

文章编号 1004-924X(2016)06-1248-09

## 基于大气偏振模式的三维姿态信息获取

范之国\*, 陈曼丽, 王波, 孙洁, 高隽  
(合肥工业大学 计算机与信息学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 现有的偏振光导航方法提供的二维方向信息不能满足导航的实际需求, 因此, 本文提出了一种利用大气偏振模式获取三维姿态信息的方法, 选取太阳作为空间显著特征点, 利用大气偏振模式信息计算出载体在两次不同状态下的太阳空间位置信息, 通过建立姿态变换矩阵获得了载体的三维姿态信息。最后, 对不同天气条件、不同太阳空间位置、不同波段以及天空被部分遮挡情况下太阳空间位置计算的误差分布情况进行了仿真分析和实际测量。实验结果显示, 当天空有气溶胶粒子分布时, 蓝色波段下的计算误差最小, 方位角和高度角的误差分别为  $1.50^\circ$  和  $2.10^\circ$ ; 当观测视场中有树木遮挡时, 方位角和高度角的平均误差分别为  $0.91^\circ$  和  $1.97^\circ$ , 由此表明本文方法能够有效提取太阳的空间位置, 获得载体的三维姿态信息, 并满足实际导航的需求。

**关键词:** 偏振光学; 偏振光导航; 大气偏振模式; 太阳空间位置; 三维姿态信息

**中图分类号:** O436.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1248

### Three-dimensional attitude information obtained by the skylight polarization pattern

FAN Zhi-guo\*, CHEN Man-li, WANG Bo, SUN Jie, GAO Jun

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

\* Corresponding author, E-mail: fzhgfut@126.com

**Abstract:** The two-dimensional direction information provided by the current polarized skylight navigation method can not meet the actual needs of the navigation, therefore, a method for obtaining 3D pose information by using atmospheric polarization modes was researched. The sun was selected as the spatial point with the salient feature, then the sun spatial position information of the carrier was calculated under two different states by using atmospheric polarization mode information, and thereby 3D pose information of the carrier was obtained through the establishment of attitude transformation matrix. Finally the error distributions in obtaining solar spatial position information under different weathers, different solar spatial locations, different bands and the conditions of the sky being partially obscured were investigated theoretically and experimentally. The result show that the errors of elevation and azimuth angles are  $1.50^\circ$  and  $2.10^\circ$  respectively in the blue band in aerosols, and the average errors of the elevation and azimuth angles are  $0.91^\circ$  and  $1.97^\circ$  respectively in the field of views being obscured by trees. It is indicated that the sun spatial position can be effectively obtained under different circumstances by the proposed

收稿日期: 2016-01-25; 修订日期: 2016-03-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61571175, No. 61571177)

method, which can meet the need for 3D pose information of the carrier in actual navigations.

**Key words:** polarization optics; polarized skylight navigation; atmospheric polarization mode; solar spatial position; 3D pose information

## 1 引言

太阳光进入大气层后,受到粒子散射及地表返照等作用,其偏振态将发生改变,形成具有特定空间分布规律的大气偏振模式,其中蕴含着丰富的光场矢量信息、大气和地表环境信息,以及空间方位信息等<sup>[1-2]</sup>。大气偏振模式在时间、地点和环境因素的共同作用下,呈现出一系列的时空连续分布规律,为仿生偏振光导航提供了稳定、可靠的信息源,因此具有重要的研究价值<sup>[3-6]</sup>。

仿生偏振光导航是一种基于自然偏振特性的自主导航方法。该方法以沙蚁等生物高度敏感的偏振视觉感知与导航功能为生物基础,以太阳光的自然偏振特性为导航依据,通过对大气偏振模式的检测和演算来实现导航信息的获取<sup>[7]</sup>。它是一种被动的、无源的自主导航方法,对无卫星信号环境下的自主导航具有重大的意义。大气偏振模式是地球的自然属性,虽然大气中的空气分子、气溶胶、尘埃等成分及其状态都会对太阳光产生散射,不同的大气成分具有不同的散射特性与偏振特性,但是,大量的偏振现象研究结果表明,大气偏振模式具有稳定的时空连续分布规律<sup>[8-10]</sup>,很难大范围地对大气偏振模式进行人为干扰。沙蚁、蝗虫等生物在不同地域和大气环境下,总是能够利用大气偏振模式信息,实现可靠、准确的导航与定位。仿生偏振光导航需要提取大气偏振模式的空间显著特征,根据大气偏振模式的长期观测结果,空间显著特征主要包括对称性、中性点、天顶、太阳空间位置和反太阳空间位置等<sup>[11-14]</sup>,因此,能够有效提取大气偏振模式的空间显著特征也是利用大气偏振模式获取载体航向姿态信息的关键。

实际导航任务过程中,载体通常会处于非水平状态,因此,现有的偏振光导航方法提供的二维方向信息<sup>[7]</sup>不能满足导航的实际需求。本文提出了一种利用大气偏振模式获取三维姿态信息的方法。由 Rayleigh 散射理论可知,任一被测点处的  $E$ -矢量均垂直于由太阳、观测点和被测点所构成的平面,即也垂直于该平面内由观测点和太阳构

