

# 偏振光导航测角歧义性问题的解决方法

王 昕, 高 隽, 范之国, 王 波, 李逸博

(合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽合肥 230009)

**摘 要:** 本文针对偏振光导航中传感器的仿沙蚁 POL-neuron 模型在获取航向角时存在的角度歧义性问题, 根据大气偏振模式中偏振度分布不均匀的规律, 提出了一种利用三个偏振通道和一个非偏振通道进行偏振光测角的 PFAC 模型, 通过判断函数和不同天空区域偏振度的大小关系将 POL-neuron 模型的有效测角范围从  $[-45^\circ, 45^\circ]$  扩展到  $[0^\circ, 360^\circ]$ . 本文描述了 PFAC 模型的信号处理过程, 进行了传感器实测数据的分析与处理, 理论和实测结果表明该模型可以解决 POL-neuron 模型存在的测角歧义性, 为偏振光导航传感器实现  $360^\circ$  范围内的航向角获取提供了一种有效的解决方法.

**关键词:** 偏振光导航; 测角歧义性; 传感器; 太阳子午线; 大气偏振模式

**中图分类号:** TP391      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2014)11-2184-07

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.11.009

## The Solution to the Problem of the Ambiguity of Angle Calculation in the Polarized Skylight Navigation

WANG Xin, GAO Jun, FAN Zhi-guo, WANG Bo, LI Yi-bo

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

**Abstract:** To solve the problem of the ambiguity of angle measurement in the existing signal processing method of POL-neuron model, the PFAC polarization information processing model based on the uneven distribution of the polarization intensity in the atmospheric polarization pattern is proposed, which has three polarization channels and one un-polarization channel. The effective angle measurement range can be increased from  $[-45^\circ, 45^\circ]$  to  $[0^\circ, 360^\circ]$  by judging functions and the comparison of polarization intensity in different sky regions. Detailed theoretical description of the PFAC calculation model and the analysis of the measured data are presented in this paper, the result demonstrates that this improved model can solve the ambiguity of POL-neuron model in angle measurement effectively, PFAC model provides an effective solution for angle distinction within the range of  $[0^\circ, 360^\circ]$  in polarized skylight navigation.

**Key words:** polarized skylight navigation; ambiguity of angle measurement; sensor; solar meridian; atmosphere polarization pattern

### 1 引言

偏振光导航是一种基于地球自然偏振属性的自主导航方法, 由于其在较大范围内难以受到人为干扰而表现出的稳定性和抗干扰能力, 近年来获得了越来越多的关注<sup>[1]</sup>. 瑞士苏黎世大学的 R Wehner 教授及其团队一直致力于沙蚁等生物的偏振光导航行为和仿生偏振光导航机理方面的研究<sup>[2~6]</sup>, 其提出的仿沙蚁 POL-neuron 模型在仿生偏振光导航传感器的研制中被广泛应用<sup>[7~10]</sup>.

基于仿沙蚁 POL-neuron 模型, 偏振光导航传感器可以实现对大气偏振模式中偏振度及偏振角信息的获

取<sup>[7~10]</sup>, 但是其直接输出的角度值域范围为  $[-45^\circ, 45^\circ]$ , 近年来有学者提出了可以将偏振光测角值域范围扩展为  $[0^\circ, 180^\circ]$  的方法<sup>[11]</sup>, 可是当测量角度超过  $180^\circ$  时, 偏振光测角的歧义性问题依然存在, 导致偏振光传感器  $360^\circ$  范围内的航向角获取具有明显的局限性. 由于该问题的存在, 为了实现  $360^\circ$  范围内导航航向角的获取, 国外学者在其设计的偏振光导航平台上采用了环境光强传感器和偏振光传感器信息融合的方法<sup>[7]</sup>.

本文根据大气偏振模式中偏振度分布不均匀的规律, 在 POL-neuron 模型的基础上提出了 PFAC (POL-neuron full angle calculation) 模型, 该模型可以通过各通道响

应间的大小关系和不同天空区域偏振度大小的比较,将偏振光传感器的测角值域范围扩展为 $[0^\circ, 360^\circ]$ ,单独利用偏振光传感器即可实现 $360^\circ$ 范围内的导航航向角分辨,文章对该模型解决偏振光导航测角歧义性的信号处理过程进行了描述,并通过实测实验进行了验证。

