

恶劣天气下近紫外波段的偏振成像技术研究

李 皓, 李 沅, 侯 琪

(中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对云层会降低天空光的偏振特性, 造成航向角数据误差较大的问题, 选用近紫外波段对恶劣天气进行天空偏振模式的探测; 首先使用太阳光度计对不同波段的偏振信息进行观测, 分析数据变化趋势得出紫外波段对阴天天气偏振光导航存在优势, 然后设计了一套偏振信息导航传感器系统, 在不同天气下通过切换紫外滤光片实现可见光、近紫外光的交替探测; 试验结果表明: 在少云、薄云天气采用紫外波段进行探测相较于可见光波段优势明显, 解算的航向角误差降低了 60.68%; 而随着云层的增加, 在积雨云天气获得的偏振图像有所弯曲, 但太阳子午线的辨识度依然很高, 所得航向角数据较为准确, 从而验证了近紫外波段在恶劣天气条件下采集偏振信息的优势。

关键词: 航向角; 近紫外波段; 天空偏振模式; 太阳光度计; 紫外滤光片; 太阳子午线

Polarization Imaging Technology of Near Ultraviolet Band in Severe Weather

LI Hao, LI Yuan, HOU Qi

(School of Information and Communication Engineering, North Central University, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In view of the problem that clouds reduce the polarization characteristics of light in the sky, which causes the large error of heading angle, a near-ultraviolet band is selected to detect the sky polarization mode in bad weather. Firstly, the sun photometer on different bands of polarization information is used to analysis the trend of data variation with ultraviolet band and obtain the advantage of polarization light navigation in cloudy weather, and then a set of polarization information navigation sensor system is designed, an ultra violet (UV) filter is switched to alternately realize visible light and near ultraviolet detection in different weather. The experimental results show that the detection performance of ultraviolet band is superior to that of visible band in thin cloud weather, and the calculated heading angle error of ultraviolet band is reduced by 60.68%. However, with the increase of cloud thickness, the obtained polarization image is slightly wrapping in cumulonimbus cloud weather, but the identification of the solar meridian is still high, and the heading angle is more accurate, which verifies the advantage of near-ultraviolet band in collecting polarization information in severe weather.

Keywords: heading angle; near ultraviolet band; sky polarization mode; sun photometer; UV filter; solar meridian

0 引言

导航是载体运用光学、电学、磁学、声学等各种方法确定自身相对位置, 进而实现由起点准确、快速、安全地沿着预定轨迹到达目的地的方法。而随着科学技术的进步发展, 导航系统广泛应用于各个领域, 如通信、航空等, 因此对导航系统的可靠性和准确性提出了更高的要求^[1]。常用的导航系统如卫星导航容易受到人为干扰, 惯性导航有着误差随时间累计的缺点, 根据大气偏振模式所提供的准确信息以及抗干扰能力强。误差不随时间累计的优点, 天空偏振光导航成为了当下的研究热点。仿生偏振光导航是近年来发展起来的一种自主导航方法, 其实质就是通过观测天空大气偏振模式从而获取到相应的偏振信息来完成

导航。因此, 天空偏振模式的研究对于偏振光导航至关重要^[2-4]。现有的偏振光导航技术主要针对晴朗无云天气, 并且获得了较为准确的定向精度^[5-6]。然而在阴天等恶劣天气条件下, 云层对大气偏振模式产生较大的干扰, 无法获得准确的导航信息。因此如何在云层天气条件下获取准确的偏振信息, 提高偏振光导航在多种天气条件下应用的可靠性成为一个重要的研究方向^[7-9]。

2018年, 桂林电子科技大学的刘小燕使用 CE318 全自动天空辐射计在桂林地区进行实际观测, 对不同天气下红、绿、蓝 3 种波段的偏振图像进行采集, 试验结果表明云层会降低天空偏振度, 但并没有对不同波段的偏振图像进行横向对比分析^[10]; 2019年, 法国马赛大学 Dupeyroux 采用

收稿日期: 2022-09-20; 修回日期: 2022-10-26。

基金项目: 山西省青年科技研究基金资助项目(201901D211251)。

作者简介: 李 皓(1994-), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事偏振光导航、信号与信息处理方向的研究。

通信作者: 李 沅(1982-), 女, 山西忻州人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事光电检测, 信号与信息处理, 自动武器导航, 人工智能方向的研究。

引用格式: 李 皓, 李 沅, 侯 琪. 恶劣天气下近紫外波段的偏振成像技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 230-236.