成的向量(即太阳的方向向量)。因此,根据被测点的  $E$ -矢量方向,由垂直的两个向量标量积为零可求出太阳的方向向量,从而获得太阳的空间位置信息<sup>[15]</sup>。再根据载体在两次不同状态下的太阳空间位置信息,建立姿态变换矩阵,最终获得载体的三维姿态信息。通过仿真和实测实验,重点讨论和分析了不同天气条件、不同太阳空间位置、不同波段以及天空被遮挡时太阳空间位置信息的计算误差分布,证明了本文提出的方法能够有效获取太阳的空间位置信息。

## 2 三维姿态信息获取方法

基于单粒子单次散射的瑞利散射模型(Rayleigh 模型)可以很好地描述理想情况下的大气偏振模式分布规律。如图 1 所示,建立东北天坐标系 OXYZ,设天球半径为 1,天顶点为 Z,以观测者为原点 O,以向天顶方向为 Z 轴方向,以正东方向为 X 轴方向,以正北方向为 Y 轴方向。S 点是太阳所在的位置,球面上任意一点  $P(1, \theta_p, \varphi_p)$  的天顶角为  $\theta_p$ ,方位角为  $\varphi_p$ ,正北方向的  $\varphi_p$  为 0,正北往东  $\varphi_p$  为正值。太阳空间位置表示为  $S(1, \theta_s, \varphi_s)$ ,其中,  $\theta_s$  表示太阳天顶角,  $\varphi_s$  表示太阳方位角,太阳高度角  $h_s = \pi/2 - \theta_s$ ,太阳子午线在地理坐标系中的位置以方位角  $\varphi_s$  来表示。

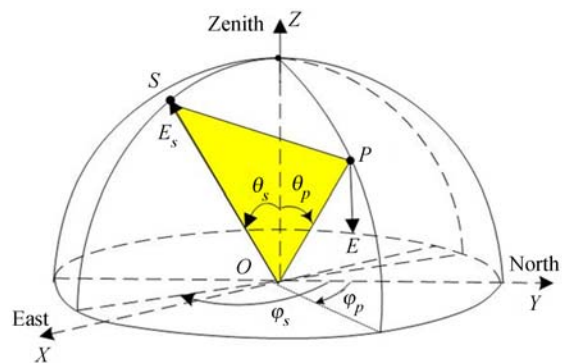


图1 大气偏振模式建模坐标系

Fig. 1 Coordinates of skylight polarization pattern

偏振化方向  $\chi$  定义为被测点  $P$  的偏振  $\mathbf{E}$ -矢量方向同所在子午线的夹角。根据 Rayleigh 散射理论<sup>[16]</sup>, 点  $P$  处的  $\mathbf{E}$ -矢量为:

$$\mathbf{E} = v \cos \chi + h \sin \chi, \quad (1)$$

式中:

$v = (-\cos \theta_p \cos \varphi_p, -\cos \theta_p \sin \varphi_p, \sin \theta_p)$ ,  $h = (-\sin \varphi_p, \cos \varphi_p, 0)$ , 分别为  $\mathbf{E}$ -矢量的垂直分量和水平分量。

当太阳  $S$  位置为  $(1, \theta_s, \varphi_s)$  时, 点  $P$  处的偏振化方向  $\chi$  为:

$$\chi = \arctan \left[ \frac{\sin \theta_p \cos \theta_s - \cos \theta_p \cos(\varphi_s - \varphi_p) \sin \theta_s}{\sin(\varphi_s - \varphi_p) \sin \theta_s} \right]. \quad (2)$$

根据 Rayleigh 散射理论, 任一被测点  $P$  处的  $\mathbf{E}$ -矢量均垂直于由太阳  $S$ 、观测点  $O$  和被测点  $P$  所构成的平面, 也垂直于太阳的方向向量  $\mathbf{E}_s$ , 满足  $\mathbf{E}^T \mathbf{E}_s = 0$ 。其中,  $\mathbf{E}_s = (\sin \theta_s \cos \varphi_s, \sin \theta_s \sin \varphi_s, \cos \theta_s)^T$ 。因此, 当  $\mathbf{E}_s$  与天空中所有被测点的  $\mathbf{E}_i^T$  ( $i$  表示所有被测点) 的正交误差最小时, 即可求出太阳的方向向量  $\mathbf{E}_s$ 。取误差函数为  $f(\mathbf{E}_s, \lambda)$ <sup>[14]</sup>, 有:

$$f(\mathbf{E}_s, \lambda) = \sum_i \omega_i (\mathbf{E}_i^T \mathbf{E}_s)^2 - \lambda (\|\mathbf{E}_s\|^2 - 1), \quad (3)$$

其中:  $\omega_i$  为权重系数, 取为偏振度  $p(\gamma)$ ;  $-\lambda(\|\mathbf{E}_s\|^2 - 1)$  作为约束条件使得  $\mathbf{E}_s$  为单位向量,  $\lambda \geq 0$ ;  $\|\mathbf{E}_s\|^2 = \mathbf{E}_s^T \mathbf{E}_s$ ,  $\mathbf{E}_i^T \mathbf{E}_s = \mathbf{E}_s^T \mathbf{E}_i = C$ ,  $C$  为常数。偏振度  $p(\gamma)$  为:

$$p(\gamma) = \frac{1 - \cos^2 \gamma}{1 + \cos^2 \gamma} p_{\max} = \frac{\sin^2 \gamma}{1 + \cos^2 \gamma} p_{\max}, \quad (4)$$

