

东海海域的天空光偏振及子午线研究

崔岩^{1**}, 谢楠¹, 张西光¹, 周鑫昌¹, 褚金奎¹, 关乐^{2*}

¹大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;

²大连理工大学辽宁省微纳技术与系统重点实验室, 辽宁 大连 116024

摘要 基于瑞利散射理论,对天空光偏振分布模式进行了仿真。利用图像式全天空偏振模式测试系统对东海海域的天空光偏振分布模式进行了测试。提出了一种利用偏振方位角信息判断子午线的方法。研究表明,当太阳高度角大于 85° 或低于 25° 时,可利用偏振方位角定位子午线方向。该子午线方向与理论仿真结果一致。

关键词 散射; 大气光学; 偏振模式; 海上测试; 子午线; 太阳高度角

中图分类号 P427.1+2; P407.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.102901

Sky Light Polarization and Meridian in East China Sea

Cui Yan^{1**}, Xie Nan¹, Zhang Xiguang¹, Zhou Xinchang¹, Chu Jinkui¹, Guan Le^{2*}

¹Key Laboratory for Precision & Non-Traditional Machining of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

²Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract Based on the Rayleigh scattering theory, the distribution pattern of the sky light polarization is simulated. The distribution pattern of the sky light polarization in the East China Sea is tested by the photographic full-sky polarization pattern testing system. A method for determining the meridian by the polarization azimuthal angle information is proposed. The research results show that, when the solar altitude angle is larger than 85° or less than 25° , the meridian direction can be positioned by means of the polarization azimuthal angle. The meridian direction is consistent with the theoretical simulation result.

Key words scattering; atmospheric optics; polarization mode; sea test; meridian; solar altitude angle

OCIS codes 290.5870; 010.1310; 010.1290

1 引言

国内外学者对不同地域、不同时间以及不同天气条件下的天空偏振模式进行了研究。天空偏振信息的研究可分为:1)通过测试获取不同天气条件下、不同区域的天空偏振信息;2)从天空偏振模式提取子午线。

当天空中的粒子较小时,天空光存在稳定的偏振模式,可用瑞利散射理论进行解释^[1]。Horváth等^[2]研究了日光的全天空偏振模式图,发现有云和无云的晴朗天空的偏振方位角分布模式均符合瑞利

散射理论,且偏振方位角的分布稳定,受天气因素的影响较小。Lee等^[3]搭建了可用于系统误差测量的成像式偏振计,可全面评定获取的天空偏振模式,并通过天空偏振模式图分析了气溶胶等因素对偏振光谱的影响。Aycock等^[4]对阴霾、晴朗及有云天气的偏振模式进行了测试,并将获取的天空偏振方位角信息与瑞利散射理论的偏振方位角进行了对比,发现多云天气的偏振方向和太阳方向有一定偏离,晴朗天气条件下的偏振方向与太阳方向吻合。

利用天空偏振模式获取子午线信息是仿生导航应用的基础。晏磊等^[5]根据天空光偏振分布模式,

收稿日期: 2018-04-16; 修回日期: 2018-04-16; 录用日期: 2018-04-18

基金项目: 国家自然科学基金(51675076)

* E-mail: haishengtian@mail.dlut.edu.cn; ** E-mail: yanc@dlut.edu.cn

确定了为导航系统提供航向的参考方向是太阳子午线,并确定以地平坐标系作为导航坐标系。田柳等^[6]研究了一种基于偏振模式对称性检测来获取导航方向角的方法,并通过对称性检测获得了大气偏振模式的对称轴位置,实现了导航。卢皓等^[7]利用成像式偏振导航传感器获取图像并提出了一种太阳方位角的解算算法。任建斌等^[8]利用大气偏振模式确定了太阳子午线和太阳空间位置,得到了较好的实际测试处理结果。李大林等^[9]提出了航向补偿方法并提高了航向解算精度,分析了太阳高度角对子午线位置的影响,进行了航向的误差分析。刘琦等^[10-12]针对水云天及日光月光的偏振模式进行了大量研究。

