

偏振光实时定位系统的设计

褚金奎¹, 时超¹, 王寅龙¹, 曹闻达¹, 王刚², 李苗²

¹大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

²中国电子科技集团公司信息科学研究院, 北京 100086

摘要 为了满足偏振光定位的实时性要求, 设计了基于 STM32 的偏振光定位系统, 实现了偏振方位角数据的同步采集, 降低了系统数据总线的复杂程度及上位机接收数据的复杂度, 同时也解决了太阳高度角和方位角的双解问题。首先根据偏振光定位原理设计了 4 个偏振方位角采集模块, 用来采集天空中 4 个观测方向的偏振方位角, 每个偏振方位角采集模块的精度可达 $\pm 0.2^\circ$; 其次, 设计了太阳方向矢量判断模块, 用来解决偏振矢量的 180° 二义性造成的太阳高度角和方位角的双解问题。实验结果表明: 偏振光定位系统可以得到正确的太阳高度角和方位角, 并且适用于全天定位; 在约 55 min 的实验中, 地理经度和纬度的最大误差分别为 $\pm 1^\circ$ 、 $\pm 1.5^\circ$; 偏振光定位系统满足实时性的要求, 定位精度稳定, 可以应用于实际定位。

关键词 大气光学; 偏振光定位系统; 定位; 实时性; STM32

中图分类号 V249.32; O436.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0310002

Design of Polarized Light Real-Time Positioning System

Chu Jinkui¹, Shi Chao¹, Wang Yinlong¹, Cao Wenda¹, Wang Gang², Li Miao²

¹School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

²China Electronics Technology Group Company Information Science Research Institute, Beijing 100086, China

Abstract In order to meet the real-time requirement of the polarized light positioning system, the polarized light positioning system based on STM32 is designed, which achieves the synchronization of polarization azimuth data acquisition, reduces the complexity of the system data bus and the complexity of personal computer data receiving, and solves the problem of double-solution of solar altitude angle and azimuth. Firstly, based on the principle of polarized light positioning, four polarization azimuth acquisition modules are designed to get the polarization azimuth of the four directions in the sky, and the error of every module is under $\pm 0.2^\circ$. Then, the sun vector judgment module is designed to solve the problem of 180° double-solution of solar altitude angle and azimuth, which results from the polarization vector. The experiments show that the polarized light positioning system can obtain the correct solar altitude angle and azimuth, and it is suitable for daytime. The maximum errors of longitude and latitude are $\pm 1^\circ$ and $\pm 1.5^\circ$ respectively in the experiment of about 55 minutes. The polarized light positioning system meets the requirements of real-time with a stable positioning accuracy, so it can be applied to the actual positioning.

Key words atmospheric optics; polarized light positioning system; positioning; real-time; STM32

OCIS codes 290.5870; 290.5855; 010.1310; 010.1290

1 引 言

自然界中的许多生物在归巢、迁徙过程中能够通过其自身特有的生理结构感知天空中的偏振模式

来实现导航。例如: 热带草原上的麻雀在迁徙过程中可以利用大气中的偏振模式来校准自身的磁罗盘, 从而完成迁徙过程^[1]; 哺乳动物中的蝙蝠可以利用天空中的偏振光信息来矫正其归巢的方向^[2]。近

收稿日期: 2017-08-24; **收到修改稿日期:** 2017-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(51675076, 51505062)、国家自然科学基金创新研究群体资助项目(51621064)、联合基金(6141B08100303)

作者简介: 褚金奎(1965—), 男, 博士, 教授, 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(通信联系人)

些年来,国内外学者对偏振光的特性进行了研究,发现太阳光在经过大气时会发生以瑞利散射^[3]和米氏散射^[4]为主的散射。在瑞利散射模型中,天空中会形成稳定的偏振现象。科研人员对天空偏振模式进行了实验和验证,并证明了该偏振模式的稳定性^[5-9]。

受自然界生物利用偏振光导航的启发,国内外学者在仿照生物利用偏振光进行导航方面开展了大量研究:1997年,Lambrinos等^[10]利用偏振光导航的机理设计搭建了偏振光导航传感器,并将其应用于机器人导航,证明了利用偏振光信息进行导航的可行性;2012年,Chahl等^[11]模仿蜻蜓利用偏振光导航的过程设计了偏振光导航传感器,并将其应用到无人机航向角的测量中;褚金奎等^[12-16]针对昆虫复眼偏振敏感测角光电模型进行了研究,设计并搭建了偏振光导航传感器,在进行集成化设计和优化导航角计算方法的基础上,将偏振光传感器应用到移动机器人实验中。北京大学^[17]、清华大学^[18]、国防科技大学^[19]、合肥工业大学^[20]、西北工业大学^[21]对天空偏振光分布模式的仿生导航定向机理进行了探索。此外,科研人员还对偏振光的散射特性及传输特性进行了研究^[22-24]。