其中:  $p_{\max}$  为天球表面偏振度的最大值,  $\gamma$  为散射角, 且有:

$$\cos \gamma = \cos \theta_s \cos \theta_p + \sin \theta_s \sin \theta_p \cos(\varphi_s - \varphi_p). \quad (5)$$

化简式(3)可得:

$$f(\mathbf{E}_s, \lambda) = \sum_i \omega_i (\mathbf{E}_i^T \mathbf{E}_s)^2 - \lambda \|\mathbf{E}_s\|^2 + \lambda = \sum_i \omega_i \mathbf{E}_i^T \mathbf{E}_i \mathbf{E}_i^T \mathbf{E}_s - \lambda \mathbf{E}_s^T \mathbf{E}_s + \lambda. \quad (6)$$

因此, 当函数  $f(\mathbf{E}_s, \lambda)$  取最小值(即  $\lambda$ )时, 满足:

$$\sum_i \omega_i \mathbf{E}_i^T \mathbf{E}_i \mathbf{E}_i^T \mathbf{E}_s = \lambda \mathbf{E}_s^T \mathbf{E}_s, \quad (7)$$

由式(7)可得:

$$\lambda \mathbf{E}_s = \sum_i \omega_i \mathbf{E}_i \mathbf{E}_i^T \mathbf{E}_s. \quad (8)$$

令  $\sum_i \omega_i \mathbf{E}_i \mathbf{E}_i^T = \mathbf{K}$ , 所以式(8)可写为:

$$\lambda \mathbf{E}_s = \mathbf{K} \mathbf{E}_s. \quad (9)$$

由式(9)可知,  $\lambda$  为矩阵  $\mathbf{K}$  的特征值, 且  $\mathbf{E}_s$  为最小特征值  $\lambda_{\min}$  对应的特征向量, 即可得最小特征值  $\lambda_{\min}$  对应的特征向量为太阳的方向向量  $\mathbf{E}_s$ , 从而得到当前时刻太阳的空间位置信息, 即天顶角  $\theta_s$  和方位角  $\varphi_s$ 。

再根据载体在两次不同状态下测量的太阳空间位置信息, 通过载体坐标系到参考坐标系的三次转动, 建立姿态变换矩阵, 计算出载体姿态的三维信息, 即俯仰角、滚转角和航向角。假设初始状态载体坐标系与东北天坐标系(参考坐标系)重合, 如图 2(a)所示; 不同状态下两坐标系不重合, 产生一定的夹角, 如图 2(b)所示。为了使两坐标系重合, 首先绕东向轴的正向转过  $\alpha$  角到达  $ox_a y_a z_a$  位置, 再绕  $y_a$  轴的正向转过  $\beta$  角到达  $ox_b y_b z_b$  位置, 再绕  $z_b$  轴的正向转过  $\gamma$  角到达  $ox_r y_r z_r$  位置, 其中  $\alpha, \beta, \gamma$  分别表示俯仰角、滚转角和航向角, 如图 2(c)所示。这一旋转过程的矩阵表达式为:

$$\mathbf{S}_{T1} = \mathbf{C}_r^T \mathbf{C}_b^T \mathbf{C}_a^T \mathbf{S}_{T0} = \mathbf{C} \mathbf{S}_{T0}, \quad (10)$$

其中  $\mathbf{C}$  表示由载体坐标系到参考坐标系的旋转矩阵, 其表达式为:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ -\cos \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可得:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ -\cos \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma + \sin \alpha \cos \gamma \\ \sin \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