国内外针对海洋天空偏振模式的测试研究较少。Hegedüs 等^[13]在北冰洋附近针对雾天及多云天气进行了测试研究,并将结果与晴朗天气下的天空偏振模式进行了对比分析。Barta 等^[14]发现通过测量天空光偏振模式可获取海洋上空的云层覆盖面积。崔岩等^[15]分析了黄海海域上空日光和月光的偏振特性分布规律以及云层对偏振模式的影响。朱志飞等^[16]对太阳空间位置和天空偏振信息的关系进行了详细的研究。

综上所述,目前对于海洋天空光偏振模式的研究仅局限于黄海以及北冰洋等少数较高纬度的海域,对低纬度海域偏振模式的测试和海上获取子午线方法的研究较少。本文基于瑞利散射理论,对东海海域的天空分布模式进行了理论仿真,并利用图像式偏振模式测试系统对大连海事大学“育鲲”轮航线上的天空偏振分布模式进行了测试,对比分析得到了东海海域的偏振模式分布规律,确定了子午线方向。

2 天空光偏振模式理论

2.1 天空光偏振模式理论模型

基于瑞利散射理论,用地平坐标系图表示所用的参量,如图 1 所示。其中 O 点为观测点位置, N、E、S、W 依次表示正北、正东、正南和正西,观测者所处的地平面为 XOY 平面,天体(太阳或月亮)用 M 表示,被观测点用 V 表示,观测方向用 OV 表示,天顶用 Z 表示。天体 M 和 O 点的连线与地平面之间的夹角为天体的高度角,从水平面向下为负,向上为正。天体 M 所在的子午圈与过正南方向的子午圈之间的夹角为天体的方位角,从正南向东为负,向西为正。天体的高度角用 θ_M 表示,度量天体和被观测点位置的参考轴设置为 X 轴,天体的方位

角用 ϕ_M 表示,观测点的高度角用 θ 表示,观测点的方位角用 ϕ 表示。

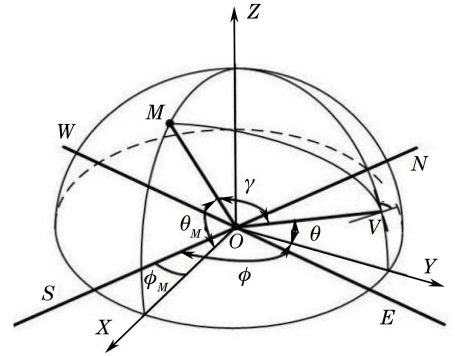


图 1 地平坐标系

Fig. 1 Horizontal coordinate system

散射平面用观测方位 OV 和天体方位 OM 构成的球面三角形 MOV 表示,散射角用 OV 和 OM 的夹角 γ 表示,偏振方位角为被观测点 V 的电矢量的振动方向与过被观测点 V 的子午线的夹角, MOV 平面垂直于电矢量的振动方向,偏振方位角用 χ 表示,故 $\chi = 90^\circ - \angle ZVM$ 。

在球面三角形 MOV 中,由三角形余弦定理可知

$$\cos \gamma = \sin \theta \sin \theta_M + \cos \theta \cos \theta_M \cos(\phi - \phi_M). \quad (1)$$

偏振度为

$$P = P_{\max} \left(\frac{1 - \cos^2 \gamma}{1 + \cos^2 \gamma} \right), \quad (2)$$

式中 P_{\max} 为最大偏振度。

根据瑞利散射定律,被观测点 $V(r, \theta, \phi)$ 处的电矢量为

$$\mathbf{e} = \mathbf{v} \cos \chi + \mathbf{h} \sin \chi, \quad (3)$$

式中向量 $\mathbf{h} = (-\sin \phi, \cos \phi, 0)$, $\mathbf{v} = (-\cos \theta \cos \phi, -\cos \theta \sin \phi, \sin \theta)$, r, θ, ϕ 为天体的三个坐标分量。当天体 M 的三维坐标为 (r, θ_M, ϕ_M) 时,被观测点 $V(r, \theta, \phi)$ 处的偏振方位角 χ 为

$$\tan \chi = \frac{\sin \theta \cos \theta_M - \cos \theta \cos(\phi - \phi_M) \sin \theta_M}{\sin(\phi - \phi_M) \sin \theta_M}. \quad (4)$$

