

基于大气偏振模式分布规律的 导航方向角计算方法

田 柳,高 隽,范之国,吴克伟,高丽娟

(合肥工业大学计算机与信息学院,安徽合肥 230009)

摘 要: 针对已有仿生偏振光导航方法中,根据局部天空区域的偏振信息获取导航信息存在的缺陷,提出一种基于大气偏振模式分布规律的导航方向角计算方法.该方法利用大气偏振模式的对称性定义了偏振响应和函数,根据大气偏振模式有限采样点的偏振信息,拟合估计出太阳子午线位置,并最终获取导航方向角信息,最后通过多组观测时刻、多组观测地点的仿真实验,验证了基于大气偏振模式分布规律的导航方向角计算方法的有效性.

关键词: 大气偏振模式; 太阳子午线; 偏振响应和函数; 导航方向角

中图分类号: P401; TP311.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012) 01-0141-06

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.01.023

The Method of the Navigation Direction Angle Calculation with the Distribution of the Atmospheric Polarization Pattern

TIAN Liu, GAO Jun, FAN Zhi-guo, WU Ke-wei, GAO Li-juan

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

Abstract: For the disadvantages of the existing method of bionic polarization navigation, that calculates the navigation direction angle based on the polarization information of the local sky region, a method is proposed to calculate the navigation direction angle based on the symmetrical distribution of the atmospheric polarization mode. The function of polarization response sum is defined according to the symmetry of the atmosphere polarization mode, a finite number of sampling points of the atmospheric polarization are acquired to calculate the position of the solar meridian and to determine the navigation direction angle. The corresponding validation experiment is also given to test the method of navigation direction angle calculation using the symmetry of the atmospheric polarization distribution mode.

Key words: Atmosphere polarization pattern; solar meridian; the function of polarization response sum; navigation direction angle

1 引言

导航在紧急救援、武器制导、飞机舰船定位等众多领域有着广泛应用.随着科技进步与社会发展,基于地球自然特性的自主导航方法,因较大范围内受人为因素的影响较小,具有较强的抗干扰性和稳定性,得到了越来越多的重视.基于自然偏振特性的仿生偏振光导航方法是一种仿生自主导航方法^[1],已成为近年来研究的热点.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^[2-4],国内许多学者近年来也开始研究天空偏振光学特性及仿生偏振光导航技术^[5-7].

自然条件下沙蚁等生物是通过复眼背部边缘区域特殊结构的小眼感知天空中的偏振模式并完成方位信息获取^[2-4],已有的偏振光导航方法中,人们模仿沙蚁的小眼结构设计了采集局部天空偏振信息的偏振光获取装置^[8,9],通过获取的局部偏振光信息确定导航方向信息,随着时间和观测区域的变化,局部天空偏振信息在不断发生无规律的变化,单独依靠局部天空偏振信息很难获得准确有效的导航信息.同时研究发现,沙蚁等生物在利用偏振光导航时,并不是基于精确提取某一处局部偏振光的偏振信息,而是基于整个大气偏振模式^[10],这就启发我们研究利用大气偏振模式来获取导航方向角信息的方法.

本文从大气偏振模式理论模型入手,分析了大气偏振模式对称性分布的规律,根据沙蚁利用大气偏振模式导航的机理,提出了利用大气偏振模式的分布规律,定义偏振响应和函数,根据大气偏振模式信息有限个点的采样结果,计算出太阳子午线的位置,进而确定导航过程中的方向角信息的方法,并通过实验验证了该方法的有效性.

2 基于大气偏振模式分布规律的导航机理

太阳光在传输过程中与大气中的分子或尘埃等发生散射作用从而产生偏振光,许多不同偏振度和偏振化方向的偏振光可以形成特定的偏振态分布,即大气偏振模式^[3,8].大气偏振模式主要由太阳位置和观测位置确定,包括偏振度和偏振化方向等参数信息,蕴涵着重要导航方向信息^[1,8~11].在现有描述大气偏振模式的理论模型中最为经典的是基于瑞利散射原理的大气偏振模式表征方法^[12,13],根据 Gábor Horváth 等人的研究^[12],该模型能很好地描述理想大气偏振模式.理想环境下,大气偏振模式可以通过瑞利散射理论直接计算得到,偏振度和偏振化方向的表示如图 1 所示. O 点为地面观测者位置, Z 为天顶, S 是太阳所在的位置, SM 表示太阳子午线, ASM 表示逆太阳子午线,太阳子午线与逆太阳子午线连线用 $SM-ASM$ 表示,图 1 中各短线的方向和宽度分别表示偏振化方向和偏振度.