与目前主流的惯性导航、陆基无线导航、卫星导航和天文导航相比,仿生偏振光导航属于自主导航,无误差积累,不易受到人为干扰。目前,偏振光导航传感器主要实现了定向功能,但关于定位功能的研究不多。大连理工大学的课题组^[25-26]提出了利用两个偏振光传感器和地磁场进行组合导航定位的方法,并验证了该方法的可行性;随后该课题组对多方向的偏振光信息进行融合和优化,提高了定位的稳定性和可靠性。

目前,利用偏振光进行定位过程中缺少对太阳方向向量系数 ± 1 正负值的判断,导致计算太阳高度角和方位角时会出现双解,因此需要根据太阳所在位置通过肉眼对 ± 1 进行判断。在测量过程中如果出现某一传感器输出角度在 180° 突变的情况,相对应的 ± 1 系数也需要调整,环境适应性比较差,因此不能实现实时测量。而且,定位过程中使用5个单片机控制偏振光方位角的采集,上位机系统数据总线和数据接收都比较复杂,不能实现偏振方位角数据的同步采集。针对目前存在的问题,本文设计了太阳方向向量判断模块,旨在实现偏振光定位系统的实时测量,以提高偏振光定位系统的环境适应性;

使用STM32作为主处理芯片,设计并搭建了偏振光定位系统,用1个单片机代替样机中的5个单片机,在单片机内部实现偏振方位角数据的同步采集,从而解决上位机系统数据总线和数据接收都比较复杂的问题。

2 偏振光导航定位系统的工作原理

太阳光在经过大气过程中会发生散射现象,主要有瑞利散射^[3]和米氏散射^[4]。在瑞利散射模型中,天空中的偏振光具有一定的规律,即天空中偏振光的分布模式在某一时刻某一地点是稳定的,天空中某一点偏振光的偏振方向平行于由太阳、观测点和被观测点构成的平面的法向量。因此,理论上可以由两点不平行的偏振光的偏振矢量求出太阳的方向矢量(其方向可以通过太阳方向矢量判断模块进行辨别)。某一时刻太阳的高度角和方位角与当地的经纬度是对应的。因此,利用两个或多个偏振光的偏振方向矢量、时间信息、太阳方向矢量判断模块和地磁信息可以计算出当地的经纬度,从而实现偏振光定位系统的定位功能。

如图1所示, W_1, W_2, W_3 和 W_4 为4个被观测点, P_1, P_2, P_3 和 P_4 为4个被观测点的偏振方向矢量, O 为观测点, S 为太阳, Z 为天顶点。由天空中的偏振光分布模式可知,偏振方向矢量 P_i 垂直于 W_iOS ($i=1, 2, 3, 4$)平面。因此,太阳的方向矢量 S_0 可以由任意两个不平行的偏振方向矢量 P_i ($i=1, 2, 3, 4$)叉乘求得。 h_s 为太阳的高度角; A_s 为太阳的方位角,是太阳的方向矢量在载体坐标系的投影与正北之间的夹角; A'_s 为伪方位角,是太阳的方向矢量在载体坐标系的投影与 X 轴的夹角,顺时针为正,逆时针为负。

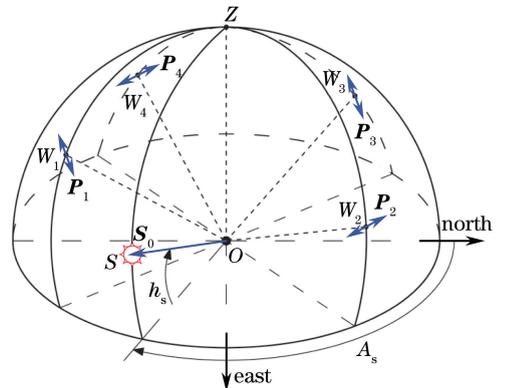


图1 太阳方向矢量与偏振光方向矢量的示意图
Fig. 1 Schematic of solar vectors and polarized-light vectors

由偏振方向矢量叉乘求取太阳的方向矢量:

$$\mathbf{S}_0 = (S_x, S_y, S_z)^T = (\mathbf{P}_i \times \mathbf{P}_j)^T, \quad (1)$$

$(i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j),$

式中 S_x, S_y, S_z 为太阳的方向矢量在载体坐标系 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的分量, \mathbf{P}_i 和 \mathbf{P}_j 为偏振方向矢量。

在载体坐标系中,由太阳的方向矢量可以得到:

$$\begin{cases} \sin A'_s = \frac{S_y}{\sqrt{S_x^2 + S_y^2}} \\ \tan h_s = \frac{S_z}{\sqrt{S_x^2 + S_y^2}} \\ \cos A'_s = \frac{S_x}{\sqrt{S_x^2 + S_y^2}} \end{cases}, \quad (2)$$