根据(2)、(4)式可以解得天空任意一点处的偏振度 P 和偏振方位角 χ 。

2.2 天空光偏振模式测试原理

在实际测试中,利用 Stokes 矢量求解。将 Stokes 矢量 $\mathbf{S} = (S_0, S_1, S_2, S_3)^T$ 写为 $\mathbf{S} = (I, Q, U, V)^T$,其中 T 代表转置, I 为总光强, U, Q 为两个互相垂直的线偏振分量, V 为圆偏振分量,圆偏振光分量相对较少,因此将 V 分量忽略,即 $V=0$ 。 $I, Q,$

U 的关系为

$$\begin{cases} I'(0^\circ) = \frac{1}{2}(I + Q) \\ I'(45^\circ) = \frac{1}{2}(I + U), \\ I'(90^\circ) = \frac{1}{2}(I - Q) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $I'(0^\circ)$ 、 $I'(45^\circ)$ 和 $I'(90^\circ)$ 分别为三个偏振分量的光强测试结果,即参考轴与偏振片的主透光轴的夹角为 0° 、 45° 和 90° 时,测试获取的光强值。整理(5)式可得

$$\begin{cases} I = I'(0^\circ) + I'(90^\circ) \\ Q = I'(0^\circ) - I'(90^\circ) \\ U = 2I'(45^\circ) - I'(0^\circ) - I'(90^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

天空光的偏振度 P 和偏振方位角 χ 为

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, 0 \leq P \leq 1, \quad (7)$$

$$\chi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right), -90 \leq \chi \leq 90. \quad (8)$$

根据(7)、(8)式解算得到测试时刻天空分布模式的偏振方位角 χ 和偏振度 P 。

3 东海海域天空光偏振分布模式

3.1 东海海域偏振模式仿真

根据(2)、(4)式,在对东海海域航线上进行多日测试的基础上,选取 2017 年 7 月 7 日的东海海域 ($24^\circ 58' N, 119^\circ 42' E$) 的日光理论偏振分布模式进行仿真,天气状况为晴朗天气,仿真时间为协调世界时 +8(UTC+8)9:03~18:04,对应的二维、三维理论仿真图如图 2 所示,其中黑色直线代表太阳子午线,黑色圆点代表中性点,天空偏振模式对称轴即为太阳子午线位置^[6]。测试地理坐标和太阳的位置信息见表 1。

表 1 测量地理坐标和太阳位置

Table 1 Measurement of sun location and geographical coordinate

Time (UTC+8)	Latitude	Longitude	Altitude /($^\circ$)	Azimuth /($^\circ$)
9:03	$24^\circ 58' N$	$119^\circ 42' E$	48.27	-83.23
10:07	$25^\circ 12' N$	$119^\circ 53' E$	63.05	-89.14
11:03	$25^\circ 26' N$	$120^\circ 03' E$	75.51	-81.50
12:03	$25^\circ 39' N$	$120^\circ 14' E$	87.00	-0.47
13:03	$25^\circ 54' N$	$120^\circ 24' E$	75.49	79.58
14:12	$26^\circ 11' N$	$120^\circ 37' E$	60.10	89.41
15:07	$26^\circ 23' N$	$120^\circ 46' E$	47.44	84.38
16:05	$26^\circ 38' N$	$120^\circ 56' E$	34.46	79.50
17:04	$26^\circ 53' N$	$121^\circ 05' E$	21.50	74.48
18:04	$27^\circ 09' N$	$121^\circ 15' E$	9.04	69.07