紫外光电二极管、步进电机驱动偏振片设计了一个针对紫外偏振光的单通道扫描式偏振光探测装置, 并将其安装在仿沙蚁六足机器人上进行试验^[11]; 2021 年大连理工大学历祥对阴天天气条件下天空偏振模式做了研究, 对不同波段的偏振模式进行实际观测, 通过试验验证了阴天天气下紫外波段天空偏振模式优于可见光波段^[12], 但没有得到准确的导航信息对比结果。

针对上述问题, 为了扩展偏振光探测器的环境适应性, 降低云层对偏振信息的干扰, 本文首先采用太阳光度计进行实际观测, 通过数据分析验证近紫外波段对阴天天气偏振光导航存在优势, 然后在阴天天气下搭建偏振信息导航传感器系统, 对紫外波段的偏振信息进行探测, 在不同的天气条件下进行室外试验, 获取到准确的航向角信息并通过与可见光波段数据进行比较分析, 验证了紫外波段在恶劣天气条件下采集偏振信息的优势。

1 导航机理分析

1.1 成像式偏振光传感器测试原理

在大气偏振模式的研究中, 斯托克斯矢量能够很好的描述入射光与出射光的关系。如式 (1) 所示, I 为总强度, Q 为水平方向的直线偏振分量; U 为 45° 方向的偏振光分量, 由于在自然环境中, 偏振光的圆偏振分量很小, 可以忽略不计。因此通过 3 个偏振方向的光强值就可以计算出入射光的斯托克斯矢量^[13]。

$$I'(\varphi) = \frac{1}{2}[I + Q(\cos 2\varphi) + U(\sin 2\varphi)] \quad (1)$$

要获取天空光的偏振特性, 需要选取 3 个不同的 φ 带入式 (1) 中建立方程组求解 I 、 Q 、 U 。本文通过旋转偏振片使 φ 分别等于 0° 、 45° 和 90° , 获取结果如式 (2) 所示。

$$\begin{cases} I = I'(0^\circ) + I'(90^\circ) \\ Q = I'(0^\circ) - I'(90^\circ) \\ U = 2I'(45^\circ) - I'(0^\circ) - I'(90^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

测试天空光的偏振度 Dop 和偏振角 Aop 分别表示为:

$$\begin{cases} Dop = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ Aop = \frac{1}{2} \left(\arctan \frac{U}{Q} \right) \end{cases} \quad (3)$$

偏振方位角 AOE 由天空导航坐标系中某观测点的偏振方向向量和太阳子午线切线方向的夹角构成, 计算公式如式 (4) 所示, 其中 (i, j) 为图像中像素点的坐标; h, w 分别为图像的高和宽^[14]。

$$AOE = \begin{cases} AOP(i, j) - \arctan\left(\frac{i-h/2}{j-w/2}\right) & -90^\circ \leq AOE(i, j) \leq 90^\circ \\ AOP(i, j) - \arctan\left(\frac{i-h/2}{j-w/2}\right) - 180^\circ & AOE(i, j) > +90^\circ \\ AOP(i, j) - \arctan\left(\frac{i-h/2}{j-w/2}\right) + 180^\circ & AOE(i, j) < -90^\circ \end{cases} \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 计算得到的偏振度和偏振方位角

图像实际上为一个列为图像宽, 行为图像高的矩阵, 偏振度矩阵在太阳子午线和反太阳子午线方向上能观察到两个偏振度最低的点, 即为中性点, 偏振角矩阵取值 $[-90^\circ, 90^\circ]$, 沿太阳子午线呈对称分布, 这一分布模式即为大气偏振模式, 包含全天空的偏振信息。相比于偏振度分布模式, 偏振方位角分布模式受天气的影响较小, 始终关于太阳子午线对称, 对外界大气变化具有更好的稳定性。因此, 偏振方位角分布模式稳定性更好, 更加适合作为偏振光导航的导航信息源, 利用太阳子午线方位角信息获取航向角更为准确。通过直线检测方法确定太阳子午线的位置后将拟合的直线与参考坐标系正北方向的夹角作为太阳子午线方位角, 实际太阳方位角可由定位授时设备提供的位置时间信息配合日梭万年历推导的太阳方位角公式进行解算, 进而求得载体航向角。载体航向角 β_k 和太阳子午线的关系如图 1 所示。

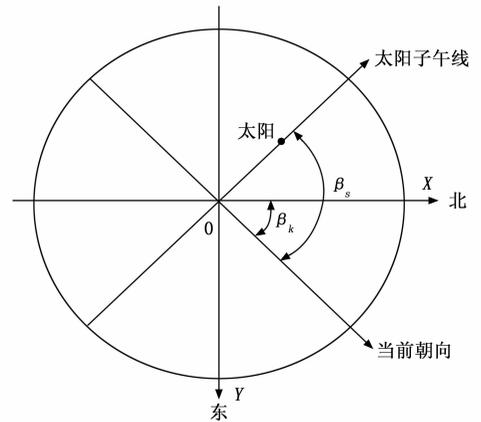


图 1 航向角与太阳子午线和正北方向的关系

实际太阳方位角 β_s 可以通过以下公式解算, 解算时必须通过太阳时角 t 进行计算;

$$\beta_s = \arccos \frac{\sin \theta_s \sin \omega - \sin \delta}{\cos \theta_s \cos \omega} \quad (5)$$