从天文三角形中可以得到:

$$\begin{cases} \cos A_s = \frac{\sin \delta - \sin h_s \sin \varphi}{\cos h_s \cos \varphi} \\ \sin h_s = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \end{cases}, \quad (3)$$

式中 δ 为太阳赤纬, φ 为地理纬度, ω 为太阳时角。

太阳时角可以由地理经度、时差和世界时表示:

$$\omega = \eta + 15(t_{UT1} + E) - 180^\circ, \quad (4)$$

式中 η 为地理经度, t_{UT1} 为世界时(是指格林尼治所在地的标准时间), E 为时差。

世界时和协调世界时(t_{UTC})之间的偏差在 0.9 s 以内, 0.9 s 转换成以小时为单位时数值很小, 对后续的计算影响很小。因此可以用协调世界时来替代世界时, 故而(4)式可以表示为

$$\omega = \eta + 15(t_{UTC} + E) - 180^\circ. \quad (5)$$

在载体坐标系中,如图 2 所示, A_s 可以表示为:

$$A_s = A'_s + H + D, \quad (6)$$

式中 H 为地磁北极与电子罗盘体轴之间的夹角; D 为被测量地点的磁偏角, 它可由国际标准地磁场(IGRF)模型提供^[27]。

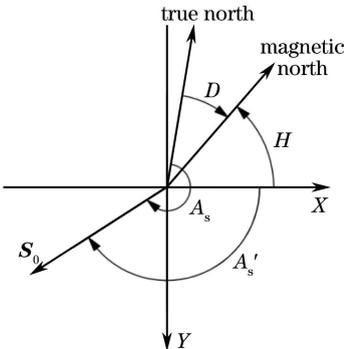


图 2 D, H, A_s 和 A'_s 在载体坐标系中的示意图

Fig. 2 Schematic of D, H, A_s and A'_s in carrier coordinate system

磁偏角可以由地理经度和纬度得到, 表达式为

$$D = f(\varphi, \eta). \quad (7)$$

由(3)、(5)、(6)、(7)式可以得到:

$$\begin{cases} D = f(\varphi, \eta) \\ \cos(A'_s + H + D) = \frac{\sin \delta - \sin h_s \sin \varphi}{\cos h_s \cos \varphi} \\ \sin h_s = \sin \varphi \sin \delta + \\ \cos \varphi \cos \delta \cos[\eta + 15(t_{UTC} + E) - 180^\circ] \end{cases}, \quad (8)$$

式中太阳赤纬 δ 和时差 E 可以通过查找星历表获取^[28], 协调世界时由上位机提供, H 由电子罗盘输出, A'_s 和 h_s 由太阳的方向矢量求出。(8)式中有 3 个未知数: D, φ 和 η 。这 3 个未知数可以由(8)式求出。

3 偏振光导航定位系统

根据定位原理提出的偏振光定位系统结构如图 4 所示, 该系统由硬件部分和软件部分组成: 硬件负责数据采集; 软件负责处理数据, 用以计算经纬度。

3.1 硬件系统

偏振光定位系统的硬件部分主要由 4 个偏振方位角采集模块、太阳方向矢量判断模块和三维电子罗盘组成。偏振光定位系统的整体设计框图如图 3 所示, 偏振光定位系统的硬件部分如图 4 所示, 在偏振光定位系统的外壳上加工有 5 个平面 $A_1 \sim A_5$, $A_1 \sim A_4$ 对称分布且分别与 A_5 呈 45° 角, A_1 与 A_3 垂直, A_2 与 A_4 垂直, 4 个偏振光采集模块安装在 $A_1 \sim A_4$ 平面上, 太阳方向矢量判断模块安装在 A_5 平面上, 三维电子罗盘安装在在外壳底座 A_0 上(平面 A_0 与 A_5 平行)。在 $A_0 \sim A_5$ 这 6 个平面中建立 5 个左手坐标系, $O_1-X_1Y_1Z_1$ 位于平面 A_1 上, $O_2-X_2Y_2Z_2$ 位于平面 A_2 上, $O_3-X_3Y_3Z_3$ 位于平面 A_3 上, $O_4-X_4Y_4Z_4$ 位于平面 A_4 上, 平面 A_0 和 A_5 共用相同的坐标系 $O-XYZ$, $O-XYZ$ 为载体坐标系。

使用主处理芯片 STM32F103 控制 4 个偏振方位角采集模块和太阳方向矢量判断模块, STM32F103 采集的数据和三维电子罗盘采集的数据分别通过串口通信传输给上位机。STM32F103 控制的 4 个偏振方位角采集模块主要负责完成偏振光信息的采集, 计算偏振方位角; 其结构主要包括蓝色滤光片、偏振片、光电转换器件、对数放大器、模数(A/D)转换等部分。调试好的偏振方位角采集模块的精度可达 $\pm 0.2^\circ$ 。STM32F103 控制的太阳方向矢量判断模块的主要功能是将采集的光信号转换成电流信号, 该模块主要由十字挡板、光电转换器件、