实际测试只能获取二维天空偏振模式图,为了更详细地描述天空偏振信息的变化,在二维的基础上增加了三维仿真。东海海域天空偏振模式的偏振度和偏振方位角随时间的变化如图 2 所示,图中坐标是球面坐标,坐标轴分别为 x 、 y 、 z 。由图 2 可知,偏振度和偏振方位角均关于子午线对称,太阳方位角决定子午线方向。偏振度以中性点为中心呈环状分布,中性点随着太阳高度角的变化而移动,9:03~11:03 中性点随着太阳高度角的增大向天顶点移动,13:03~18:04 中性点随着太阳高度角的减小由天顶点向地平面靠近,对称性一直明显存在,可通过偏振度分布的对称轴获取子午线。12:03 的太阳高度角接近 90° 时,中性点几乎与天顶点重合,如图 2(a) 所示,此时偏振度分布图的对称轴不唯一,很难判断子午线位置。如图 2(c) 所示,偏振方位角的分布随着太阳高度角的增大逐渐向中间收缩,偏

振方位角的反对称性越来越明显,当太阳高度角接近 90° 时,可通过偏振方位角的对称轴获取子午线。

3.2 东海海域天空偏振模式测试及分析

搭乘大连海事大学远洋教学实习船“育鲲”轮,使用图像式全天空偏振模式测试系统对东海海域的天空偏振模式进行了测试。图像式全天空偏振模式测试系统如图 3 所示,由鱼镜头 (AF DX Fisheye 10.5 mm f/2.8G ED, 尼康公司, 日本)、单反相机 (Nikon D300s, 尼康公司, 日本)、三角架 (Benro A-550, 百诺公司, 中国) 及可旋转线性偏振片 (Edmund Polarizing Laminated Film 86191, 爱特蒙特光学公司, 美国) 构成,由于鱼镜头上方有偏振片,实际测试视角范围接近 130° 。本套系统经过标定^[12],在 400~750 nm 波段之间偏振片获取的偏振度在 90% 左右,经过鱼镜头后偏振特性的变化可忽略不计。在每个测试时刻内连续旋转偏振片,

