 9	0.013 6
D	23.699 8~27.873 7 (上午)	152.218 9~ 167.476 0	0.023 9
E	21.400 5~8.398 9 (下午)	213.649 8~ 231.456 9	0.044 5
F	4.774 1~16.006 9 (上午)	123.228 1~ 136.947 9	0.053 7

5 结 论

本文提出了一种精密扫描式天空偏振光探测系统及其测角精度验证方法,完成了其结构设计及整体搭建,通过将高精度精密转台提供的角

参考文献:

- [1] 詹银虎,张超,华跃升,等. 利用行星进行快速天文定向[J]. 测绘科学技术学报, 2011, 28(5): 338-341.
ZHAN Y H, ZHANG CH, HUA Y SH, *et al.* Research on fast astro-geodetic orientation by observing planets[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2011, 28(5): 338-341. (in Chinese)
- [2] 郭才发,胡正东,张士峰,等. 地磁导航综述[J]. 宇航学报, 2009, 30(4): 1314-1319, 1389.
GUO C F, HU ZH D, ZHANG SH F, *et al.* A survey of geomagnetic navigation[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(4): 1314-1319, 1389. (in Chinese)
- [3] 张炎华,王立端,战兴群,等. 惯性导航技术的新进展及发展趋势[J]. 中国造船, 2008, 49(S1): 134-144.
ZHANG Y H, WANG L D, ZHAN X Q, *et al.* The new advancement and trend of inertial navigation technology[J]. *Shipbuilding of China*, 2008, 49(S1): 134-144. (in Chinese)

度信息作为偏振信息解算过程中的相位参考,与光电器件采集的电压信息生成海量的角度-电压数据对,再基于线性最小二乘拟合得到对应的理论偏振模型公式,进而进行偏振角解算。将通过时间经纬度信息计算得到的理论太阳方位角随时间变化值与实测变化值进行对比,验证测角精度。精密扫描式天空偏振光探测系统在晴朗无云室外环境下相对测角精度能够达到 $\pm 0.02^\circ$,相对于传统点源式偏振光传感器和目前的单通道偏振光传感器,测角精度有一定提升。该系统提供了一种偏振光测量思路,可用于与其他导航方式组合用于寻北。后续可以对采集速度以及载体水平度问题进行优化,有望在偏振光探测领域得到进一步应用。

作者贡献声明:

盖泰龙:结构设计,算法设计,系统搭建,实验验证及论文撰写;

褚金奎:实验指导,技术支持;

于 灏:技术讨论,研究实施协调;

张 然:方案提出,研究指导,项目管理及论文修改。

- [4] 王巍,袁伟杰,吴志刚. 仿生导航传感器技术研究[J]. 导航与控制, 2025, 24(5): 1-13, 38.
WANG W, YUAN W J, WU ZH G. Research on bionic navigation sensor technology[J]. *Navigation and Control*, 2025, 24(5): 1-13, 38. (in Chinese)
- [5] 金仁成,裴森,周梓健,等. 运动加速度抑制的偏振光/MIMU组合导航 SHKF 姿态解算[J]. 光学精密工程, 2024, 32(22): 3277-3287.
JIN R CH, PEI S, ZHOU Z J, *et al.* Polarized light/MIMU integrated navigation SHKF attitude solving algorithm for motion acceleration suppression[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(22): 3277-3287. (in Chinese)
- [6] 梁华驹,白宏阳,周同,等. 传感器倾斜对于偏振光航向解算的影响[J]. 光学精密工程, 2021, 29(5): 1024-1042.
LIANG H J, BAI H Y, ZHOU T, *et al.* Impact of sensor tilt on bio-inspired polarized skylight orientation determination[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(5): 1024-1042. (in Chinese)
- [7] LAMBRINOS D, KOBAYASHI H, PFEIFER