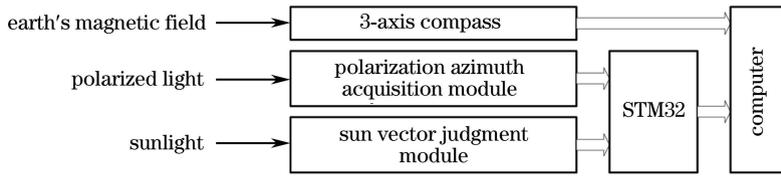


图 3 系统的整体设计框图

Fig. 3 Block diagram of overall structure of the system

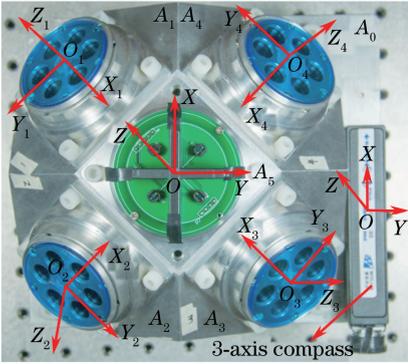


图 4 硬件部分实物图

Fig. 4 Real image of the hardware part

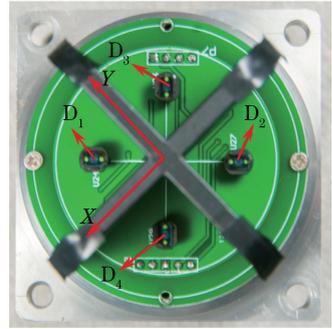


图 5 太阳方向矢量判断模块的实物图

Fig. 5 Real image of the sun vector judgment module

对数放大器、A/D 转换等部分组成,如图 5 所示。其中,偏振方位角采集模块端面的 6 个孔是偏振光接收通道,每两个相对的通道构成一个方向的偏振光接收单元,共有 3 个偏振光接收单元。因为蓝紫光波段(380~520 nm)的偏振信息较强,是传感器较理想的探测波段^[29],所以选择蓝色滤光片(光学玻璃)。偏振片选用的是线性偏振片,其主要参数:波长为 450~675 nm,消光比为 1000:1。光电转换器件采用的是硅光电二极管,对数放大器采用的是精密对数运算放大器,A/D 转换采用的是 16 位模数转换芯片。三维电子罗盘可以提供其参考轴与磁北之间夹角 H 的值,三维电子罗盘的测角精度为 0.5° 。

设每个偏振光采集模块采集到的偏振方位角为 $\theta_i (i=1,2,3,4)$,对应的偏振方向矢量为 $\mathbf{P}_i (i=1,2,3,4)$,如图 6 所示,则在对应的坐标系中, $\mathbf{P}_i (i=$

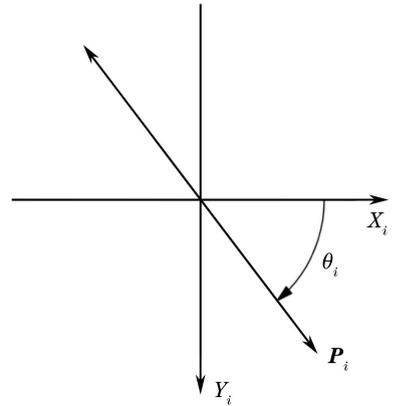


图 6 θ_i 方向在坐标系中的示意图

Fig. 6 Direction of θ_i in the coordinate system

1,2,3,4)的表达式为

$$\mathbf{P}_i = k_i (\cos \theta_i, \sin \theta_i, 0), (i=1,2,3,4), \quad (9)$$

式中 k_i 取值为 1 或 -1。

将 $\mathbf{P}_i (i=1,2,3,4)$ 转换到载体坐标系中可得

$$\begin{cases} \mathbf{P}_1 = k_1 \left(-\frac{1}{2} \cos \theta_1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_1, \frac{1}{2} \cos \theta_1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_1, \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_1 \right) \\ \mathbf{P}_2 = k_2 \left(\frac{1}{2} \cos \theta_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_2, \frac{1}{2} \cos \theta_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_2, \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_2 \right) \\ \mathbf{P}_3 = k_3 \left(\frac{1}{2} \cos \theta_3 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_3, -\frac{1}{2} \cos \theta_3 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_3, \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_3 \right) \\ \mathbf{P}_4 = k_4 \left(-\frac{1}{2} \cos \theta_4 + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_4, -\frac{1}{2} \cos \theta_4 - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \theta_4, \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \theta_4 \right) \end{cases} \quad (10)$$