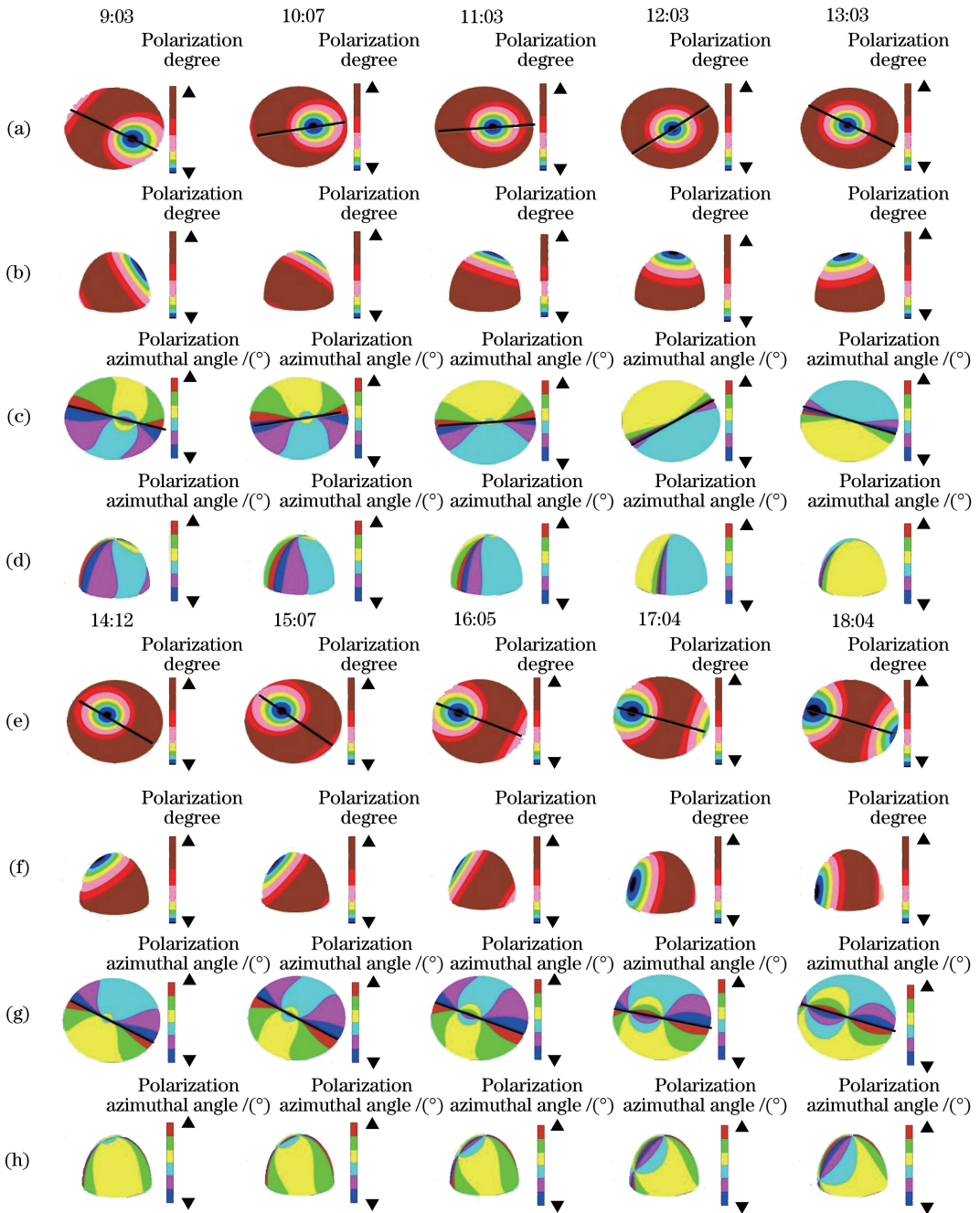


图2 东海海域天空偏振模式的偏振度和偏振方位角随时间的变化。(a)(e)二维,偏振度;

(b)(f)三维,偏振度;(c)(g)二维,偏振方位角;(d)(h)三维,偏振方位角

Fig. 2 Polarization degree and polarization azimuthal angle of sky polarization pattern in East China Sea versus time.

(a)(e) Two-dimensional, polarization degree; (b)(f) three-dimensional, polarization degree; (c)(g) two-dimensional, polarization azimuthal angle; (d)(h) three-dimensional, polarization azimuthal angle

获得偏振片在 0° 、 45° 和 90° 位置的图片。图片经过 Matlab 软件处理,得到对应测试地点和时刻的东海海域天空偏振模式测试图,如图 4 所示。

由图 4 可知,测试得到的偏振度分布图与理论得到的基本相似,以中性点为中心呈环状分布,并关于太阳子午线对称分布。随着太阳高度角的增大,中性点向天顶点移动,东海海域所处的纬度较低,正

午太阳高度角较大,尤其是 12:03 时的太阳高度角接近 90° ,偏振度分布中相邻偏振度交叠,中性点位置和天顶点位置十分接近,不易获取其唯一对称线位置。18:04 时天空已由日光偏振模式进入曙暮光偏振模式,由于云层遮挡了太阳光,偏振度分布图的环状分布不规则,不具有对称性。

分析图 4 中的天空光偏振方位角分布图可知,

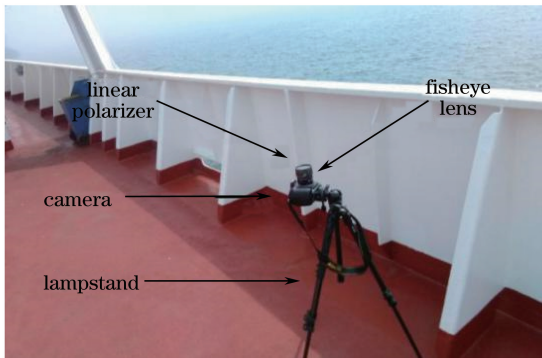


图3 图像式全天空偏振模式测试系统

Fig. 3 Photographic full-sky polarization pattern testing system
偏振方位角关于太阳子午线对称,与理论结果基本一致。9:03~11:03的太阳高度角为 $25^\circ\sim 85^\circ$,天