## 2 偏振光导航的测角原理

太阳光本为自然光,大气传输过程中与气体分子、尘埃等发生散射作用,产生了偏振光.天空中的偏振光在宏观上形成了一种特殊的、稳定的、具有规律性的偏振态分布,即大气偏振模式<sup>[3-5]</sup>,图 1(a)所示即为大气偏振模式示意图,其中  $o$  点为观测者所处位置,位于  $o$  点正上方的  $z$  点为天顶点,  $s$  点为观测时刻太阳所处位置,经过天顶和太阳位置的弧线称为太阳子午线 SM,经过天顶点和反太阳位置的弧线称为逆太阳子午线 ASM,图中各短线的方向和粗细分别表示模式中该位置的 E-矢量方向和偏振度。

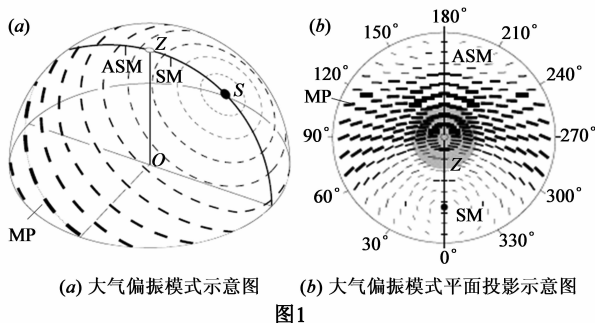


图 1

大气偏振模式主要由太阳位置和观测位置确定,观测位置确定后,在某一具体时刻,天空中具有相对稳定的大气偏振模式,其存在两条基本对称线<sup>[7]</sup>:一条是过太阳和天顶的 SM-ASM;另一条是与太阳角距为 $90^\circ$ 的最大偏振线(图 1(a)中的弧线 MP),最大偏振线上的点偏振度最大,距离最大偏振线越远的弧线上的点偏振度越小.一天中,随时间变化,太阳向西运动(大约每小时 $15^\circ$ ),太阳高度角及方位角不断改变,天空中的整个 E-矢量模式随之旋转,上述两种对称性始终保持,研究表明当气象条件发生变化时, E-矢量模式仍十分稳定<sup>[12-13]</sup>,有较好的抗干扰特性,且紫外光波段的 E-矢量模式最为稳定<sup>[14]</sup>。

将大气偏振模式投影到平面,如图 1(b)所示,可见大气偏振模式的投影仍然关于 SM-ASM 呈轴对称,且 SM 一侧的偏振度明显小于 ASM 一侧,此外,对称轴 SM-ASM 上所有的 E-矢量方向都与其垂直,天顶点  $z$  正是 SM-ASM 上的一点.偏振光导航传感器就是通过对天顶区域偏振信息的检测,计算出传感器正方向与天顶区域 E-矢量方向的夹角<sup>[7]</sup>,定义为  $\varphi$ ,由太阳子午线上 E-

矢量方向与太阳子午线的垂直关系,换算得到传感器正方向与太阳子午线的夹角,定义为  $\theta$ ,规定夹角取锐角,故有  $\theta = \pi/2 - \varphi$ ,太阳子午线与地理正北的夹角可由时间信息计算得到,经过这一系列转换关系就可以得到传感器正方向与地理正北方向的夹角,即导航方向角,再根据载体的运动速度,由路径积分原理实现偏振光导航<sup>[15-17]</sup>。

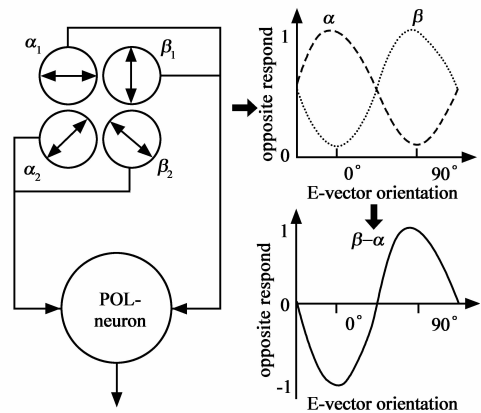


图 2 POL-NEURON模型信号响应过程

传统 6 个偏振通道<sup>[7]</sup>和 4 个偏振通道<sup>[8-10]</sup>的偏振光导航传感器都是基于 POL-neuron 模型实现的, POL-neuron 模型信号处理过程如图 2 所示,两组偏振对立单元模拟沙蚁等生物的偏振信息感知器,经过对数运算,处理得到式(1)和式(2)的两路输出,从而解算出传感器正方向与天顶区域 E-矢量方向的夹角,其中  $d$  为偏振度,  $\varphi$  为所检测区域的 E-矢量方向与传感器正方向夹角,且  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ 、 $\alpha_2$  和  $\beta_2$  通道的偏振透过方向与传感器正方向的夹角分别为 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $45^\circ$ (一般为 $\varphi_0^0$ )和 $135^\circ$ (一般为 $(\varphi_0 + 90)^\circ$ )<sup>[7-9]</sup>。

$$F_1(\varphi) = \lg\left(\frac{1 + d\cos(2\varphi)}{1 - d\cos(2\varphi)}\right) \quad (1)$$

$$F_2(\varphi) = \lg\left(\frac{1 + d\cos(2\varphi - 2\varphi_0)}{1 - d\cos(2\varphi - 2\varphi_0)}\right) \quad (2)$$