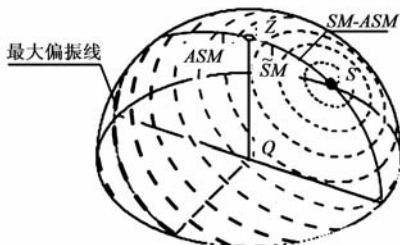


图1 理论天空偏振模式表征^[8]

在某一具体时刻和位置,天空中具有相对稳定的大气偏振模式,这一相对稳定的大气偏振模式存在两条基本的对称线^[14]:一条是过太阳和天顶的 $SM-ASM$,大气偏振模式的偏振度关于 $SM-ASM$ 对称分布,偏振化方向关于 $SM-ASM$ 逆对称分布;另一条是与太阳角距为 90° 的最大偏振线;大气偏振模式关于最大偏振线对称,在对称线所在的位置,偏振度最大,距离对称线越远,偏振度越小,太阳子午线附近的偏振度要小于逆太阳子午线附近的偏振度.随着太阳的向西运动(大约每小时 15°),太阳高度角及方位角不断变化,对称线和整个 E 矢量模式按天顶旋转,大气偏振模式始终保持上述两种对称性.

沙蚁等生物利用大气偏振模式分布的稳定性及规

律性进行导航,许多文献^[2~4]指出:沙蚁等生物利用其特殊复眼结构所具有的偏振敏感性获取大气偏振模式,感知太阳子午线位置,并以此为参考方向实时获得体轴与太阳子午线的夹角,从而确定体轴与南北方向之间的夹角(即导航方向角)^[5],再结合此时的运动速度,根据路径积分^[8]的原理即可实现偏振光导航.

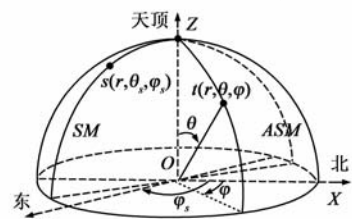
在仿生偏振光导航中,同样可以模仿沙蚁等生物的导航机理,利用大气偏振模式的分布规律获得导航方向角信息,根据路径积分原理实现导航.其中,利用大气偏振模式的对称性分布规律的导航方向角计算方法是本文讨论的重点.

3 导航方向角计算

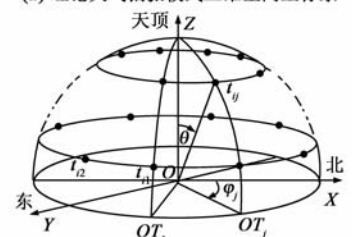
某一时刻和地点的太阳子午线与地理正北的夹角(φ_s 方向)可以由当地的经纬度和时间等参数求出^[15],以太日子午线为基准,通过确定观测者朝向(即生物体轴方向)与太阳子午线之间的夹角(φ_{SM} 方向),即可获得观测者朝向与地理北方之间的夹角(φ_o 方向),即导航所需要的方向角信息.因此,导航方向角计算的关键在于太阳子午线位置的确定,本文利用大气偏振模式分布的对称性规律,设计偏振响应和函数,根据大气偏振模式中有限个点的偏振信息采样结果,通过计算采样点偏振响应对称轴的位置,从而确定观测者朝向相对于太阳子午线的方向.

3.1 导航方向角 φ_o 求解方法

如图 2(a)所示建立表征基于瑞利散射原理的大气偏振模式的三维空间坐标系 $OXYZ$,以地面观测者当前位置为原点 O ,以地理正北方向为 X 轴,地理正东方向为 Y 轴,过天顶的垂线为 Z 轴,从原点 O 出发的所有方向上的偏振信息,在以地面观测者位置为球心,半径为 r 的半球面上描述, r 为常数;球面上任意一点



(a) 理论大气偏振模式三维空间坐标系



(b) 大气偏振模式采样点分布

图2 理论大气偏振模式的坐标表示及采样分布

$t(r, \theta, \varphi)$ 的高度角为 θ , 方位角为 φ , φ 以正北方向为 0, 正北往东为正值. 太阳位置表示为 $s(r, \theta_s, \varphi_s)$, θ_s 表示太阳高度角, φ_s 表示太阳方位角, 太阳子午线在地理坐标系中的位置以方位角 φ_s 来表示, 太阳位置 $s(r, \theta_s, \varphi_s)$ 可以根据天文学相关公式^[15]确定.