其中: ω 表示地理纬度, δ 表示太阳赤纬, θ_s 表示太阳高度角, 可用如下公式解算:

$$\theta_s = \arcsin(\sin \omega \sin \delta + \cos \omega \cos \delta \cos t) \quad (6)$$

t 为太阳时角, 表示天子午圈与天体的赤纬圈在北极所称的球面角, 或者是在天赤道上所夹的弧度。在地球上进行观测时, 同一时刻, 对同一精度、不同纬度的人来说, 太阳对应的时角时相同的。由于地球自转, 太阳时角每小时增加 15° , 可直接用时间取代太阳时角, 用 $0 \sim 24$ 时代替 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。太阳时角 t 于北京时间 ts 的关系如式 (7) 所示, 其中 κ 为当地地理经度。

$$t = 15[(ts + \frac{\kappa - 120}{15}) - 12] \quad (7)$$

太阳的位置可能会位于如图 1 示的第一象限, 也可能位于与上图相反的方向即第三象限, 利用太阳子午线解算方位角信息时无法准确的找到太阳的位置, 这会导致在航向角的计算过程中会出现两种结果, 这种现象被称为太

太阳子午线的二义性问题。为了得到准确的航向角数据,需要在获取太阳子午线方位角信息的同时准确地得到当时太阳的具体位置。由偏振度图像的分布规律可知,偏振度关于最大偏振度线对称分布,再结合其以中性点为中心呈环状分布以及太阳附近的偏振度为 0 的特点,可以得到以最大偏振度线为对称轴的偏振度两侧分布中,有太阳一侧的偏振度总和要小于无太阳的一侧,由此可以得到太阳的位置信息,从而消除太阳子午线二义性对航向角计算结果的影响^[15]。

1.2 太阳子午线提取方法

偏振光方位角分布模式以太日子午线为轴呈对称分布,在理想大气条件下,偏振光分布模式中太阳子午线是一条直线,但是在实际试验过程中,在大气中的大颗粒物以及云层的干扰下,此时的天气条件并不完全符合 Rayleigh 散射理论,还会伴随有 Mie 散射的发生,这会使得太阳子午线的位置发生偏移、弯曲,为了能在恶劣天气条件下提取到准确的太阳子午线信息,本文选用基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法,并使用成熟的边缘检测图像处理技术提取太阳子午线区域,结合对称性分布关系解算出准确的太阳子午线方位角。

Hough 变换是一种从图像中提取直线的常用方法,检测直线在图像中穿过最多的相关点,受噪声的影响比较小。它采用表决方式来估计直线的特征,找出图像完成边缘检测后的边缘点及其所有可能经过该点的直线,将这些直线由直角坐标系转化为极坐标系方程来表示,这些参数方程在 Hough 空间内会交于一点成为 Hough 峰值点,提取该点即可得到边缘点所成直线的表达式。不同的边缘检测算法和直线拟合算法会受到图像像素大小、噪点和边缘灰度值突变程度等的影响,从而干扰大气偏振模式图中太阳方位角的解算结果。为了验证基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法的可行性,通过仿真实验与最小二乘法拟合太阳子午线方位角的检测方法进行对比,观察在理想情况下使用检测算法解算太阳子午线偏转方向的准确程度。为了得到较好的边缘检测效果,选用在太阳子午线边缘检测方面具有很好性能的 Canny 算子,该算子通过高斯平滑降噪、双阈值算法检测以及连接边缘等操作达到最优的边缘检测效果,对比结果如图 2 所示。



(a) Hough 变换提取直线结果

(b) 最小二乘法提取直线结果

图 2 Canny 算子下 Hough 变换与最小二乘法拟合结果对比

从图 2 中可以看出, Canny 边缘检测算子下使用最小二

乘法拟合太阳子午线出现了比较大的偏差。观察结果图形可以看出,该边缘检测算法在图像中心出现噪点,使得特征点分布发散,由于最小二乘法会将检测到的所有特征点进行直线拟合,噪点的出现会严重干扰拟合结果,降低最小二乘法拟合太阳子午线的精度,甚至影响航向角的解算结果。而 Hough 变换是检测直线在图像中穿过最多的相关点,噪声对 Hough 变换的影响较小,所以提取的结果更为准确,更适合作为太阳子午线的提取方法。

1.3 阴天天气适应性设计

云是最常见的天气现象,尤其在海拔较高的黄土高原,扬尘、阴天以及雨雪天气时常会有,大颗粒的扬尘、云层中的水滴等会对入射太阳光产生散射作用,会影响太阳光在大气中的传输路径,进而影响实际采集到的天空偏振图像,因此天气条件对天空偏振模式探测结果的影响也不可忽视。在多云天气下使用由单反相机搭配鱼镜头组成的偏振成像探测装置对可见光波段的天空图像进行观测,所得灰度图和偏振角图像如图 3 所示^[16-17]。

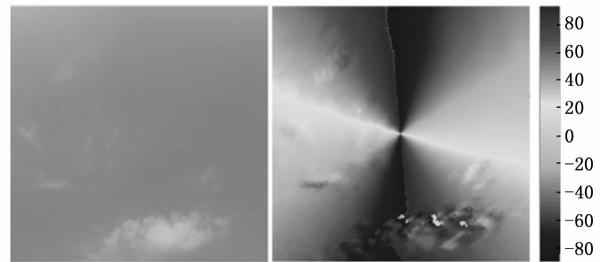


图 3 云层对天空偏振角的影响图

由图 3 可知在云层的干扰下,偏振角图像出现扭曲、弯折和噪点等情况,导致太阳子午线识别出现误差甚至错误,干扰方位角解算结果,给偏振信息观测造成了不便,使其无法为导航提供较为清晰的方向参考依据^[18]。