## 3 PFAC 模型

### 3.1 PFAC 模型的数学描述

建立四个通道的 PFAC 模型,其中通道 1、2、3 的偏振化方向分别为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  和  $\varphi_3$ (本文中,以通道 1 为参考,相对角度分别为 $0^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $120^\circ$ ),通道 4 为无偏通道,以通道 1 的偏振化方向为传感器本体坐标系的  $Y$  轴,定义该  $Y$  轴方向为传感器正方向,如图 3 所示。

传感器检测的偏振光为部分偏振光,包括自然光部分和线偏振部分.设总光强为  $I$ ,偏振度为  $d$ ,所检测区域的 E-矢量方向与传感器正方向夹角为  $\varphi$ ,各通道的偏振方向与传感器正方向夹角为  $\varphi_n$ ,由于自然光可

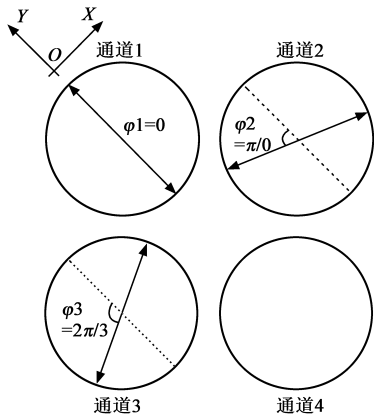


图3 PFAC模型各通道示意图

分解为任意两束相互垂直、振幅相等的独立偏振光,同时,根据马吕斯定律<sup>[18]</sup>,经检偏后的光强也由自然光部分  $I_1'$  和线偏振部分  $I_2'$  组成,

$$I' = I_1' + I_2' = \frac{1}{2}I(1 - d) + Id \cos^2(\varphi - \varphi_n) \quad (3)$$

光信号经过光电转换为电信号,设光电转换率由参数  $K$  表示,则 4 路通道输出值如式(4)所示,

$$\begin{cases} P_1 = \frac{1}{2}KI(1 + d\cos 2\varphi) \\ P_2 = \frac{1}{2}KI(1 + d\cos 2(\varphi - \pi/3)) \\ P_3 = \frac{1}{2}KI(1 + d\cos 2(\varphi - 2\pi/3)) \\ P_4 = KI \end{cases} \quad (4)$$

将  $P_4$  代入  $P_1$  和  $P_2$ ,化简后可解算得到偏振度  $d$  和传感器正方向与所测区域 E-矢量方向的夹角  $\varphi$ .

$$\begin{cases} d = \sqrt{\left(\frac{2P_1}{P_4} - 1\right)^2 + \frac{4}{3}\left(\frac{2P_1 + 4P_2}{2P_4} - \frac{3}{2}\right)^2} \\ \varphi = \frac{1}{2} \arccos \left( \frac{\frac{2P_1}{P_4} - 1}{\sqrt{\left(\frac{2P_1}{P_4} - 1\right)^2 + \frac{4}{3}\left(\frac{2P_1 + 4P_2}{2P_4} - \frac{3}{2}\right)^2}} \right) \end{cases} \quad (5)$$

### 3.2 传感器测角的值域范围扩展方法

#### 3.2.1 180°范围内的角度值域扩展

在计算传感器正方向与所测区域 E-矢量方向的夹角  $\varphi$  的过程中,式(5)用到的反余弦值域为  $[0, \pi]$ ,故  $2\varphi$  的值域为  $[0, \pi]$ ,  $\varphi$  的值域为  $[0, \pi/2]$ ,如图 4 所示,当传感器的正方向与 E-矢量方向夹角为  $\varphi$  和  $\pi - \varphi$  时(即图 4 所示的  $Y_1$  和  $Y_2$  方向),因传感器的测量结果相同而不能分辨,称为 180°范围内的测角歧义性。

为解决这一问题,需对传感器的直接输出结果进行处理.如图 5(a)和 5(b)所示为传感器 4 路电压和直

接角度输出的仿真结果,理论上,随着传感器旋转角度  $0^\circ$  到  $360^\circ$  的变化,正确的传感器输出应为  $0^\circ$  到  $360^\circ$ ,而由于测角歧义性的存在,图 5(b)中传感器的直接角度输出结果被分为  $0^\circ - 90^\circ$ 、 $90^\circ - 0^\circ$ 、 $0^\circ - 90^\circ$  和  $90^\circ - 0^\circ$  等 4 个区域,180°范围内测角歧义性的解决就是要进行第 2 个区域和第 4 个区域的角度修正。