利用式(8)和式(9)可求出载体在两次不同状态下的太阳空间位置信息  $S_{T_0}$ ,  $S_{T_1}$ , 然后再利用式

(12)可求出载体的三维姿态信息,即俯仰角  $\alpha$ 、滚转角  $\beta$  和航向角  $\gamma$ 。

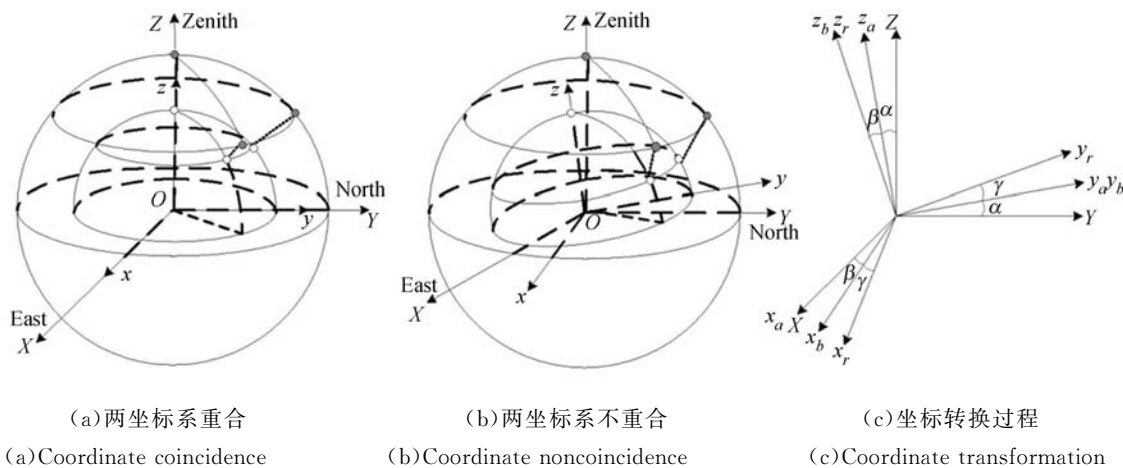


图2 载体坐标系与参考坐标系的坐标转换示意图

Fig. 2 Transformation schematic of body system and reference system coordinates

由于任一观测时刻的大气偏振模式分布规律与太阳空间位置密切相关,作为大气偏振模式中最显著的空间特征信息,太阳空间位置的获取在利用大气偏振模式确定姿态信息方面有着显著的优势。所以作为姿态信息获取的关键步骤,本文重点讨论了不同天气条件、不同太阳空间位置、不同波段以及天空被遮挡等情况,对太阳空间位置信息获取精度的影响。

### 3 仿真实验与分析

在理想 Rayleigh 散射条件下,上述方法可以获得准确无误的太阳空间位置信息,但是,实际大气环境并不满足理想的 Rayleigh 散射条件,大量空气分子发生的多次散射以及大气层中蕴含的气溶胶、尘埃、云雾等均会影响光在大气中的传输过程。因此,实际大气偏振模式与理想的 Rayleigh 散射条件下的大气偏振模式之间会存在差异,这里讨论和分析了在非理想 Rayleigh 散射条件下太阳空间位置信息的获取精度。

仿真实验采用辐射传输模型 libRadtran1.7, 利用 MYSTIC (Monte Carlo code for the physically correct tracing of photons in cloudy atmosphere) 计算方法,选取  $10^5$  个粒子均匀分布在大

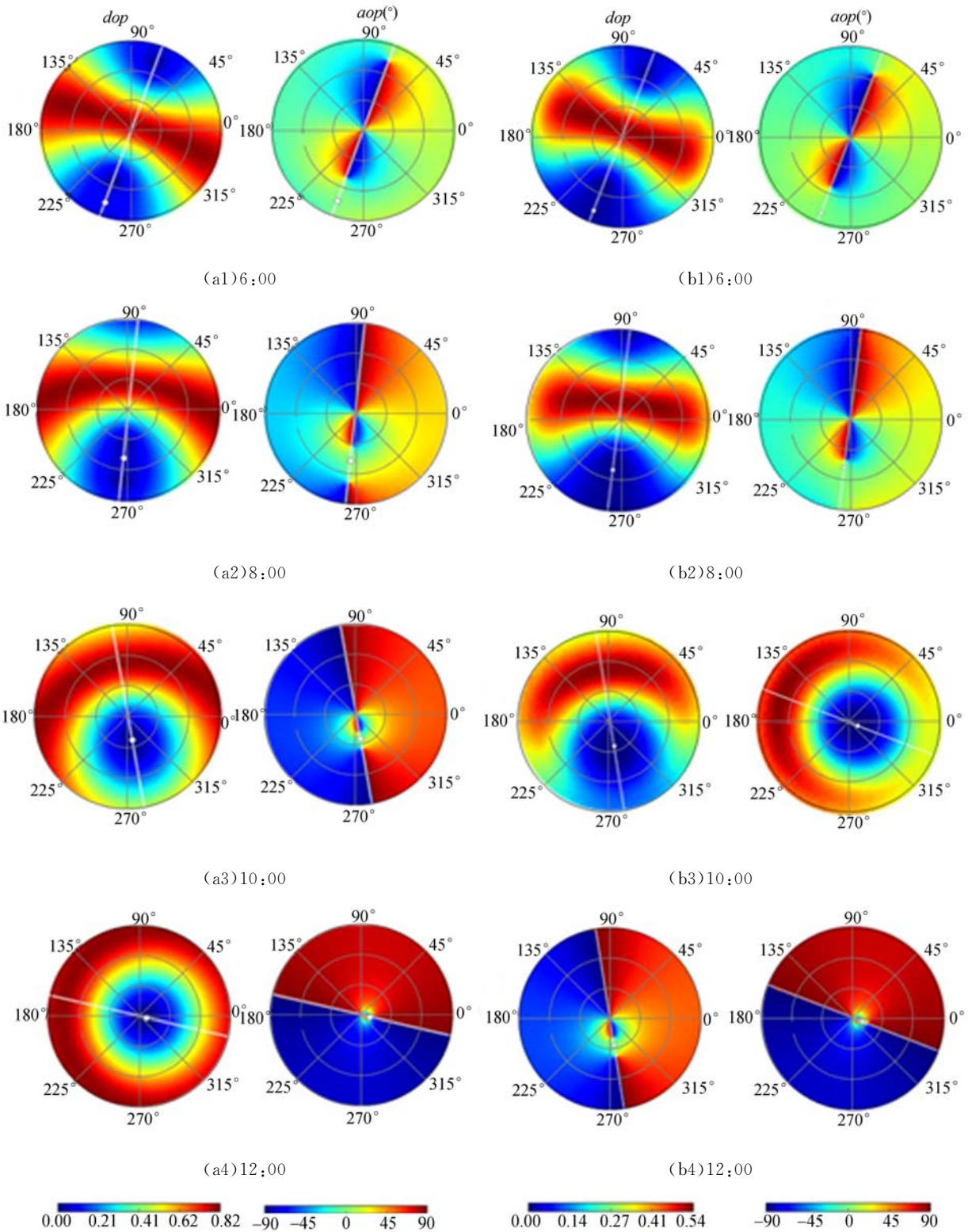
气层中,仿真实验一、二均选择合肥(东经  $117^\circ 14'$ , 北纬  $31^\circ 52'$ ) 作为观测点,分别采样上午 6:00、8:00、10:00 和 12:00 四组大气偏振模式的  $[I, Q, U]$  分布,利用式(13)分别计算出偏振度  $dop$  和偏振化方向  $aop$ ,波段选择 470 nm, 大气偏振模式分布图均采用复球面映射的二维投影方式<sup>[17]</sup>。