为了在不同天气条件下获取精确的偏振信息,就必须降低甚至消除云层对偏振模式的干扰。根据昆虫对偏振敏感波段的研究,本文使用全自动太阳光度计对大气中不同光波段的辐射量和偏振模式进行观测。太阳光度计安装有中心波长为 340 nm、380 nm、440 nm、500 nm、675 nm、870 nm、936 nm、1 020 nm 和 1 640 nm 半波宽度为 10 nm 的 9 个窄带滤光片,可同时观测这九个波段区间的太阳辐射数据^[19-20]。如图 4 所示。

我们在可见光和近紫外波段通道前加装简易的偏振片旋转装置,在晴朗天气、阴天薄云、阴天扬尘、阴天厚云天气同时观测多个波段区间的太阳辐射数据并求解偏振度。观测结果如图 5 所示。

由图 5 可知,晴朗天气下可见光波段偏振度要优于近紫外光波段偏振度;而在云层的干扰下,近紫外波段偏振度表现出更好的稳定性,随着天气条件的恶化,近紫外光波段偏振度衰减程度较小,验证了近紫外波段对阴天天气偏振光导航存在优势。选择在有云层时,使用 350~360 nm



图 4 全自动太阳光度计

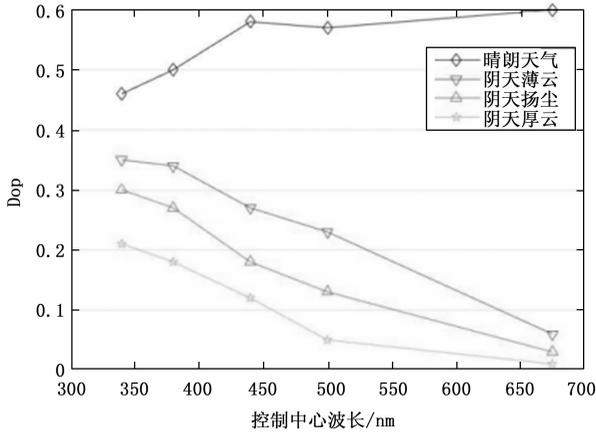


图 5 不同波段下的天空偏振度结果

的近紫外带通滤光片使感光器件只接受这一特定波段的入射光, 提高系统的环境适应性^[21-22]。

2 偏振信息导航传感器系统介绍

2.1 偏振信息导航传感器系统总体方案

由于室外试验需要较长的时间并且拍摄环境受天气影响较大, 因此对传感器装置在集成度、稳定性和便携性方面提出了较高的要求。本文选用小型工业相机和光电二极管来同时采集可见光波段和近紫外波段的大气偏振模式, 设计了一套偏振信息导航传感器系统, 该系统以 Xilinx 公司的 ZYNQ UltraScale+™ MPSoC XCZU4EV 为主控芯片。

ZYNQ UltraScale+™ MPSoC 系列芯片是 Xilinx 公司设计生产的第二代平台, 以 ARM 处理器为核心将 FPGA 和视频编码器等部分集成起来, 并且还包含了内部存储器、外部存储器接口 (DDR) 和大量外设 (IOU), 外设主要包含 USB、以太网、IIC、UART 等。既可以安装 Linux 操作系统, 充分运用该操作系统驱动完善、例程丰富和开发简单的优势, 又能利用 FPGA 的多种高速 IO 高速采集传感器数字信号进行处理运算, 各部分在芯片内部通过 AXI 高速总线进行连接。

ZYNQ 芯片的部分性能参数如表 1 所示。

表 1 芯片部分性能参数

参与项目	型号规格
ARM	Quad-core ARM Cortex-A53 1.5 GHz
RPU	Dual-core ARM Cortex-R5 600 MHz
DDR4	PS 端最高 2 400 Mbps, PL 端最高 2 133 Mbps
高速接口	PS 端 4 对 GTR, PL 端 4 对 GTH
触发器	176 K
Ultra RAM	13.5 MB
DSP	728

传感器系统主要由光学检测模块和采集存储模块等部分组成, 如图 6 所示为系统的整体结构图。天空中的部分偏振光经过滤光片和偏振片后由紫外增强型光电二极管和 COMS 图像传感器接收, 转换为可阅读、可操作的数字信号, 最后可选择在机内存储解算或由网口发送到上位机进行存储解算。

为了提高系统适用性的同时也能简化设计结构, 选用由 ALINX (上海芯驿电子) 设计生产的 ZYNQ 核心板, 采用 14 层 PCB, PS 端和 PL 端分别集成 4 GB 和 1 GB DDR4 内存, PS 端板载 8 GB EMMC 和 QSIP FLASH 供存放启动文件和系统。

2.2 系统光学探测模块

偏振信息光学探测部分主要由一个 SUA133GM 单色 CMOS 图像传感器构成的光学相机, 两个紫外增强型光电二极管组成。根据单色 COMS 图像传感器的光谱响应曲线可以得到, 相较于可见光波段, 350 nm 紫外波段的量子效率较低, 而紫外增强型光电二极管可以很好的弥补这一不足, 能更好的获取紫外波段的偏振信息。