在载体坐标系中,用 P_1, P_2, P_3, P_4 中的任意两个不平行的向量可求出太阳方向矢量 S_0 ,表达式为

$$S_0 = (S_x, S_y, S_z)^T = K[(P_i \times P_j)]^T \quad (i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j), \quad (11)$$

式中 K 取 1 或 -1,由太阳方向矢量判断模块进行判断。

在(11)式中, K 的值可取 1 或 -1。当 K 取 1 时,由(2)式可求得太阳的高度角和伪方位角分别为 h_s 和 A'_s ;当 K 取 -1 时,由(2)式可求得太阳的高度角和伪方位角分别为 $-h_s$ 和 $180^\circ + A'_s$ 。可以根据求得的太阳伪方位角和太阳方向矢量判断模块输出的 L_{G1} 或 L_{G2} 的值判断 K 的值,进而求出正确的太阳高度角和太阳伪方位角。

如图 5 所示,4 个光电转换器件均匀分布,十字挡板可以有效地对不同位置的光电转换器件接收的光强进行区分,光电转换器件 D_1, D_2, D_3 和 D_4 对应转换成的电流信号为 I_1, I_2, I_3 和 I_4 。将 I_1 和 I_2 做对数计算可输出电压值为 L_{G1} ,将 I_3 和 I_4 做对数计算可输出电压值为 L_{G2} ,表达式为

$$\begin{cases} L_{G1} = \lg(I_1/I_2) \\ L_{G2} = \lg(I_3/I_4) \end{cases} \quad (12)$$

当理论太阳伪方位角在区间 $[0^\circ, 90^\circ], [90^\circ, 180^\circ], [180^\circ, 270^\circ]$ 和 $[270^\circ, 360^\circ]$ 时,对应的 L_{G1} 分别为正值、正值、负值和负值。在计算过程中,可假定 $K=1$,求出对应的太阳的高度角和伪方位角,由求得的伪方位角的区间以及太阳方向矢量判断模块输出的 L_{G1} 或 L_{G2} 可判断 K 和 A'_s 的值,结果如表 1 所示。

表 1 K 和 A'_s 的结果

Table 1 Results of K and A'_s

Measured value of A'_s	L_{G1} or L_{G2}	Value of K	Result of A'_s
$[0^\circ, 90^\circ]$	$L_{G1} > 0$	1	A'_s
	$L_{G1} < 0$	-1	$A'_s + 180^\circ$
$[90^\circ, 180^\circ]$	$L_{G2} > 0$	1	A'_s
	$L_{G2} < 0$	-1	$A'_s + 180^\circ$
$[180^\circ, 270^\circ]$	$L_{G1} > 0$	-1	$A'_s + 180^\circ$
	$L_{G1} < 0$	1	A'_s
$[270^\circ, 360^\circ]$	$L_{G2} > 0$	-1	$A'_s + 180^\circ$
	$L_{G2} < 0$	1	A'_s

3.2 软件系统

偏振光定位系统主要包括系统初始化、数据采集(包括偏振方位角、自然光、地磁北极与电子罗盘体轴的夹角 H)、偏振方向矢量计算、太阳方向矢量计算、太阳方向矢量的方向判断、太阳高度

角计算和伪方位角和经纬度计算等模块。系统的流程图如图 7 所示。采集的偏振方位角、自然光和 H 角的信息发送给上位机,由上位机完成经纬度的计算。

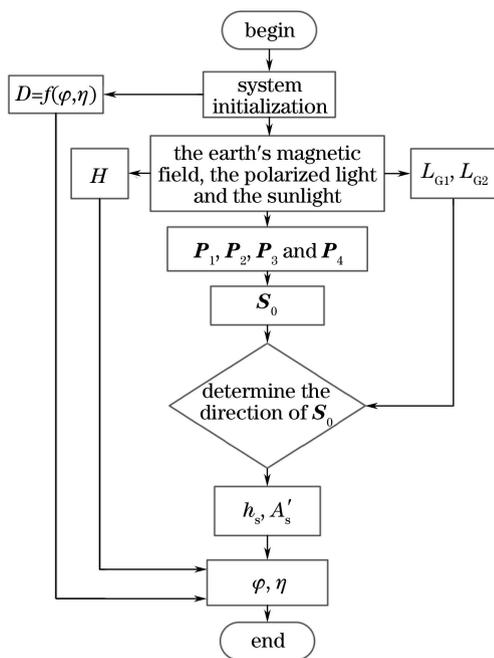


图 7 系统运行流程图

Fig. 7 Flow chart of system

4 测量实验与结果

实验时,将装置放在比较开阔的地方,测试地点是大连理工大学机械东楼楼顶(东经 121.539° ,北纬 38.887°)。

4.1 太阳方向矢量判断模块实验

在太阳方向矢量判断模块中,4 个光电转换器件均匀分布,在室外测试时,只需测试 L_{G1} 和 L_{G2} 中的一个值。2017 年 4 月 11 日对太阳方向矢量判断模块进行了室外实验,开始时刻为 17:09:50,结束时刻为 18:28:07,测试过程中太阳高度角的理论值从 12.844° 变化到 -2.223° ,太阳的方位角理论值从 270.558° 变化到 282.740° ,测试时 D_2 面向太阳, D_1 被十字挡板遮挡。 $K=1$ 时测试输出的太阳伪方位角为 A'_s , A'_s 的最终结果以及输出 L_{G1} 的电压值如图 8 所示。