$$\begin{cases} dop = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ aop = \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{U}{Q} \right\} \end{cases} \quad (13)$$

(1) 仿真实验一:时间为 2014/6/5,天气晴朗,仿真结果如图 3(a)~3(d)所示;

(2) 仿真实验二:时间为 2014/7/10,大气气溶胶环境定义为 OPAC 数据库中的“continental\_polluted”,仿真结果如图 3(e)~3(h)所示。

仿真实验选取  $50 \times 200$  个被测点(选取原则是天顶角从  $0$  到  $90^\circ$  等间隔的选取 50 个点,方位角从  $0$  到  $360^\circ$  等间隔的选取 200 个点)。根据式(13)计算得到大气偏振模式信息  $dop$  和  $aop$  分布,利用式(1)得到被测点的  $E$ -矢量分布,然后利用式(8)和式(9)计算出太阳的方向向量  $E_s$ ,从而获得该时刻太阳的空间位置信息,即太阳的天顶角  $\theta_s$  和方位角  $\varphi_s$ ,实验结果如表 1 所示。



(a) 实验一

(a) Experiment 1

(b) 实验二

(b) Experiment 2

图 3 仿真实验一、二中的大气偏振模式分布图

Fig. 3 Skylight polarization patterns in simulation experiments 1 and 2

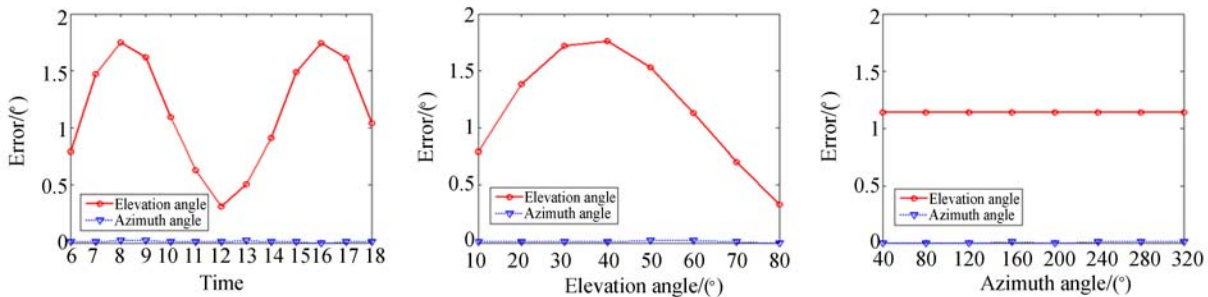
表 1 仿真实验一、二中太阳空间位置信息比较

Tab.1 Comparison of sun's position in simulation experiments 1 and 2

组别	时间	理论太阳位置		计算值		误差	
		方位角/(°)	高度角/(°)	方位角/(°)	高度角/(°)	方位角/(°)	高度角/(°)
实验一	6:00	250	10	250.00	9.21	0.00	0.79
	8:00	264	35	263.99	33.25	0.01	1.75
	10:00	280	60	280.00	58.91	0.00	1.09
	12:00	47	80	347.00	79.69	0.00	0.31
实验二	6:00	249	8	249.00	7.01	0.00	0.99
	8:00	263	33	262.99	30.52	0.01	2.48
	10:00	279	58	278.99	56.46	0.01	1.54
	12:00	339	79	339.00	78.53	0.00	0.47

由表 1 可知,该方法对太阳方位角的计算误差很小,但是对高度角的计算误差却相对较大;并且,相对于晴朗天气下(实验一),当天空中存在气溶胶粒子时(实验二),高度角的误差会增大。为了进一步分析太阳空间位置的计算误差与太阳高度角和方位角之间的变化关系,仿真了不同观测时间、不同太阳高度角和方位角下太阳空间位置的计算误

差,如图 4 所示。图 4(a)为与仿真实验一同等条件下,从早晨 6:00 到晚上 18:00 每隔 1 小时计算太阳空间位置得到的误差分布。图 4(b)为保持太阳方位角不变(取 250°),高度角从 10°到 80°每隔 10°计算太阳空间位置得到的误差分布。图 4(c)为保持太阳高度角不变(取 60°),方位角从 40°到 320°每隔 40°计算太阳空间位置得到的误差分布。



(a) 早晨 6:00 到晚上 18:00 太阳空间位置的计算误差分布 (b) 误差随高度角变化时的误差分布 (c) 误差随方位角变化时的误差分布  
 (a) Error distribution from 6:00 to 18:00 (b) Error variation with elevation angle (c) Error variation with azimuth angle