相机的感光 CMOS (互补金属氧化物半导体) 上覆盖有可旋转的线性偏振膜, 每旋转三次为一组分别捕捉大气中的部分偏振光经过 3 个方向的线性偏振膜后形成的完全偏振光, 光信号经由 SUA133GM 内部的 10-bit ADC 和外置的图像处理转换成 USB3.0 协议的差分信号, 通过 USB3.0 协议芯片接入 ZYNQ 对应的 Bank65 相关引脚, 采

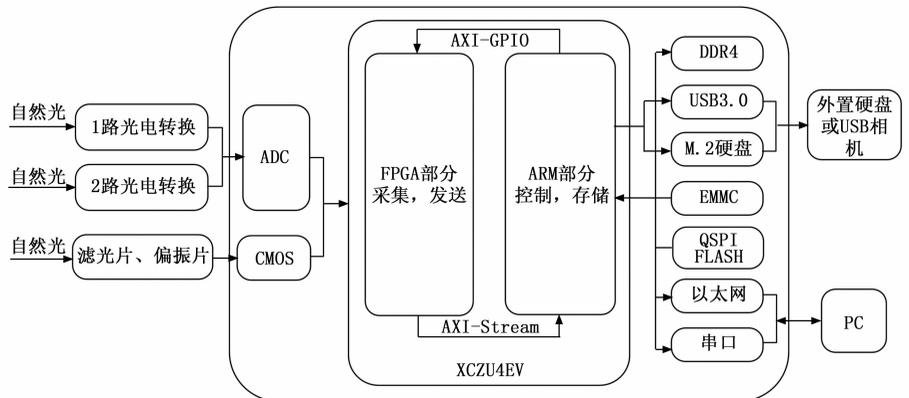


图 6 偏振信息导航传感器系统整体结构示意图

集图像通过插值方式提高像素。原理流程如图 7 所示。

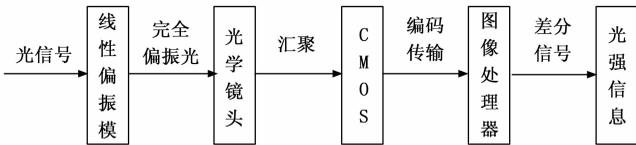


图 7 图像传感器模组原理图

载体在复杂运动状态下，传感器晃动幅度较大，CMOS 图像采集时为逐行采样或隔行采样，尽管 CMOS 采用全局快门技术也避免不了高速瞬时运动时一帧画面出现倾斜变形，高帧率相机成本较高，同时也面临高功耗和高发热压力，因此选用紫外增强型光电二极管来弥补传感器的这一弱点。该二极管具有体积小、探测灵敏度高的特点，加入在 5 V 偏置电压时响应时间为 8 ns，其可探测光波段覆盖了近紫外光、可见光和近红外光，满足实验需求。光电二极管在加入窄带滤光片后进光量会大幅降低，导致感光面接收不到足量的光信号，导致响应电流变弱，因此可以在上方嵌入一个平凸镜使得入射光汇聚在感光面上，从而增强光电二极管在弱光下的探测能力。实现带有旋转偏振片的两个高灵敏度紫外增强光电探测器对变化的光信号进行探测和处理的过程，保证了对天空偏振信息的快速扫描检测。

在光学镜头前加装可切换的窄带滤光片，在其中一个紫外增强型光电二极管上方永久嵌入一个同样的窄带紫外滤光片，用来增强紫外波段的传输效率。该滤光片中心波长 CWL 为 355 nm，半峰全宽 FWHM 为 10 ± 2 nm。光电二极管在线性偏振片旋转扫描自然光时，会输出一个稳定的正弦电流信号，由于自然光为部分偏振光，光电二极管产生的正弦电流信号会有一个稳定的直流分量。在解算偏振信息时，我们仅关注不同偏振片角度下信号的变化量。

系统的光学探测模块实现了可见光、近紫外光的交替探测，为阴天天气下两种波段的偏振信息的比较分析提高了理论依据和原理介绍。

2.3 系统采集存储模块设计

2.3.1 存储模块硬件电路设计

由于数据采集时间长、采样率高，且设备处于初试阶段，希望储存完整的原始照片和角度等数据供后期解算分析，这对系统的存储部分提出了较高要求。本文选择将启动文件放置在 QSPI FLASH 中，把系统文件放置在 EMMC 中。本文选用型号为 MTFC8GAKAJCN-4M 的 EMMC 芯片，支持标准的 HS-MMC 接口，与 ZYNQ 芯片的连接数据位宽为 8 bit。EMMC 的实际读写速度为 30 MB/S，在 XCZU4EV 的 PS 部分中选择一对 GTR 来存放 M.2 硬盘，并选用独立差分时钟芯片为 M.2 硬盘的主控芯片提供差分时钟信号，设计电路如图 8 所示。采用 PCIE2.0 编码，使得信道带宽的 20% 被占用，并且由于 PCB 差分走线的电气性能和硬盘主控读写纠错算法的损耗，因此在 Linux 系统中使用 dd 命令测试设计 M.2 外置硬盘的实际读写速度为 300~350 MB/s。