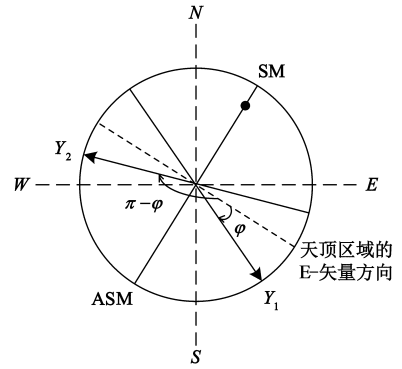
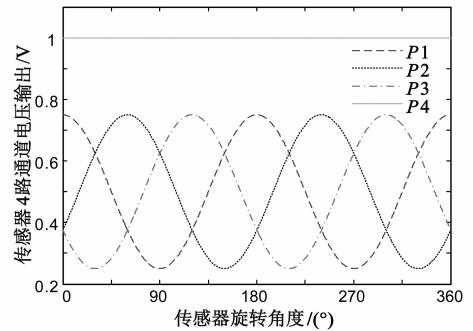
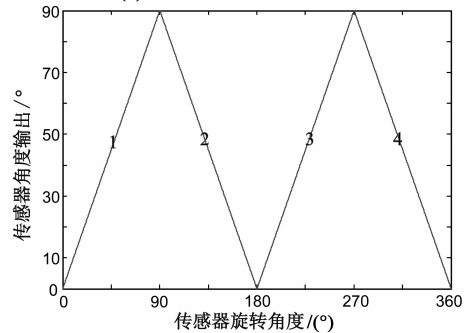


图4 传感器180°范围测角歧义性示意图



(a) 传感器4路电压输出仿真结果



(b) 传感器直接角度输出结果

图5

首先要判断传感器输出的角度是处在区域 1、3 还是区域 2、4 内,对比图 5(a)与 5(b)的横坐标可知,图 5(b)中的区域 1、3 对应图 5(a)中的  $P_2 > P_3$  区域,区域 2、4 对应图 5(a)中的  $P_2 < P_3$  区域.由此可以根据  $P_2$  和  $P_3$  的大小关系,判断传感器角度输出是否需要修正.如图 6(a)所示,SM-ASM 和与其垂直的天顶区域 E-矢量方向将整个角度空间分为 4 个区域(A、B、C、D),当传感器正方向落在区域 A、C 时,有  $P_2 > P_3$ ,此时不

需要进行角度修正,而当传感器正方向落在区域 B、D 时,有  $P_2 < P_3$ ,此时需要对角度进行相应的修正,故当传感器输出角度为  $\varphi$  时,消除  $180^\circ$  范围内测角歧义性后的角度值  $\varphi'$  可通过式(6)得到.

$$\varphi' = \begin{cases} \varphi, & (P_2 > P_3) \\ \pi - \varphi, & (P_2 < P_3) \end{cases} \quad (6)$$

该仿真结果如图 6(b) 所示,随着传感器旋转  $0^\circ$  到  $360^\circ$ ,可以得到两个周期的  $0^\circ$  到  $180^\circ$  的测角值,而解决  $360^\circ$  范围内的测角歧义性就是要实现这两个  $0^\circ$  到  $180^\circ$  周期的区分.

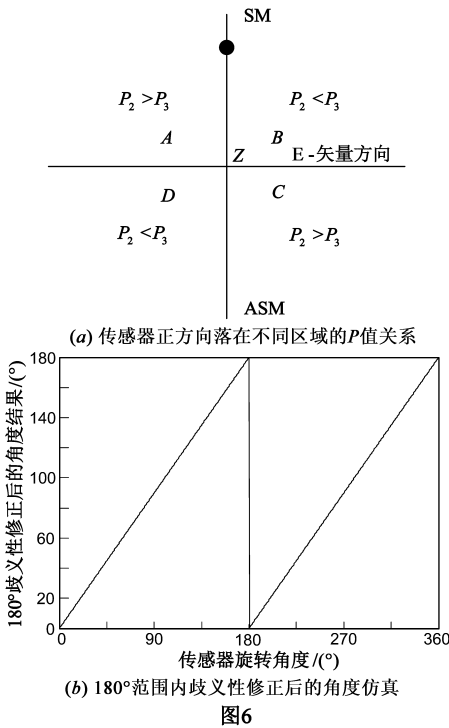


图6

### 3.2.2 $360^\circ$ 范围内的角度值域扩展

当传感器的正方向与 E-矢量方向夹角为  $\varphi$  和  $\varphi + \pi$  时(即图 7 所示的  $Y_1$  和  $Y_2$  方向),因传感器的测量结果相同而不能分辨,称为  $360^\circ$  范围内的测角歧义性.