图 4 太阳空间位置计算的误差分布

Fig.4 Distributions of caculation of error of Sun's space position

由图 4(a)可以看出,一天内太阳空间位置的计算误差随高度角的变化曲线类似于正弦曲线,在早上 8:00 和下午 16:00 时误差达到最大值,而在中午 12:00 时误差最小,而方位角的计算基本不存在误差。由图 4(b)和 4(c)可知,太阳空间位置的计算误差仅与太阳高度角有关,与方位角无关,并且在太阳高度角为 40°时误差达到最大值,随着高度角的增大误差逐渐变小,在高度角为 80°时达到最小值。图 4(a)中 8:00 时的太阳高度角为 35°,12:00 时的太阳高度角为 80°,与图 4(b)的误差曲线变化规律相一致。为了减小太阳高度角的计算误差,本文考虑通过误差补偿等方

法来提高姿态信息的获取精度。

#### 4 实测实验与分析

仿真实验通过选取不同的气溶胶粒子分布,讨论和分析了太阳空间位置获取算法的误差情况;但是,大气偏振模式的特性不仅是由空气分子、气溶胶、云雾等综合作用的结果,也受到地表状况等因素的影响,所以,实际大气偏振模式的分布情况更为复杂。为了研究实际情况下,太阳空间位置获取算法的精度,开展了不同天气、不同波段以及天空被遮挡情况下的实测实验。

实验采用自主搭建的全天域大气偏振模式成像装置,如图 5 所示。相机选用全画幅的 NikonD800,滤光片采用了红色、绿色和蓝色 3 个波段,其波长响应区间分别为 Red=(620±50) nm, Green=(530±30) nm, Blue=(470±30) nm。鱼镜头为 Sigma8mmF/3.5,视场范围理论上可达到 180°,由于采用偏振片置于鱼镜头前的安装方法,实际视场范围约为 170°。相机主轴预设



图 5 全天域大气偏振模式成像装置

Fig. 5 Photo of whole atmospheric polarization pattern imaging devices

实测实验一、二、三均选取日照(东经 119°33', 北纬 35°24')作为观测点,每次实验分别采集 4 幅不同偏振角度下的天空偏振图像  $I_0, I_{45}, I_{90}$  和  $I_{135}$ ,由式(14)计算得到大气偏振模式的  $[I, Q, U]$  分布<sup>[18]</sup>,再利用式(13)计算得到偏振度  $dop$  和偏振化方向  $aop$ 。实测实验选取 950×950 个被测点(采集的图像像素为 3 801×3 801,计算太阳空间位置时每隔 4 点选取 1 个被测点),根据式(1)可得到被测点的  $E$  矢量分布,再利用式(8)和式(9)计算出太阳的方向向量  $E_s$ ,从而获得太阳的空间位置信息,即太阳的天顶角  $\theta_s$  和方位角  $\varphi_s$ 。

$$\begin{cases} I=0.5 \times (I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135}) \\ Q=I_0 - I_{90} \\ U=I_{45} - I_{135} \end{cases}, \quad (14)$$

(1) 实测实验一:时间为 2014/8/17,天气晴朗,天空中有部分云层分布,从下午 17:30 到晚上 18:10 每隔 10 min 采集不同偏振角度下的 4 幅天空偏振图像  $I_0, I_{45}, I_{90}$  和  $I_{135}$ ,波段为全波段。

实验得到的大气偏振模式分布如图 6 所示,可以看出在晴朗天气条件下实际的大气偏振模式分布与仿真的大气偏振模式分布较为相似,偏振度  $dop$  与偏振化方向  $aop$  均关于太阳子午线呈

对称分布,此时偏振度最大可达到 0.8。

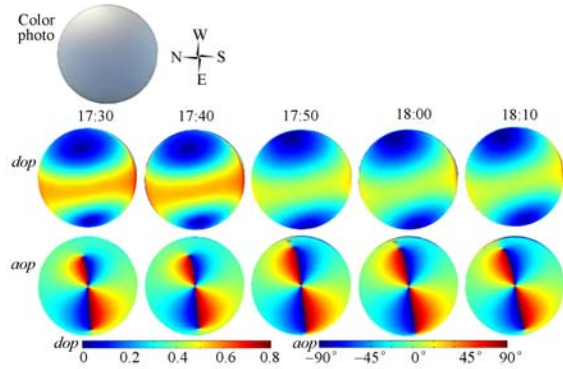


图 6 实测实验一中大气偏振模式分布图

Fig. 6 Skylight polarization patterns of experiment 1 in real skies

(2) 实测实验二:时间为 2014/8/16,下午 16:55,天空中大部分区域均有云层分布,波段包括全波段、红色波段(620 nm)、绿色波段(530 nm)和蓝色波段(470 nm)。

实验得到的大气偏振模式分布如图 7 所示,可以看出天空大部分区域被云层覆盖,只有很小的部分区域可以看到蓝天。云层影响了光在大气层中的传输过程,破坏了大气偏振模式中偏振度的分布规律,最大偏振度只能达到 0.3,有云层覆盖的区域偏振度较小;而偏振化方向  $aop$  分布仍较好地保持了关于太阳子午线 SM-ASM 的对称规律。并且随着观测波长的减小,偏振化方向  $aop$  的空间特征分布逐渐趋于完整,不连续的区域逐渐变小。