2.3.2 网络传输模块硬件电路设计

数据采集装置在远程控制和远程数据传输时，需要连接计算机进行操作，这就需要一个稳定可靠的远程数据连接方式。TCP/IP（传输控制协议/网际协议）指能够在多个不同网络间实现信息传输的协议簇，里面包括很多协议，UDP 就是其中之一，被广泛应用于各种网络设备的连接与控制中，具有通信速率高、传输距离远、传输稳定等优点。TCP 是面向连接的协议，一次 TCP 连接需要进行三次握手过程。UDP 是一个非连接的协议，传输数据时发送端和终端不需要建立连接，相较于 TCP 协议数据开销较小，但丢

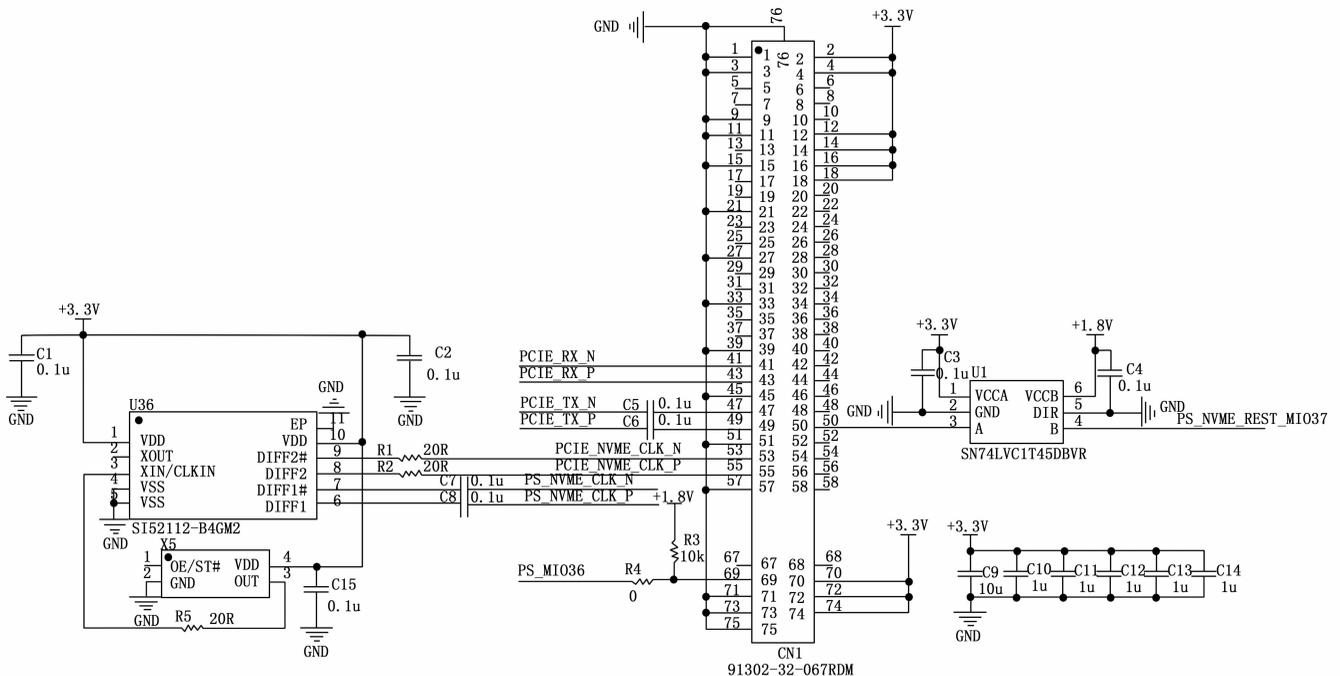


图 8 PS 端 M.2 硬盘原理图

包率高, 常用与传输网络摄像头等数据量较大的数据类型。

从 PS 端 Bank502 引出引脚驱动 RTL8211FD 以太网芯片, 为系统提供远程网络控制和部分数据传输功能。通过连接路由器或直连计算机实现远程控制、远程访问 Linux 系统共享文件夹, 下载采集的偏振图像、不同偏振方向光电二极管的电压和解算的航向角等数据, 该芯片可与主从设备自主协商提供自适应 1 000 BASE-T、100 BASE-TX 和 10 BASE-T 以太网速率, 兼容性较好。PL 端直接引出 XC-ZU4EV 的 PL 部分的四对 GTH 收发器, 将其中两对引出作为万兆 SPX+ 光口, 用于发送采集到的数据量较大的偏振图像。

2.3.3 USB 传输模块硬件电路设计

USB (通用串行总线) 是一种外部总线标准, 它建立了计算机与外部设备之间的链接, 可以很好的作为外部数据存储接口和人机交互接口。本文选用 MICROCHIP (美国微芯) 公司生产的 USB3320 提供 USB2.0 协议的数据收发, 设计电路如图 9 所示。通过外接 MLC 硬盘测试 USB3.0 接口的读写速度, 读出 40 G 大小, 写入 4 G 大小保证读写不出 SLC 缓存, 由于硬盘主控等的损耗, 实际读写速度要比测试值大。