- R, *et al.* An autonomous agent navigating with a polarized light compass [J]. *Adaptive Behavior*, 1997, 6(1): 131-161.
- [8] LAMBRINOS D, MÖLLER R, LABHART T, *et al.* A mobile robot employing insect strategies for navigation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30(1/2): 39-64.
- [9] 褚金奎, 林木音, 王寅龙, 等. 偏振光传感器的无人船导航与编队应用[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(8): 1661-1669.
- CHU J K, LIN M Y, WANG Y L, *et al.* Application of polarization sensor to unmanned surface vehicle navigation and formation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1661-1669. (in Chinese)
- [10] 褚金奎, 关乐, 李世奇, 等. 大气偏振模式图分布及仿生偏振导航技术[J]. *遥感学报*, 2018, 22(6): 969-979.
- CHU J K, GUAN L, LI SH Q, *et al.* Atmospheric polarization field pattern distribution and polarization navigation technology[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(6): 969-979. (in Chinese)
- [11] 褚金奎, 赵开春. 仿生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]. *Micronano-electronic Technology*, 2005, 42(12): 541-545. (in Chinese)
- [12] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 312-318. (in Chinese)
- [13] 张强, 赵开春, 褚金奎, 等. 一种嵌入式仿生测角传感器的设计与实现[J]. *传感器与微系统*, 2008, 27(9): 106-108, 111.
- ZHANG Q, ZHAO K CH, CHU J K, *et al.* Design and implementation of bionic angular measurement sensor based on embedded system[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008, 27(9): 106-108, 111. (in Chinese)
- [14] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2419-2426. (in Chinese)
- [15] CHU J K, WANG Z W, GUAN L, *et al.* Integrated polarization dependent photodetector and its application for polarization navigation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(5): 469-472.
- [16] 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]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 239-245. (in Chinese)
- [17] 韩勇, 赵开春, 尤政. 快速旋转式偏振成像探测装置的设计[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(10): 2345-2354.
- HAN Y, ZHAO K CH, YOU ZH. Development of rapid rotary polarization imaging detection devices[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(10): 2345-2354. (in Chinese)
- [18] 康健, 马伟, 李沅. 旋转式天空偏振光的航向角检测系统[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(7): 2696-2700.
- KANG J, MA W, LI Y. Heading angle detection system of rotatory sky polarized light [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(7): 2696-2700. (in Chinese)
- [19] 赵开春, 褚金奎, 张强, 等. 新型仿生偏振测角传感器及角度误差补偿算法[J]. *宇航学报*, 2009, 30(2): 503-509.
- ZHAO K CH, CHU J K, ZHANG Q, *et al.* A novel polarization angle sensor and error compensation algorithm for navigation[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2): 503-509. (in Chinese)
- [20] 刘昊, 叶红军, 刘鹏飞, 等. 基于仿生偏振光的定向方法及其误差补偿方法[J]. *计算机测量与控制*, 2025, 33(1): 242-251, 260.
- LIU H, YE H J, LIU P F, *et al.* Orientation and its error compensation methods based on bionic polarized light [J]. *Computer Measurement & Control*, 2025, 33(1): 242-251, 260. (in Chinese)
- [21] XIAN Z W, HU X P, LIAN J X, *et al.* A novel angle computation and calibration algorithm of bio-

- inspired sky-light polarization navigation sensor [J]. *Sensors*, 2014, 14(9): 17068-17088.
- [22] ZHAO H J, XU W J. A bionic polarization navigation sensor and its calibration method[J]. *Sensors*, 2016, 16(8): 1223.
- [23] WANG Y L, CHU J K, ZHANG R, *et al.* A bio-inspired polarization sensor with high outdoor accuracy and central-symmetry calibration method with integrating sphere [J]. *Sensors*, 2019, 19 (16) : 3448.
- [24] 严海波,高隼,王玲妹,等. 气溶胶散射特性及其影响下大气偏振模式变化分析[J]. *光散射学报*, 2015, 27(1): 1.
- YAN H B, GAO J, WANG L M, *et al.* The analysis of skylight polarization pattern change influenced by aerosol's scattering properties [J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 2015, 27(1): 1. (in Chinese)
- [25] KONG F, GUO Y J, ZHANG J H, *et al.* Review on bio-inspired polarized skylight navigation [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36 (9): 14-37.

作者简介:



盖泰龙(2000—),男,山西临汾人,硕士研究生,2023年于中北大学获得学士学位,主要从事仿生偏振光导航方面的研究。E-mail: 1226636713@qq.com

通讯作者:



张然(1984—),男,辽宁锦州人,博士,副教授,博士生导师,2007年、2013年于大连理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事仿生偏振光导航、仿生视觉认知技术、亚波长光学结构与微纳传感器及执行器等方面的研究。E-mail: zhangr@dlut.edu.cn