(3) 实测实验三:时间为 2014/8/17,天气晴

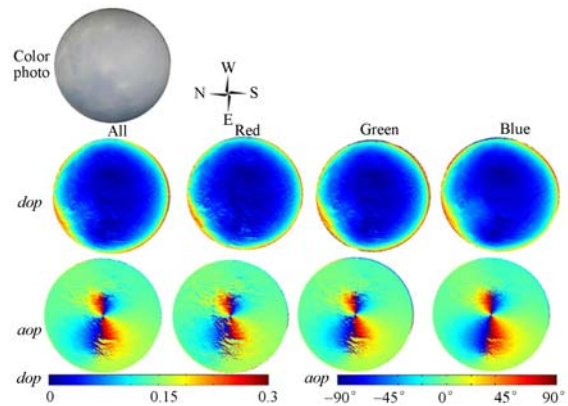


图 7 实测实验二中大气偏振模式分布图

Fig. 7 Skylight polarization patterns of experiment 2 in real skies

朗,从下午 16:35 到 17:15 每隔 10 min 采集不同偏振角度下的 4 幅天空偏振图像  $I_0, I_{45}, I_{90}$  和  $I_{135}$ ,波段为全波段。

天空遮挡情况下的大气偏振模式分布如图 8 所示,在观测时刻太阳刚好被树木遮挡。实测实验一、二和三中太阳空间位置信息的计算误差分

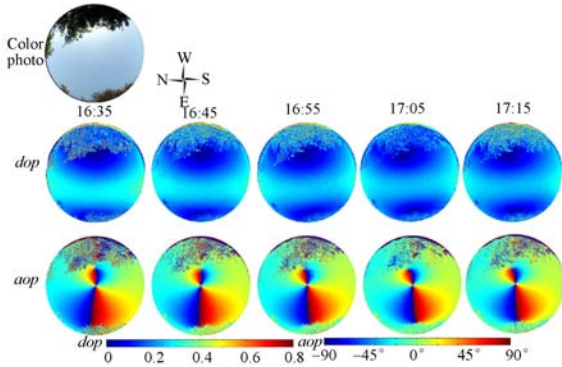


图 8 遮挡情况下的全天域大气偏振模式分布图

Fig. 8 Skylight polarization patterns under heavy canopy

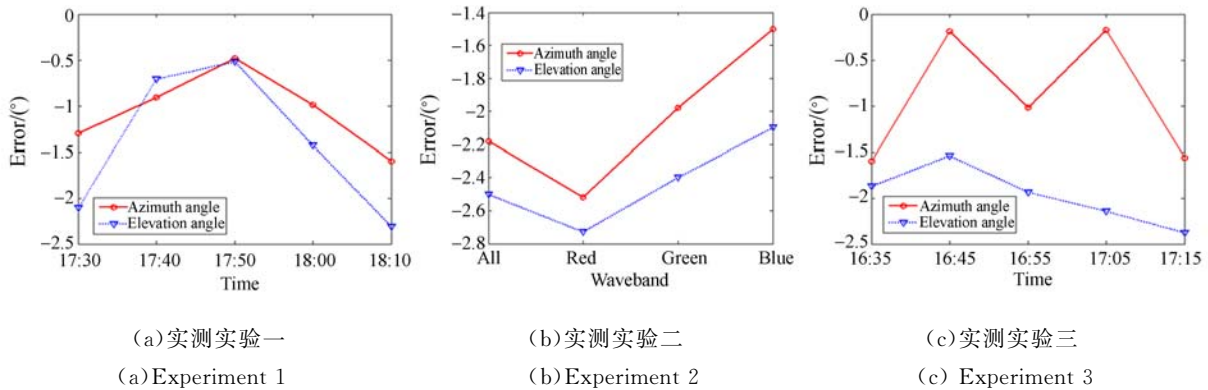


图 9 实测实验中太阳空间位置的计算误差分布

Fig. 9 Distributions of caculation error of Sun's space position in practical tests

### 5 结 论

本文提出了一种利用大气偏振模式获取三维姿态信息的方法,选取太阳作为空间显著特征点,利用大气偏振模式计算出载体在不同状态下太阳的空间位置信息,通过建立姿态变换矩阵,获得载体姿态的三维信息。通过仿真和实测实验,重点讨论和分析了不同天气条件、不同太阳空间位置、不同波段以及天空被部分遮挡情况下太阳空间位置信息的计算误差分布情况。实验结果表明,该方法对太阳方位角的计算精度比高度角的计算精度高,并且通过仿真实验结果可知,太阳空间位置

布如图 9 所示。

由图 9(a)可以看出,由于实际大气环境的复杂性和多变性,相对于仿真实验一中晴朗天气条件下的实验结果,实测实验的误差更大。由图 9(b)可知,方位角和高度角的误差分布均为:红色波段>全波段>绿色波段>蓝色波段,因此在大气中有云层覆盖、气溶胶浓度较大的情况下,采用短波段下的大气偏振模式获取太阳空间位置信息更具优势。所以,在实际应用中,可以结合误差分布随波长的变化规律,在不同条件下有选择地利用特定波长下的偏振模式信息,提高太阳空间位置的获取精度,进而提高载体三维姿态信息的获取精度。由图 9(c)可知,相较于实测实验一中太阳空间位置获取的计算误差分布,实验三中的计算误差并没有增大,所以当观测天空中存在部分遮挡时利用全天域大气偏振模式仍可有效地获取太阳的空间位置信息。