如图 8(a) 所示,马尔堡大学的 Stanley Heinz 在研究

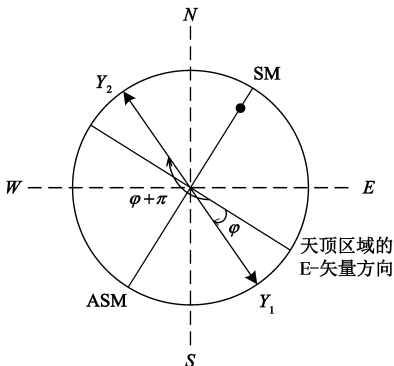


图7 传感器  $360^\circ$  范围测角歧义性示意图

中发现,蝗虫利用偏振光导航时,当太阳在其正面和背面(即蝗虫面向 SM 和面向 ASM)时,由于蝗虫拥有左(left)和右(right)两组偏振光感知器,E-矢量的不同分布会对大脑中神经元产生不同的刺激,当蝗虫体轴与太阳子午线有一个如图 8(b) 所示的夹角时,若其左偏振光感知器测得的偏振度小于右感知器,则可判断其朝向太阳;反之同理.蝗虫藉此分辨其面向的为 SM 还是 ASM<sup>[19]</sup>.

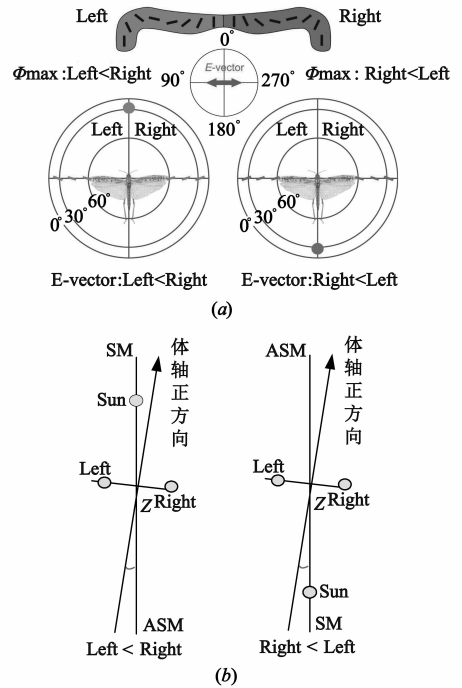


图8 蝗虫分辨SM与ASM的方法示意图

PFAC 模型可以使用类似的方法来解决测角时  $360^\circ$  范围内的歧义性问题,式(5)在计算偏振度  $d$  时,仅用到了通道 1、2、4 的数据,而使用通道 1、3、4 的数据同样也可以计算出偏振度,即,

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{\left(\frac{2P_1}{P_4} - 1\right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{2P_1 + 4P_2}{2P_4} - \frac{3}{2}\right)^2} \\ d_2 = \sqrt{\left(\frac{2P_1}{P_4} - 1\right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{3}{2} - \frac{2P_1 + 4P_3}{2P_4}\right)^2} \end{cases} \quad (7)$$

由瑞利散射理论可知,整个大气偏振模式中太阳位置所在的 SM 一侧的偏振度小于 ASM 一侧的偏振度<sup>[7,15-17]</sup>.如图 9(a) 所示,由于传感器 4 个通道的视场大小有限,通道 1、2、4 组成的上三角视场空间和通道 1、3、4 组成的下三角视场空间对应的大气偏振模式区域不同,上三角对应区域的偏振度  $d_1$  和下三角对应区域的偏振度  $d_2$  也不同,当  $d_1 > d_2$  时 SM 位于传感器正方向的逆时针位置,当  $d_1 < d_2$  时 SM 则位于传感器正方向的顺时针位置.如图 9(b) 所示的情况,通道 1、2、4

的视场覆盖区域与通道 1、3、4 存在差异,前者较后者更偏向于太阳一侧,故由前者测得数据按式(7)计算出的

偏振度  $d_1$  要略小于由后者测得数据按式(7)计算出的偏振度  $d_2$ .