由图 8 可知,测试过程中输出的 L_{G1} 的电压值为负值, $K=1$ 时输出的太阳的伪方位角 A'_s 分布在区间 $[180^\circ, 270^\circ)$ 和 $[0^\circ, 90^\circ)$ 中,可以通过查表 1 得到 K 的真值。在区间 $[180^\circ, 270^\circ)$ 中, K 值为 1;在区间 $[0, 90)$ 中, K 值为 -1。由 K 的结果得到的太阳的伪方位角 A'_s 和高度角 h_s 的值如图 9 所示。

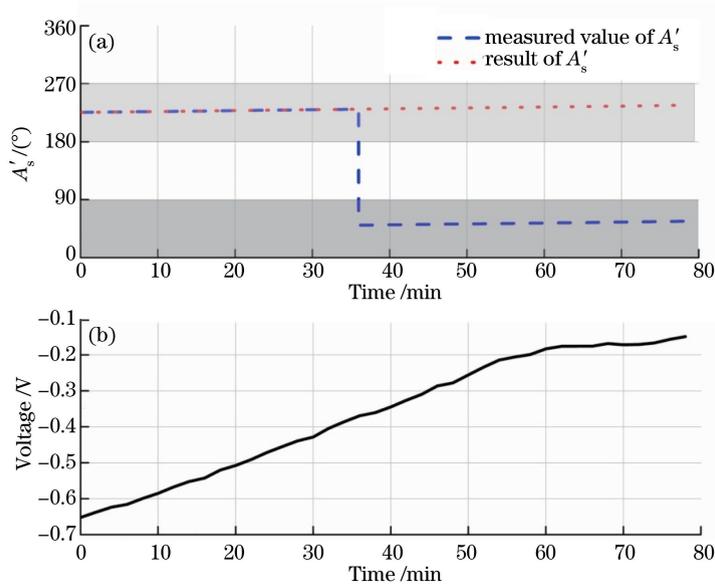


图 8 太阳方向矢量判断模块测试结果。(a) A'_s 的结果;(b) L_{G1} 的电压值

Fig. 8 Test results of the sun vector judgment module. (a) Result of A'_s ; (b) voltage of L_{G1}

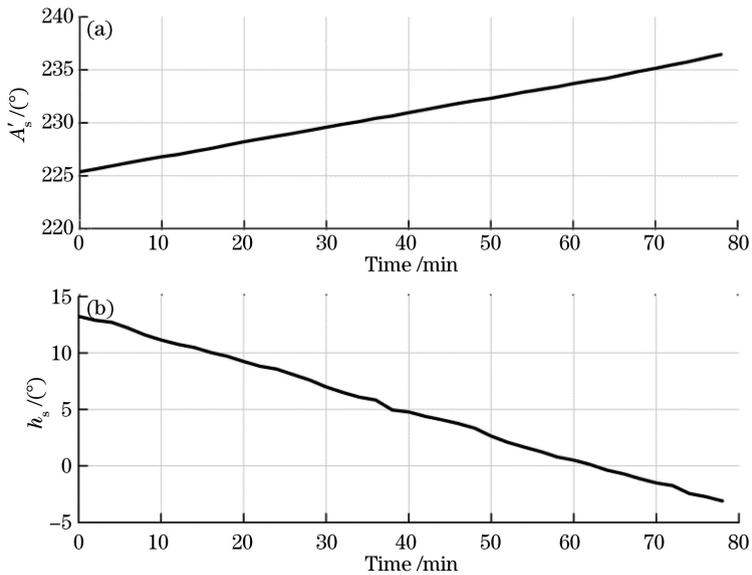


图 9 太阳方向矢量判断模块得到的(a) A'_s 和(b) h_s

Fig. 9 A'_s and h_s obtained by the sun vector judgment module

4.2 偏振光定位系统的实验

为验证定位系统的稳定性和全天适用性,分别进行了验证实验。第一组实验:测试时间为2017年5月13—25日,开始时刻为17时左右,结束时刻为19时左右,其中2017年5月13日的测试数据如图10(a)所示。第二组实验:测试时间为2017年10月24日,开始时刻为9时左右,结束时刻为17时左右,大约每隔1h采集3min数据,测试数据如图10(b)所示。如图10(a)所示,在约55min的测试过程中,偏振光定位系统的定位性能稳定,纬度的最大