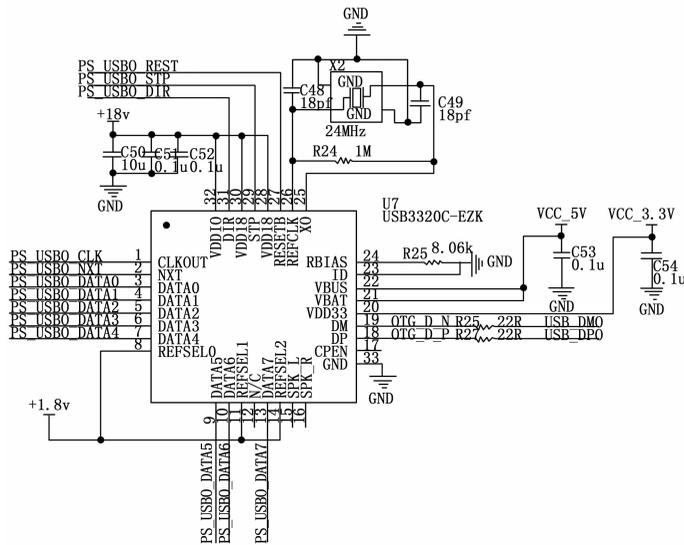


图 9 USB3320 硬件电路设计

3 不同天气下近紫外波段优势实验验证

3.1 大风薄云天气实验分析

在如图 10 所示的大风薄云天气, 选择在中北大学科学楼 B 座楼顶进行试验, 观测时间为 2021 年 10 月 21 日 11:00 ~ 13:20, 当地经纬度为 112.444 83° E, 38.017 19° N。通过设计的导航传感器系统实现可见光波段和近紫外波段天空偏振信息的交替采集。在接收近紫外波段半波宽度为 10 nm 的近紫外光时, 由于滤光片的减光性, 进光量会剧烈下降, 我们将快门速度从 1/1 000 s 下降到 15 s, 使得采集得 UV 波段试验图像较可见光波段试验图像的曝光程度相同且维持画面噪点水平不变。由图 11 可以看出, UV 波段

采集大风薄云天气依然可以解算出较为清晰的偏振角图像, 太阳子午线的位置信息也比较容易获得, 相较于可见光波段受云层干扰较大, 图像以噪点为主, 几乎难以分辨的问题, 紫外波段图像的数据阅读性优势明显。



图 10 大风薄云天气情况

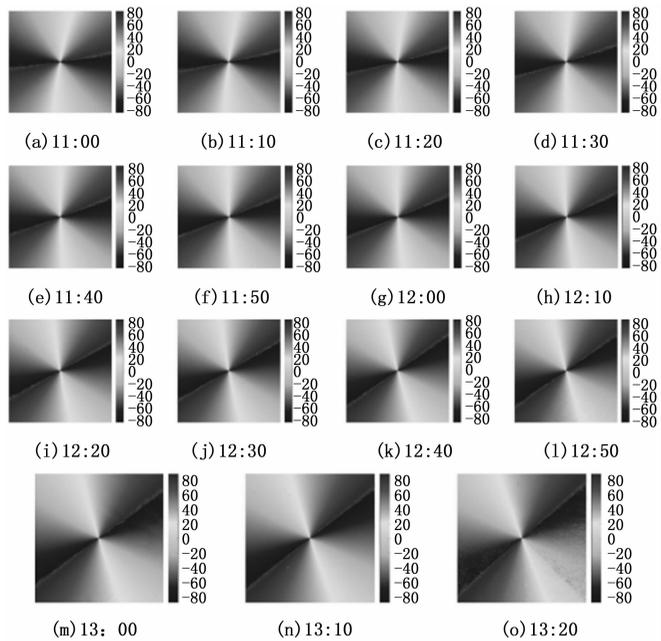


图 11 薄云天气紫外波段的偏振角图像

用太阳方位角补偿解算的子午线角度得到航向角, 取每时刻前后 100 个航向角数据的平均值作为该时刻的航向角数据。由于在实验过程中, 采集装置一直处于静止状态, 可将补偿结果作为当前天气状态下系统室外采集试验的误差参考。薄云天气的航向角结果如图 12 所示, 相较于可见光波段, UV 波段解算的航向角误差降低了 60.68%。因此 UV 波段的窄带滤光片可较大幅度提升偏振光导航的数据精度, 扩展偏振光探测器的环境适应性。

3.2 积雨云天气实验分析

选取 2022 年 4 月 20 日 16:00, 积雨云天气采集偏振图像, 研究紫外成像装置在云层较厚天气下偏振模式的获取情况, 地点同样在中北大学科学楼 B 座楼顶, 如图 13 所示为部分时间段测得的可见光波段和紫外波段的偏振图像。通过对比可以看出在恶劣天气下使用紫外滤光片可以提升偏振度,