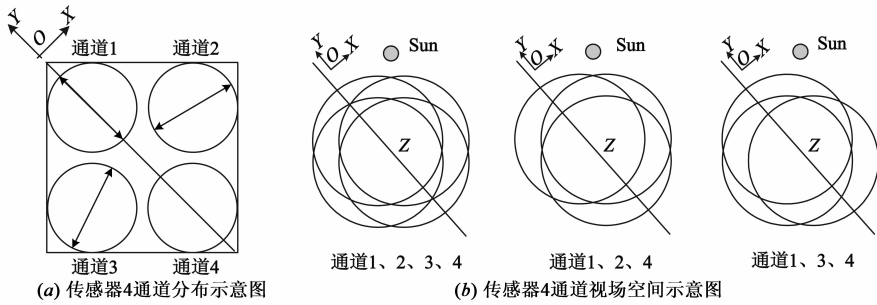


图9

如图 10(a)所示,当传感器的正方向落在区域 A 时,通道 1、2、4 的覆盖区域比通道 1、3、4 更偏向于太阳一侧,因而按通道 1、2、4 数据计算的偏振度  $d_1$  小于按通道 1、3、4 数据计算的偏振度  $d_2$ ,即在区域 A 内有  $d_1 < d_2$  且  $P_2 > P_3$ ;如图 10(b)所示,当传感器的正方向落在区域 B 时,则通道 1、3、4 的覆盖区域比通道 1、2、4 更偏向于太阳一侧,因而有  $d_1 > d_2$  且  $P_2 < P_3$ ;同理可得,当传感器的正方向落在区域 C 时,有  $d_1 > d_2$  且  $P_2 > P_3$ ;而落在区域 D 时,有  $d_1 < d_2$  且  $P_2 < P_3$ .

$$\varphi_{\text{实}} = \begin{cases} \varphi' & (d_1 < d_2 \text{ 且 } P_2 > P_3) \\ \varphi' & (d_1 > d_2 \text{ 且 } P_2 < P_3) \\ \varphi' + \pi & (d_1 > d_2 \text{ 且 } P_2 > P_3) \\ \varphi' + \pi & (d_1 < d_2 \text{ 且 } P_2 < P_3) \end{cases} \quad (8)$$

### 4 实验与讨论

对利用 PFAC 模型设计的偏振光传感器进行实验测试,将传感器置于高精度水平旋转台(大恒 GCM-1101M)之上,在步进电机系统控制下匀速旋转  $360^\circ$ ,每旋转  $0.5^\circ$  采集一次传感器数据,共采集 720 个数据点,4 路输出经归一化及误差补偿<sup>[9,10]</sup>后,如图 11(a)所示.由式(5)计算出 E-矢量方向与传感器正方向的夹角  $\varphi$ ,如图 11(b)所示.

为将传感器输出角度  $\varphi$  的值域从  $[0, \pi/2]$  扩展到  $[0, \pi]$ ,比较偏振方向为  $60^\circ$  的通道和偏振方向为  $120^\circ$  的通道输出电压,得到差值,结果如图 12(a)所示,

结合图 11(b),根据式(6)的判断方法,消除  $180^\circ$  范围内测角歧义性后的角度值  $\varphi'$  可根据表 1 计算得到,扩展结果如图 12(b)所示.

表 1 传感器  $60^\circ$  通道与  $120^\circ$  通道电压输出值比较结果

数据采集点	$P_2$ 与 $P_3$ 的关系	$180^\circ$ 范围内歧义性修正结果
1 ~ 113	$P_2 > P_3$	$\varphi' = \varphi$
114 ~ 296	$P_2 < P_3$	$\varphi' = \pi - \varphi$
297 ~ 479	$P_2 > P_3$	$\varphi' = \varphi$
480 ~ 656	$P_2 < P_3$	$\varphi' = \pi - \varphi$
657 ~ 720	$P_2 > P_3$	$\varphi' = \varphi$

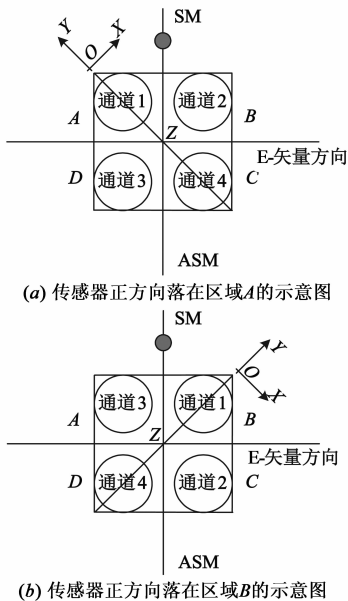


图10

由此可以判断传感器正方向落在区域 A、B 还是区域 C、D,当落在区域 A、B 时不需要进行角度修正,而当落在区域 C、D 时则需要进行相应的修正,故当经过  $180^\circ$  范围内测角歧义性修正后的角度值为  $\varphi'$  时,消除  $360^\circ$  范围内测角歧义性的测角值  $\varphi_{\text{实}}$  可由式(8)得到.