理想情况下大气偏振模式可由瑞利散射理论获得, 对天空中若干点的偏振信息进行采样, 采样的偏振信息可以是偏振度信息或偏振化方向信息, 当太阳坐标表示为 $s(r, \theta_s, \varphi_s)$ 时, 采样点 $t(r, \theta, \varphi)$ 处的偏振度和偏振化方向的理论值可由式(1)计算获得.

$$\begin{cases} P = P_{\max} \sin^2 \gamma / (1 + \cos^2 \gamma) \\ \tan \alpha = \frac{\sin \theta \cos \theta_s - \cos \theta \cos(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s}{\sin(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s} \end{cases} \quad (1)$$

其中 γ 是和太阳位置及采样点位置有关的参数^[13], P_{\max} 表示天空中的最大偏振度. 下文叙述以采样偏振度信息为例.

如图 2(b) 所示, 在三维空间坐标表面从低纬度到高纬度依次分布 m 条纬度圈, 以观测者朝向开始沿 Z 轴向 O 点看去顺时针等间隔分布 k 条经度方向线 ($k = 2n$, n 为正整数), 经纬线相交位置分布采样点. 采样点阵列记作矩阵 $T = \{t_{ij}\}$, 采样点 t_{ij} 在所述三维空间坐标系中的坐标记作 (r, θ_i, φ_j) , 其中 $i \in [1, 2n]$, $j \in [1, m]$. 第 j 条经度方向线在平面 XY 上的投影为 OT_j , OT_j 与 OT_{j+n} 的夹角为 180° , 采样点偏振度矩阵为 $P = \{p_{ij}\}$.

理论大气偏振模式下, p_{ij} 根据式(1)计算得出, 定义 $S(l)$ 为采样点阵列的偏振响应和函数, 根据偏振度分布的对称性, $S(l)$ 表示为以采样点组 OT_l 及 $OT_{(l+n)}$ 为对称轴的所有采样点对的偏振度差的平方和:

$$S(l) = \sum_{i \in [1, n]} \sum_{j=1}^n (P_{i, f(l-j, 2n)} - P_{i, f(l+j, 2n)})^2 \quad (2)$$

$f(x, b)$ 是防止数组下标越界的规范函数.

$$f(x, b) = \begin{cases} x + b, & x < 1 \\ x, & 1 \leq x \leq b \\ x - b, & x > b \end{cases} \quad (3)$$

在三维空间直角坐标系 $OXYZ$ 中规定沿 Z 轴向 O 点看去顺时针方向为正向, 导航方向用观测者朝向表示, 地理正北方向到观测者朝向的正向夹角为 φ_o , 地理正北方向到太阳子午线的正向夹角为 φ_s , 观测者朝向到太阳子午线的正向夹角为 φ_{SM} .

由于大气偏振模式和采样点位置分布的对称性, 如图 3(a), 当太阳子午线的投影 OS 与第 e 组采样点的投影 OT_e 重合时, 由式(2)计算所得所有偏振响应和中, $S(e)$ 的值是最小值 0. 但多数情况下 $SM-ASM$ 落在两组采样点之间, 如图 3(b) 所示, $SM-ASM$ 在 OT_e 和 OT_{e+1} 之间时, OS 与 OT_e 的夹角小于 OS 与 OT_{e+1} 的夹角, 则根据

式(2)计算所得的偏振响应和 $S(l)$ 中 $S(e)$ 为最小值, 这一结果可用式(4)表示.

$$e = \arg \min_{l \in [1, n]} (S(l)) \quad (4)$$

当与 $SM-ASM$ 重合(或最靠近)的采样点组为 OT_e 时, OT_1 到 OT_e 的正向夹角为 $\delta = (e-1)\pi/n$, 依据上文规定第 1 组采样点投影 OT_1 的方向为观测者朝向, 则观测者朝向到第 e 组采样点的正向夹角为 δ . 如图 3(b) 进一步确定第 e 组采样点与 $SM-ASM$ 的夹角 η , 即可确定 $SM-ASM$ 在第 e 组和第 $e+1$ 组采样点之间的精确位置. 从而进一步得出观测者朝向与 $SM-ASM$ 的夹角 φ_{SM-ASM} :

$$\varphi_{SM-ASM} = \begin{cases} \delta - \eta & (\hat{e} = f((e-1), n)) \\ \delta + \eta & (\hat{e} = f((e+1), n)) \end{cases} \quad (5)$$