误差为 $\pm 1.5^\circ$,经度的最大误差为 $\pm 1^\circ$ 。如图10(b)所示,全天测试的结果表明,偏振光定位系统性能稳定,可用于全天定位。

5 结 论

根据偏振光导航定位的原理,设计了可以同时探测天空中4个不同方向偏振光的定位系统,该系统主要包含4个偏振方位角采集模块和太阳方向矢量判断模块,并实现了用1个STM32对这5个模块的控制。在单片机内部实现了偏振光信息的同步

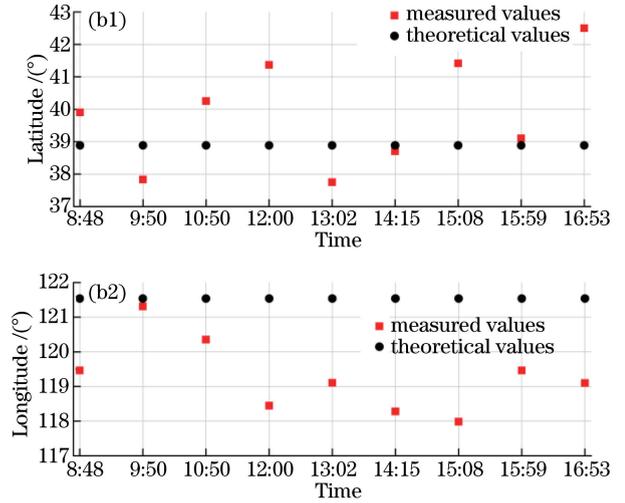
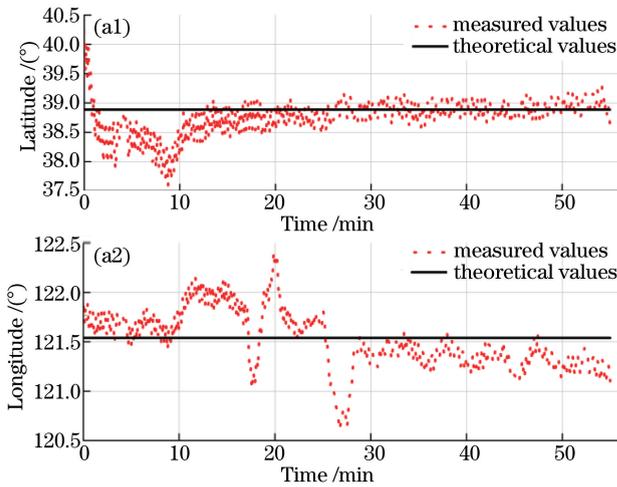


图 10 定位精度测试结果图。(a)约 55 min 的测试结果;(b)全天的测试结果

Fig. 10 Test results of positioning accuracy. (a) Test results about 55 minutes; (b) daytime test results

采集,降低了系统数据总线的复杂程度及上位机接收数据的复杂度。4个偏振方位角采集模块对称分布,可以提高导航定位系统的稳定性和可靠性,调试好的偏振方位角采集模块的定向精度可达 $\pm 0.2^\circ$ 。实验结果表明,在太阳高度角理论值从 12.844° 变化到 -2.223° 过程中,太阳方向矢量判断模块可以正常工作,可以有效地对太阳方向矢量系数1的正负进行判断。在约55 min的测试过程中,纬度的最大误差为 $\pm 1.5^\circ$,经度的最大误差为 $\pm 1^\circ$;在全天测试中,定位性能稳定。偏振光定位系统的性能稳定,适用于全天定位,因此可以应用于实际定位。

目前偏振光定位系统的定位精度还不是很高,下一步的主要工作是对该装置的误差进行分析和研究,通过提高加工精度、偏振方位角采集模块的精度和三维电子罗盘的精度来提高偏振光定位系统的精度。

参 考 文 献

[1] Muheim R, Phillips J B, Akesson S. Polarized light cues underlie compass calibration in migratory song birds[J]. *Science*, 2006, 313(5788): 837-839.

[2] Greif S, Borissov I, Yovel Y, *et al.* A functional role of the sky's polarization pattern for orientation in the greater mouse-eared bat [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 1-10.

[3] van de Hulst H C. Light scattering by small particles [M]. New York: Wiley, 1957: 119-130.

[4] Mie G. Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen, leipzig [J]. *Annalen Der Physik*, 1908, 330(3): 377-445.

[5] Pomozi I, Horvath 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.

[6] Gal J, Horvath G, Meyer-Rochow V B, *et al.* Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of the Arctic Circle[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 2001, 457(2010): 1385-1399.