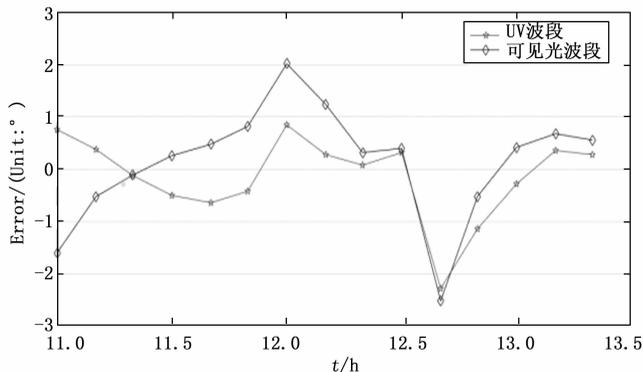


图 12 大风薄云天气下的航向角解算结果

降低云层对偏振角图像的影响, 提高太阳子午线的辨识度, 部分区域仍有所弯折扭曲是因为紫外滤光片镀膜均匀性不一致所导致。由表 2 可知, 积雨云天气条件下 UV 波段解算得航向角误差明显低于可见光波段, 表明在多云天气下使用紫外波段进行探测仍能获得较为准确的导航精度, 验证了紫外波段在恶劣天气条件下采集偏振信息的优势。

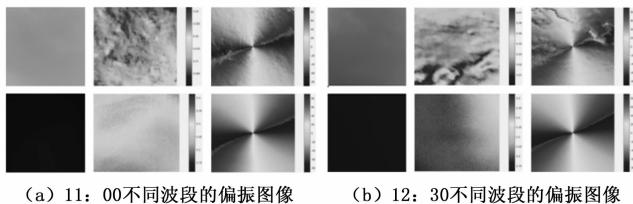


图 13 积雨云天气试验灰度图和偏振角、偏振度图像

表 2 积雨云天气下的航向角试验误差结果

测试时间	可见光波段/(°)	UV 波段/(°)
16:00	0.72	0.29
16:10	0.87	0.36
16:20	3.3	-0.67
16:30	-1.24	0.18

4 结束语

为了在阴天天气条件下获取稳定的大气偏振模式, 提高偏振光导航的天气适应性, 本文分析近紫外波段在不同天气条件下的优势, 设计了基于现场图像采集的偏振信息导航传感器系统, 在气象条件不佳时, 选用紫外滤光片进行探测。通过试验验证了近紫外波段在恶劣天气条件下采集偏振信息的优势, 可以更好的作为组合导航系统的补充。

本文后续的主要工作是进行试验误差分析, 优化动态实验误差偏大的问题, 提高恶劣气象条件下航向角的探测精度。使用一体成型的光学探测模块和镜片自动清洁装置, 优化配置精度, 境地灰尘和雨雪混合物对数据准确性的影响, 从而实现不同天气条件下更高精度的偏振光导航。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 褚金奎, 张钟元, 张然, 等. 仿生偏振探测技术及导航传感器应用[J]. 计测技术, 2021, 41 (5): 23-33.
- [3] 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.
- [4] 刘俊, 唐军, 申冲, 等. 大气偏振光导航技术[J]. 导航定位与授时, 2015, 2 (2): 1-6.
- [5] 何晓峰, 蔡宇, 范晨, 等. 面向地面无人平台的仿生偏振光定向算法[J]. 导航定位与授时, 2019, 6 (4): 20-25.
- [6] 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): 152-160.
- [7] 欧雅文, 武鹏飞, 魏合理, 等. 混浊大气对偏振导航影响的研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47 (3): 198-207.
- [8] 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): 281-287.
- [9] ZHANG W, YU C, ZHANG X, et al. Angle of sky light polarization derived from digital images of the sky under various conditions[J]. Applied Optics, 2017, 56 (3): 587.
- [10] 刘小燕. 气溶胶粒子影响下的大气偏振模式研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2018.
- [11] DUPEYROUX J, SERRES J, VIOLLET S, et al. A six legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments[J]. Science robotics, 2019, 4 (27).
- [12] 历祥. 阴天大气下紫外波段天空偏振模式的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [13] 赵金勇. 不同月相下天空偏振光特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [14] 张然, 蔡弘, 关乐, 等. 多云天气天空偏振定向方法[J]. 光学精密工程, 2021, 29 (7): 1499-1510.
- [15] 周鑫昌. 天空偏振光分布太阳子午线提取与应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [16] 赵开春, 卢皓, 尤政, 等. 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.
- [17] 任建斌, 杨明, 宋妮, 等. 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.
- [18] JIN H H, WANG X Q, FAN Z G, et al. Linear Solution Method of Solar Position for Polarized Light Navigation[J]. Sensors Journal, 2021, 21 (13): 15042-15052.
- [19] 梁少林, 王咏梅, 石恩涛, 等. 紫外-可见光吸收性气溶胶地基监测系统[J]. 电子测量技术, 2018, 41 (21): 133-138.
- [20] 韦博. 新型太阳辐射测量仪的结构设计与测量研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- [21] 曹晓改. 可见/紫外双波段成像探测主控系统的设计与实现[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
- [22] 刘琦. 复杂大气下的天空光偏振特性及敏感光谱研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.