根据大气偏振模式关于最大偏振线对称分布的规律, 进一步区分太阳子午线与逆太阳子午线, 由于太阳子午线附近的偏振度小于逆太阳子午线附近的偏振度, 因此, 偏振度比较小的采样点靠近太阳子午线, 偏振度比较大的采样点靠近逆太阳子午线. 根据式(6)确定观测者朝向到太阳子午线的正向夹角:

$$\varphi_{SM} = \begin{cases} \varphi_{SM-ASM} \left(\sum_{i=1}^m P_{ie} < \sum_{i=1}^m P_{i\hat{e}} \right) \\ \varphi_{SM-ASM} + \pi \left(\sum_{i=1}^m P_{ie} > \sum_{i=1}^m P_{i\hat{e}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(7)求出地理正北方向到观测者朝向的正向夹角 φ_o , φ_o 即是导航过程中所需的方向角信息.

$$\varphi_o = \begin{cases} \varphi_s - \varphi_{SM}, & \varphi_s \geq \varphi_{SM} \\ 2\pi + \varphi_s - \varphi_{SM}, & \varphi_s < \varphi_{SM} \end{cases} \quad (7)$$

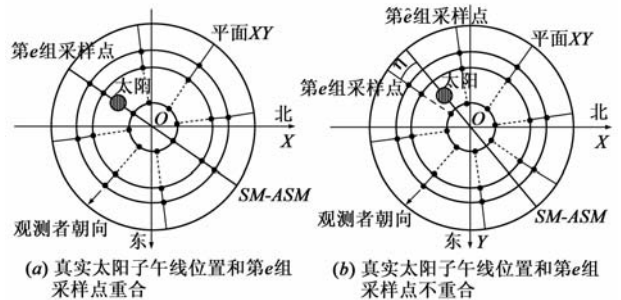


图3 采样点阵列对大气偏振模式的偏振响应

3.2 夹角 η 求解方法

在导航方向角 φ_o 的求解过程中, 当 $SM-ASM$ 与各组采样点均不重合时, 根据式(5)需要计算出第 e 组采样点与 $SM-ASM$ 的夹角 η 的值, 从而确定 $SM-ASM$ 的精确位置. 求解夹角 η 有许多种方法: 可以通过拟合确定解析式中各参数, 反解 $S(l)$ 得到夹角 η 的值; 也可以运用模式学习的方法, 通过获得不同采样响应与夹角 η 之间的对应关系来求解夹角 η . 本文所用的方法为通过对采样点阵列的参数反演, 拟合出的偏振响应应峰值实现对夹角 η 的求解.

根据理论大气偏振模式偏振度的计算公式,偏振度响应矩阵 \mathbf{P} 中各采样值 p_{ij} 为正弦函数的多项式复合函数, $S(l)$ 函数可以分解为 $\sin(\eta)$ 的复合多项式函数. 图 4 中灰色区域为 $(m, n) = (1, 4)$ 时需要拟合的 $S(l)$ 函数, 红色点线为一次多项式函数拟合曲线, 蓝色点划线为二次多项式函数拟合曲线, 绿色间断线为三次多项式函数拟合曲线. 比较各种拟合方法的误差平方和及误差均方根指标, 得出二次多项式和三次多项式都有较好的曲线拟合精度, 二次多项式差值平方和 $SSE = 5.83e-6$, 三次多项式差值平方和 $SSE = 3.36e-6$, 由于三次多项式中的三次项系数 $a_3 = 1.324e-3$ 远小于 1, 考虑到曲线拟合自由度和较少的约束系数个数, $S(l)$ 可以记为二次多项式:

$$S(l) = a_2 \sin(\eta)^2 + a_1 \sin(\eta) + a_0 \quad (8)$$

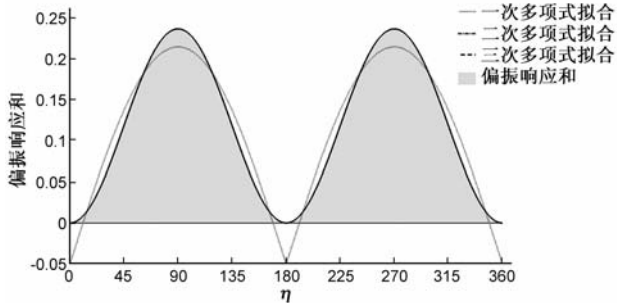
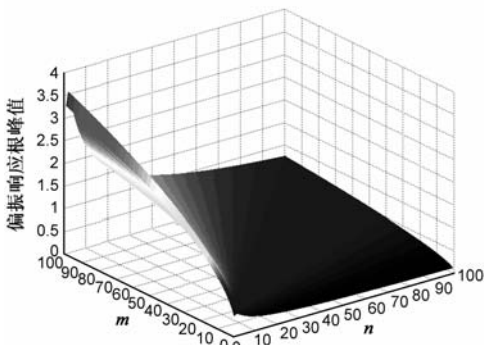


图4 偏振响应和的多项式拟合与高斯拟合

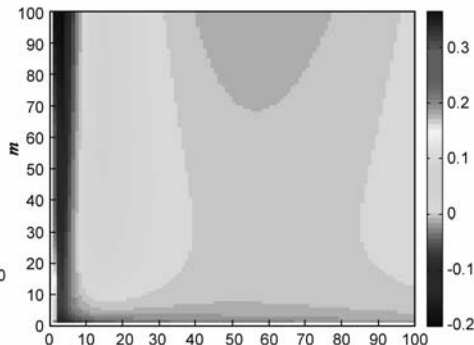
偏振响应根 $T(l) = \sqrt{S(l)}$ 为一次多项式函数. 在大气偏振模式分布规律中, 当 OS 与 OT_l 位置重和时, 即 $\eta = 0^\circ$, 根据式(2)和大气偏振模式的对称性可知 $S(l) = 0$, 因此根据式(9)有:

$$T(l) = g |\sin(\eta)| \quad (9)$$

偏振响应根峰值 g 是关于采样点分布设置参数 m, n 的函数, 记为 $g(m, n)$. 当 $\eta = 90^\circ$ 时, $T(l)$ 取得的偏振响应根函数的极大值, 对于固定 m, n 的采样点分布下, 可以给出幂函数曲线拟合形式 $g(m, n) = c(n) \cdot m^{b(n)}$. 其中 $c(n), b(n)$ 可由有理数函数拟合得出, 偏振



(a) 偏振响应峰值的曲面



(b) 偏振响应根峰值曲面拟合误差

图5 偏振响应峰值的曲面拟合

响应根峰值记为:

$$g(m, n) = c(n) \cdot m^{b(n)} = \frac{c_{p1} \cdot n + c_{p2}}{n + c_q} \cdot m^{\frac{b_{p1} \cdot n + b_{p2}}{n + b_{q2}}} \quad (10)$$

图 5(a) 反映了偏振响应峰值在 $m \in [1, 100]$ 与 $n \in [1, 100]$ 上的变化规律, 式(9)完成曲面拟合, 其中 $c_{p1} = 4.275e-2$, $c_{p2} = 4.676$, $c_q = 11.24$, $b_{p1} = 0.4843$, $b_{p2} = 1.376e-2$, $b_q = 2.577e-2$. 分析图 5(b) 发现, 拟合误差主要集中在 $n \in [1, 5]$ 的区间内, $n \in [1, 100]$ 时理论与拟合结果的差值平方和 $SSE = 13.44$; $n \in [5, 100]$ 时, 理论与拟合结果的差值平方和 $SSE = 1.0388$. 拟合偏振误差的分布规律说明, 除了采样组数分布太少的情况外, 偏振响应和均能很好通过拟合估计.

根据式(11)反解偏振响应和函数的方法即可解出夹角 η :

$$\eta = \arcsin(T(e)/g(m, n)) \quad (11)$$

4 实验分析

本文对所述方法进行了实验验证, 对理论大气偏振模式进行采样, 设置 18 组采样点, 每组分别在高度角为 $45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 的位置处设置一个采样点, 即 $(m, n) = (3, 9)$, 运用本文所述方法计算观测者朝向与太阳子午线之间的夹角:

(1) 仿真实验一: 在 2010 年 10 月 26 日上午 11:00 至下午 18:00 连续时间段内, 观测者方位选择东经 $117^\circ 17'$, 北纬 $31^\circ 52'$ (合肥), 共进行 85 次采样计算, 采样时间间隔为 5min, 观测者朝向预设为地理正北方向, 实验结果如图 6(a), 其中横坐标代表采样时刻, 纵坐标代表观测者朝向与太阳子午线的夹角 φ_{SM} , 图中的两条曲线分别表示不同采样时刻下仿真与实际的 φ_{SM} 值; 仿真误差如图 6(b), 横坐标代表采样时刻, 纵坐标代表仿真计算与实际的 φ_{SM} 值的误差值.