为将传感器输出角度的值域扩展到  $[0, 2\pi]$ ,比较由通道 1、2、4 计算得到的偏振度  $d_1$  和由通道 1、3、4 计算得到的偏振度  $d_2$  的大小,计算  $d_1$  与  $d_2$  的差值,结果如图 13(a)所示.

根据式(8),结合  $d_1$  与  $d_2$  和  $P_2$  与  $P_3$  的大小关系,传感器输出的实际角度  $\varphi_{实}$  可根据表 2 计算得到,消除 360°范围内测角歧义性后的角度值结果如图 13(b)所示。

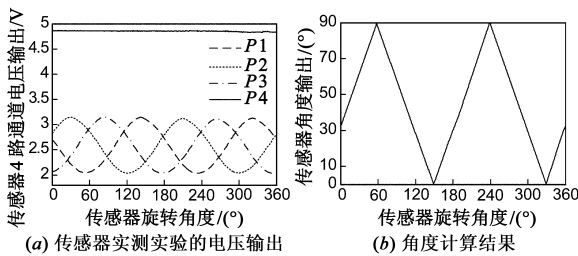


图11

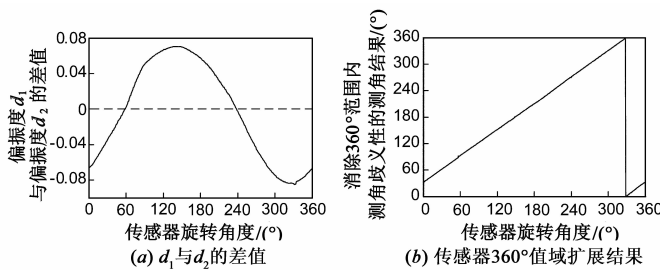


图13

对传感器的角度测算结果进行抽样,每隔 10 个数据点采样一次,再与 5°间隔比较,得到传感器的角度测算误差,如图 14 所示,最大绝对误差为 0.482°,平均绝对误差为 0.201°。

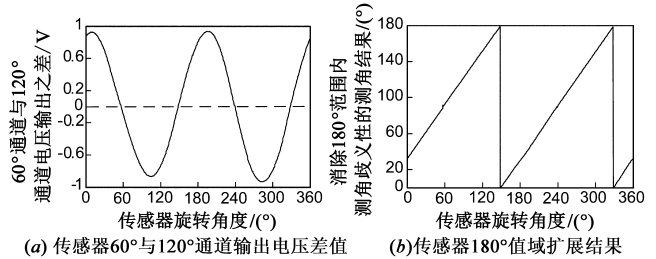


图12

表 2 传感器两组通道测得偏振度比较结果

数据采集点	$d_1$ 与 $d_2$ 的关系	$P_2$ 与 $P_3$ 的关系	360°范围内歧义性修正结果实际角度
1 ~ 113	$d_1 < d_2$	$P_2 > P_3$	$\varphi_{实} = \varphi$
114 ~ 296	$d_1 > d_2$	$P_2 < P_3$	$\varphi_{实} = \varphi$
297 ~ 479	$d_1 > d_2$	$P_2 > P_3$	$\varphi_{实} = \varphi + \pi$
479 ~ 656	$d_1 < d_2$	$P_2 < P_3$	$\varphi_{实} = \varphi + \pi$
657 ~ 720	$d_1 < d_2$	$P_2 > P_3$	$\varphi_{实} = \varphi$

### 5 总结

本文在仿沙蚁 POL-neuron 模型的基础上,结合大气偏振模式理论及其分布规律,提出了一种利用三个偏振通道和一个非偏振通道实现偏振光导航 360°范围测角的 PFAC 模型.利用该模型可以实现由判断函数通过各通道响应间的大小关系解决传感器测角的 180°歧义性问题,利用不同通道对应的不同天空区域偏振度大小的关系解决传感器测角的 360°歧义性问题,最后对传感器实测数据的分析和处理结果表明该偏振信息处理模型可以为偏振光导航传感器实现 360°范围内的导航航向角获取提供一种有效的方法。