的计算误差随太阳高度角的变化呈现一定的规律性,类似于正弦曲线,且与方位角变化无关。相对于晴朗天气下,当天空中有气溶胶粒子分布时,方位角误差由  $0.90^\circ$  增大到  $2.04^\circ$ ,高度角误差由  $1.41^\circ$  增大到  $2.43^\circ$ ;并且,当天空中有气溶胶粒子分布时,蓝色波段下的计算误差最小,其中方位角误差为  $1.50^\circ$ ,高度角误差为  $2.10^\circ$ 。所以,由于气溶胶对短波的穿透性更好,采用短波段下的偏振模式分布信息更具优势,误差相对较小。当观测视场中有树木等遮挡时,方位角和高度角的平均误差分别为  $0.91^\circ$  和  $1.97^\circ$ ,相对于晴朗天气下无遮挡时,误差没有增大,所以当局部天空区域被遮挡时,利用本文方法仍可有效地获取三维姿态信息。

## 参考文献:

- [1] RAMON H, SUSANNE A, WEHNER R, *et al.*. Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization? On the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation under foggy and cloudy skies [J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 2007, 463: 1081-1095.
- [2] GABOR H, ANDRAS BA, ISTVAN P, *et al.*. On the trail of Vikings with polarized skylight: Experimental study of the atmospheric optical prerequisites allowing polarimetric navigation by Viking seafarers [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2011, 336: 772-782.
- [3] ROSSEL S, WEHNER R. How bees analyse the polarization patterns in the sky [J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 1984, 154: 607-615.
- [4] HORVAT G, WEHNER R. Skylight polarization as perceived by desert ants and measured by video polarimetry [J]. *J. Comp. Physiol A*, 1999, 184:1-7.
- [5] JUN G, WANG L, BO M, *et al.*. Information acquisition in desert ant navigation [J]. *International Journal of Information Acquisition*, 2006, 3(1): 33-43.
- [6] RAMON H, SUSANNE A, GABOR H. Polarization patterns of thick clouds: overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies[J]. *Optical Society of America*, 2007,24(8):2347-2356.
- [7] 高隼,范之国. 仿生偏振光导航方法[M]. 北京: 科学出版社,2014.  
GAO J, FAN ZH G. *Method of Bionic Polarized Skylight Navigation* [M]. Beijing: Science Press, 2014. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] BENCE S, GABOR H. How well does the Rayleigh model describe the E-vector distribution of skylight in clear and cloudy conditions? A full-sky polarimetric study [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2004, 21: 1669-1676.
- [10] JOZSEF G, GABOR H, VIKTOR B M, *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]. *The Royal Society*, 2001(457): 1385-1399.
- [11] 田柳,高隼,范之国,等. 基于大气偏振模式对称性检测的航向角获取方法[J]. 信号处理, 2011, 27(11): 1702-1705.  
TIAN L, GAO J, FAN ZH G, *et al.*. The method of the navigation direction angle acquisition based on the symmetry detection of the atmosphere polarization mode [J]. *Signal Processing*, 2011, 27(11): 1701-1705. (in Chinese)
- [12] 王子谦,范之国,金海红,等. 基于大气偏振模式全局特征的中性点识别方法[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0701001.  
WANG Z Q, FAN ZH G, JIN H H, *et al.*. The neutral points recognition based on the atmospheric polarization pattern's global characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0701001. (in Chinese)
- [13] 何均均. 天顶区域大气偏振特性的实验分析研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2012.  
HE J J. *Experimental Analysis of Zenith Region Skylight Polarization Pattern* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [14] 王波. 基于仿生偏振光感知阵列的航向姿态获取方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.  
WANG B. *Research on the Acquisition Method of Course and Attitude Information Using the Bionic Polarized Skylight Sensor Array* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [15] STURZL W, CAREY N. A fisheye camera system for polarisation detection on UAVs [C]. *Computer Vision-ECCV 2012, Workshops and Demonstrations, Springer Berlin Heidelberg*, 2012: 431-440.
- [16] POMOZI I, GAL J, HORVATH G, *et al.*. Fine structure of the celestial polarization pattern and its temporal change during the total solar eclipse of 11 August 1999[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 181-201.
- [17] 吴良海,高隼,范之国,等. 基于复球面映射的大气偏振模式表征与分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 870-876.  
WU L H, GAO J, FAN ZH G, *et al.*. Representation and analysis of skylight polarization pattern based on complex sphere mapping on 2D plane[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(4): 870-876. (in Chinese)
- [18] KATMAN S B, DIAH S Z M, GEBESHUBER I C. Bio-inspired polarized skylight-based navigation sensors: a review[J]. *Sensors*, 2012, 12(11): 14232-14261.

## 作者简介:



范之国(1979—),男,安徽霍山人,副教授,硕士生导师,主要从事智能信息处理方面的研究。E-mail: fzghfut@163.com



陈曼丽(1990—),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事智能信息处理方面的研究。E-mail: manli\_chen@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)