(2) 仿真实验二: 预设太阳高度角 (H_s) 为 60° , 方位角 (A_s) 为 90° , 观测者朝向预设为到正北方向的正向夹角 (φ_o) 为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 运用本文所述的方法计算 φ_o , 结果如图 7(a), 横坐标代表预设 φ_o 值, 纵坐标代表按本文所述方法仿真所得 φ_o 值; 仿真误差如图 7(b), 其中横坐标代表预设 φ_o , 纵坐标代表仿真结果与预设 φ_o 之间误差值.

(3) 仿真实验三: 通过改变实验一中的观测地点 (分别选择观测者地点为合肥、北京、赤道、北极圈) 和改变

实验二中的太阳位置(随机选择不同取值的太阳高度角与方位角)进行了多组仿真实验对比,并对实验结果进行了统计分析,结果如表 1 所示。

以上实验结果说明在不同观测地点和观测时刻下运用本文所述方法都可以有效获得导航过程中的方向角信息,仿真误差主要由于在运用参数拟合的方法求解夹角 η 的过程中引入了拟合误差,拟合误差与采样点的分布有关。

在上述仿真实验中,采样点分布为 $(m, n) = (3, 9)$, 当改变 (m, n) 的取值,即改变采样点分布的情况下进行仿真实验:实验预设太阳高度角 (H_s) 为 60° , 方位角 (A_s) 为 90° , 设置不同的采样点分布,观测者朝向预设到正北方向的正向夹角 (φ_0) 为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 运用本文所述的方法计算 φ_0 , 对计算结果进行统计分析,得到仿真与实际 φ_0 值的平均误差 $\overline{\Delta\varphi_0}$ 。采样点分布 $m \in [1, 100]$, $n = 9$, $\overline{\Delta\varphi_0}$ 结果如图 8 (a) 所示;采样点分布 $m = 3$, $n \in [1, 100]$, $\overline{\Delta\varphi_0}$ 结果如图 8 (b) 所示。

如图 8 (a) 所示结果,误差均值 $\overline{\Delta\varphi_0}$ 在 $m \in [1, 10]$ 内随着 m 的增大会呈减小趋势,当 $m = 10$ 时, $\overline{\Delta\varphi_0}$ 达到最小,在 $m > 10$ 后, $\overline{\Delta\varphi_0}$ 呈先增后减的趋势。如图 8 (b) 所示结果,在 $n = [1, 10]$ 内, $\overline{\Delta\varphi_0}$ 较大,当 $n > 10$, $\overline{\Delta\varphi_0}$ 小于 0.03 且随着 n 的增大而一直呈减小趋势。因此采样点数目 $m \in [7, 20]$ ($m = 10$ 误差最小), n 取大于 20 时,采样计算结果最为理想。

此外,本文方法的说明与实验都以采样偏振度信息为例,本方法采样的偏振信息同样可以是偏振化方向信息,且偏振化方向在实际导航中由于受天气以及其他因素影响较小,结果会更加稳定。