[7] Wang W, Chu J K, Cui Y, *et al.* Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0513001.
王威, 褚金奎, 崔岩, 等. 基于矢量辐射传输的大气偏振建模[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513001.

[8] Liu Q, Chu J K, Wang J, *et al.* Research and simulation analysis of atmospheric polarization properties under water cloud condition [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0301004.
刘琦, 褚金奎, 王兢, 等. 水云条件下大气偏振特性研究及其模拟分析[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0301004.

[9] Wang Z Q, Zhang X D, Jin H H, *et al.* All sky turbid atmospheric polarization pattern modeling based on Monte Carlo method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1013001.
王子谦, 张旭东, 金海红, 等. 基于 Monte Carlo 方法的混浊大气偏振模式全天空建模[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1013001.

[10] Lambrinos D, Maris M, Kobayashi H, *et al.* An autonomous agent navigating with a polarized light compass[J]. *Adaptive Behavior*, 1997, 6(1): 131-161.

[11] Chahl J, Mizutani A. Biomimetic attitude and

- orientation sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(2): 289-297.
- [12] Chu J K, Zhao K C. Study of angle measurement optoelectronic model on emulating polarization-sensitive compound eyes of insect [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2005, 42 (12): 541-547.
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): 541-547.
- [13] Zhao K, Chu J, Wang T, *et al.* A novel angle algorithm of polarization sensor for navigation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(8): 2791-2796.
- [14] Liu Z, Zhang R, Wang Z, *et al.* Integrated polarization-dependent sensor for autonomous navigation [J]. *Journal of Micro/Nanolithography MEMS and MOEMS*, 2015, 14(1): 0150011.
- [15] Chu J, Zhao K, Zhang Q, *et al.* Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation[J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 148 (1): 75-82.
- [16] 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.
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.
- [17] Yan L, Guan G X, Chen J B, *et al.* The bionic orientation mechanism in the skylight polarization pattern [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (Natural Science Edition)*, 2009, 45(4): 616-620.
晏磊, 关桂霞, 陈家斌, 等. 基于天空偏振光分布模式的仿生导航定向机理初探[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(4): 616-620.
- [18] Lu H, Zhao K, You Z, *et al.* Angle algorithm based on Hough transform for imaging polarization navigation sensor[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7248-7262.
- [19] Xian Z, Hu X, Lian J, *et al.* A novel angle computation and calibration algorithm of bio-inspired sky-light polarization navigation sensor[J]. *Sensors*, 2014, 14(9): 17068-17088.
- [20] Fan Z G, Chen M L, Wang B, *et al.* Three-dimensional attitude information obtained by the skylight polarization pattern[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1248-1256.
范之国, 陈曼丽, 王波, 等. 基于大气偏振模式的三维姿态信息获取[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1248-1256.
- [21] Yang Z G, Zhou J, Huang H, *et al.* Analysis and compensation of angle errors of polarization navigation sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1424-1429.
杨中光, 周军, 黄河, 等. 偏振导航传感器测角误差分析与补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1424-1429.
- [22] Sun X M, Wang H H, Shen J, *et al.* Study on polarized light scattering by aerosol over ocean[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53 (4): 040101.
孙贤明, 王海华, 申晋, 等. 海洋背景下气溶胶的偏振光散射特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(4): 040101.
- [23] Dai J, Gao J, Fan Z G. Polarization-maintaining capacity of backscattered linearly and circularly polarized lights[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0505002.
戴俊, 高隽, 范之国. 线偏振光与圆偏振光后向散射偏振保持能力[J]. *中国激光*, 2017, 44 (5): 0505002.
- [24] Zhang S, Zhan J T, Bai S K, *et al.* Influence of smoke concentration on transmission characteristics of polarized light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36 (7): 0729001.
张肃, 战俊彤, 白思克, 等. 烟雾浓度对偏振光传输特性的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(7): 0729001.
- [25] Wang Y L, Chu J, Zhang R, *et al.* A novel autonomous real-time position method based on polarized light and geomagnetic field [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9725.
- [26] Chu J K, Zhang H X, Wang Y L, *et al.* Construct and design of an autonomous real-time position prototype of multi-polarized skylight[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(2): 312-318.
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.
- [27] Finlay C C, Maus S, Beggan C D, *et al.* International geomagnetic reference field: The eleventh generation [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(3): 1216-1230.
- [28] Purple Mountain Observatory of Chinese Academy of Science. *Astronomical almanac of China in 2016*[M]. Beijing: Science Press, 2015.
中国科学院紫金山天文台. 2016年中国天文年历[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [29] Han Z, Chu J, Meng F, *et al.* Design and simulation of blue/violet sensitive photodetectors in silicon-on-insulator[J]. *Journal of Semiconductors*, 2009, 30 (10): 59-62.