### 参考文献

[1] Gao J, Wang L, Bo M, et al. Information Acquisition in desert ant navigation[J]. International Journal of Information Acquisi-

tion, 2006, 3(01): 33 – 43.  
 [2] Rossel S, Wehner R. How bees analyse the polarization patterns in the sky[J]. Journal of Comparative Physiology A, 1984, 154(5): 607 – 615.  
 [3] Wehner R. Polarization vision-a uniform sensory capacity? [J]. Journal of Experimental Biology, 2001, 204(14): 2589 – 2596.  
 [4] Fent K, Wehner R. Ocelli: A celestial compass in the desert ant cataglyphis[J]. Science, 1985, 228(4696): 192 – 194.  
 [5] Barta A, Horváth G. Why is it advantageous for animals to detect celestial polarization in the ultraviolet? Skylight polarization under clouds and canopies is strongest in the UV[J]. Journal of theoretical biology, 2004, 226(4): 429 – 437.  
 [6] 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.  
 [7] Lambrinos D, Möller R, Labhart T, et al. A mobile robot employing insect strategies for navigation[J]. Robotics and Autonomous systems, 2000, 30(1): 39 – 64.  
 [8] 范之国, 高隽, 魏靖敏, 等. 仿沙蚁 POL-神经元的偏振信息检测方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 745-749.  
 Fan Zhi-guo, Gao Jun, Wei Jing-min, et al. Investigation of atmospheric polarization information measurement method imitating POL-neurons of cataglyphis[J]. Chinese Journal of Scientific

- ic Instrument, 2008, 29(4): 745 – 749. (in Chinese)
- [9] 高隼, 范之国, 潘登凯, 吴良海, 杨姜伟. 平面四通道大气偏振信息检测传感器[P]. 中国专利: 200810246235. 3, 2010-09-01.  
Gao J, Fan Z G, Pan DK, Wu L H, Yang J W. The planar four-channel atmospheric polarization information detection sensor [P]. Chinese Patent: 200810246235. 3, 2010-09-01. (in Chinese)
- [10] 高隼, 范之国, 胡翊, 潘登凯, 范宁生. 四通道大气偏振信息检测传感器信号处理与补偿方法[P]. 中国专利: 200810246233. 4, 2010-10-06.  
Gao J, Fan Z G, Hu Y, Pan D K, Fan N S. The signal processing and compensation method of the four-channel atmospheric polarization information detection sensor [P]. Chinese Patent: 200810246233. 4, 2010-10-06. (in Chinese)
- [11] Zhao K, Chu J, Wang T, et al. A novel angle algorithm of polarization sensor for navigation[J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2009, 58(8): 2791 – 2796.
- [12] Hegedüs R, Akesson S, Horváth G. Polarization patterns of thick clouds; overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies[J]. JOSA A, 2007, 24(8): 2347 – 2356.
- [13] 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.
- [14] Wang X, Gao J, Fan Z. Empirical corroboration of an earlier theoretical resolution to the UV paradox of insect polarized skylight orientation[J]. Naturwissenschaften, 2014, 101(2): 95 – 103.
- [15] 田柳, 高隼, 范之国, 等. 基于大气偏振模式分布规律的导航方向角计算方法[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 141 – 146.  
Tian Liu, Gao Jun, Fan Zhi-guo, et al. The method of the navigation direction angle calculation with the distribution of the atmospheric polarization pattern[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(1): 141 – 146. (in Chinese)
- [16] 张旭东, 林金金, 谢昭, 等. 基于电矢量描述的大气偏振建模[J]. 电子学报, 2010, 38(12): 2745 – 2750.  
Zhang Xudong, Lin Jinjin, Xie Zhao, et al. Model of Skylight polarization pattern based on electric vector[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(12): 2745 – 2750. (in Chinese)
- [17] 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, 2009, 45(4): 616 – 620.  
Yan Lei, Guan Guixia, Chen Jiabin, et al. The bionic orientation mechanism in the skylight polarization pattern[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(4): 616 – 620. (in Chinese)
- [18] 胡玉禧, 安连生. 应用光学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996. 8.  
Hu Yuxi, An Liansheng. Applied Optics [M]. Hefei: USTC Press, 1996. 8. (in Chinese)
- [19] Heinze S, Gotthardt S, Homberg U. Transformation of polarized light information in the central complex of the locust[J]. The Journal of Neuroscience, 2009, 29(38): 11783 – 11793.

#### 作者简介



王 昕 男, 1988 年 5 月出生于安徽合肥. 2010 年毕业于合肥工业大学电子信息科学与技术专业, 现为合肥工业大学计算机与信息学院博士研究生, 主要研究方向为智能信息处理.  
E-mail: wangxin@mail.hfut.edu.cn



范之国 男, 副教授. 1978 年出生于安徽霍山, 2002 年毕业于鞍山科技大学, 获得学士学位, 2007 年、2011 年在合肥工业大学获得硕士学位、博士学位, 主要研究方向为智能信息处理.  
E-mail: ibcshfut@163.com