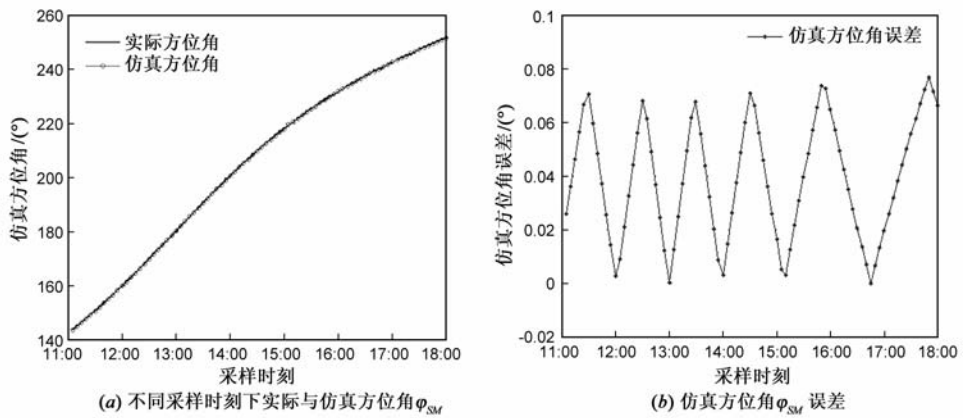


图6 连续观测时刻的方位角仿真结果

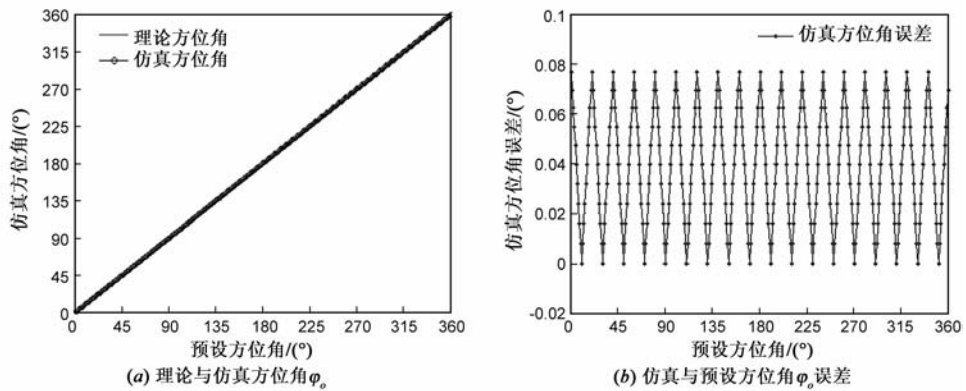


图7 预设观测方向的方位角仿真结果

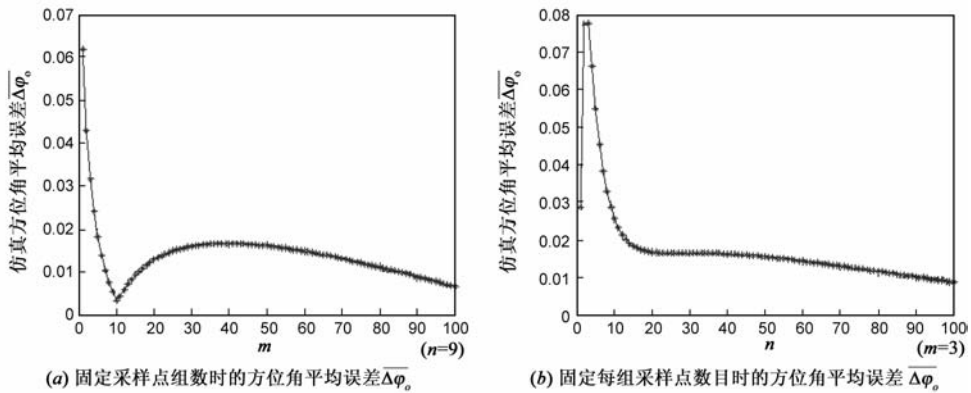


图8 不同采样点分布下的方位角仿真结果

表 1 仿真实验结果(单位:°)

| 实验 | 误差均值 | 误差方差 | 最大误差 | |
|-------|-----------------------------------|--------|-------------|--------|
| 仿真实验一 | E117°17', N31°52' | 0.0391 | 4.7975e-004 | 0.0767 |
| | E116°23', N39°54' | 0.0311 | 3.9204e-004 | 0.0716 |
| | E120°00', N00°00' | 0.0248 | 2.7183e-004 | 0.0478 |
| | E120°00', N66°34' | 0.0592 | 4.4379e-004 | 0.0764 |
| 仿真实验二 | $H_s = 60^\circ, A_s = 90^\circ$ | 0.0390 | 5.0148e-004 | 0.0764 |
| | $H_s = 0^\circ, A_s = 90^\circ$ | 0.0171 | 1.0333e-004 | 0.0338 |
| | $H_s = 80^\circ, A_s = 120^\circ$ | 0.0013 | 6.0171e-007 | 0.0027 |
| | $H_s = 20^\circ, A_s = 20^\circ$ | 0.0312 | 4.0927e-004 | 0.0608 |

5 总结

本文在大气偏振模式理论及其分布规律的研究基础上,提出一种以大气偏振模式对称性分布规律为基础,通过采样大气偏振模式中有限点的偏振信息,根据采样点的采样结果及计算得到的偏振响应和,获得仿生偏振光导航的参考基准线:太阳子午线的位置,并以此为基础获得观测者朝向与地理正北的夹角,即导航中的方向角信息的方法,并通过实验对所述方法进行了验证,得出以下结论:

(1)大气偏振模式存在对称性分布的规律,利用这一规律可以实现导航参考基准太阳子午线方向的获取。

(2)本方法通过设置位置对称的有限个大气偏振模式信息采样点并计算其偏振响应和函数,对采样点阵列参数反演,拟合出偏振响应根峰值,有效实现对采样点偏振响应对称轴位置的估计,从而确定观测者朝向相对于太阳子午线的方向。

(3)本文方法能够有效完成对太阳子午线与观测者朝向夹角的获取,实现不同时刻、不同位置下偏振光导航方向角信息的获取。

对本方法的误差分析与处理是本文研究内容后续开展的主要工作之一,包括研究误差大小与采样点分布的关系,以及在实际检测中减小误差的方法,同时考虑设计实际测量与导航装置,进一步为实现偏振光导航与定位提供理论及方法依据。

参考文献

- [1] Jun Gao, Lei Wang, Mei Bo, Zhiguo Fan. Information acquisition in desert ant navigation[J]. *International Journal of Information Acquisition*, 2006, 3(1): 33 – 43.
- [2] Rossel S, Wehner R. How bees analyse the polarization patterns in the sky[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 1984, 154: 607 – 615.
- [3] R Wehner. Polarization vision—a uniform sensory capacity? [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204: 2589 – 2596.
- [4] Fent K, Wehner R. Ocelli: A celestial compass in the desert ant *cataglyphis*[J]. *Science*, 1985, 228: 192 – 194.
- [5] 晏磊, 关桂霞, 陈家斌, 吴太夏, 邵轩. 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.
YAN Lei, GUAN Guixia, CHEN Jiabin, WU Taixia, SHAO Xuan. The bionic orientation mechanism in the skylight polarization pattern[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(4): 616 – 620. (in Chinese).
- [6] 范之国, 高隽, 潘登凯, 崔帅. 利用偏振光、地磁、GPS 进行多信息源融合导航方法的研究与实现[J]. *武汉大学学报*, 2009, 34(11): 1324 – 1327.
FAN Zhiguo, GAO Jun, PAN Dengkai, CUI Shuai. The imple-

mentation of a new integrated navigation solution with polarized-light assisting with geomagnetism and GPS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1324 – 1327. (in Chinese).

- [7] 张旭东, 林金金, 谢昭, 纪松, 吴克伟, 高隽. 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, Ji Song, Wu Kewei, Gao Jun. Model of skylight polarization pattern based on electric vector[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(12): 2745 – 2750. (in Chinese).
- [8] Dimitrios Lambrinos, Ralf Möller, Rolf Pfeifer. A mobile robot employing insect strategies for navigation in robotics and autonomous systems[J]. *Special Issue on Biomimetic Robots*, 2000, 30: 39 – 64.
- [9] 高隽, 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.
- [10] Wehner, R. Desert ant navigation: how miniature brains solve complex tasks[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2003, 189: 579 – 588.
- [11] István Pomozi, Gábor Horváth, Rüdiger Wehner. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2001, 204: 2933 – 2942.
- [12] Bence Suhai, Gábor Horváth. How well does the rayleigh model describe the E-vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? [J]. *Optical Society of America*, 2004, 21(9): 1669 – 1676.
- [13] K L Coulson. *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*[M]. Hampton: Deepak Pub, 1988.
- [14] Rossel S, Wehner R. The bee's map of the e-vector pattern in the sky[J]. *Nature*, 1982, 79: 4451 – 4455.
- [15] 王炳忠. 太阳能中天文参数的计算[J]. *太阳能*, 1999, 2(2): 8 – 10.
Wang Bingzhong. The calculation of solar astronomy parameters[J]. *Solar Energy*, 1999, 2(2): 8 – 10. (in Chinese).

作者简介



田柳女, 1987年9月出生于安徽合肥。2009年毕业于合肥工业大学通信工程专业, 现为合肥工业大学计算机与信息学院硕士研究生, 主要研究方向为智能信息处理。
E-mail: tianliu1540@163.com

高隽男, 教授、博士生导师。1963年10月出生于安徽淮南, 1985年、1990年在合肥工业大学获学士学位、工学硕士学位, 1999年在中国科学技术大学获博士学位。现为合肥工业大学学术委员会办公室主任, 主要研究方向为智能信息处理、机器视觉。