空光偏振方位角信息模糊,无法判断子午线位置; 12:03时太阳高度角为 $85^\circ\sim 90^\circ$,正午太阳光强极强,此时天空光偏振模式由太阳光主导,以太阳光瑞利散射为主,虽然偏振度分布不易确定子午线方向,但天空光偏振方位角的分布清晰,获取的子午线位置与理论仿真的一致。16:05~18:04太阳高度角持续减小,天空光偏振模式逐渐由日光偏振模式变为曙暮光偏振模式,偏振方位角的子午线信息逐渐清晰。17:03时天空光偏振方位角和天空光偏振度的分布均稳定清晰,此时偏振度的对称线与偏振方位角的对称线方向统一。18:04时天空光虽然有云层干扰,天空光偏振方位角分布仍较清晰,能够获取子午线位置。

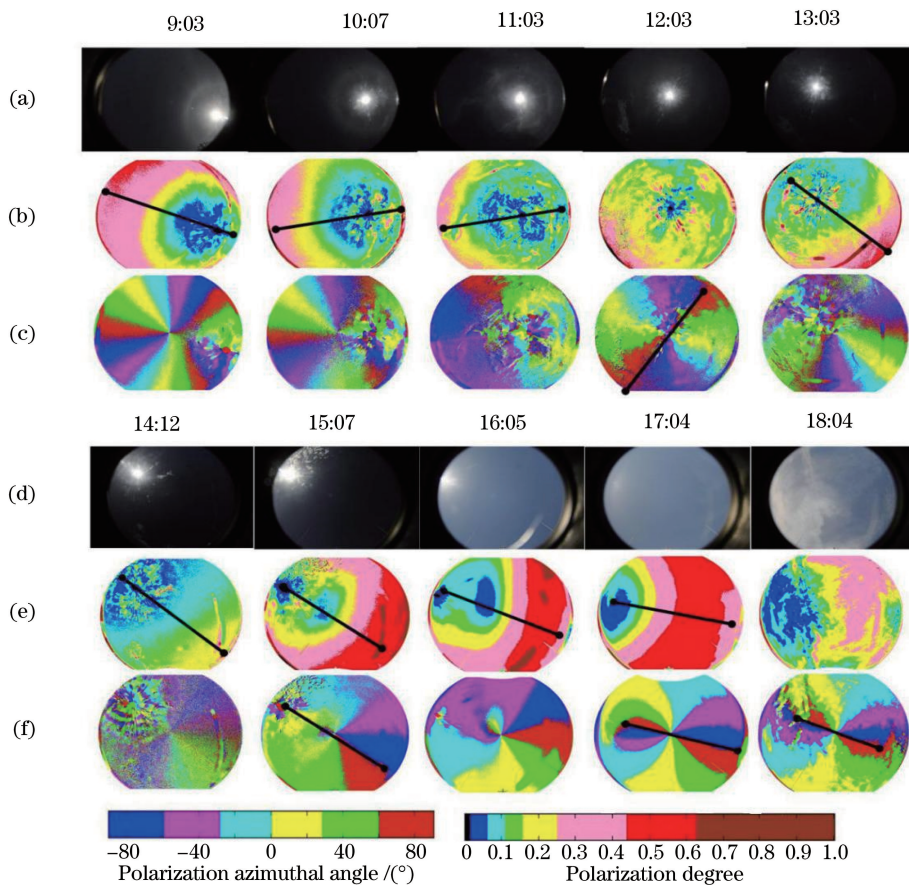


图4 东海海域的实际测试天空光偏振分布模式。(a)(d)测试原图;(b)(e)偏振度;(c)(f)偏振方位角

Fig. 4 Measured sky light polarization distribution pattern in East China Sea. (a)(d) Original images; (b)(e) polarization degree; (c)(f) polarization azimuthal angle

4 结 论

基于瑞利散射理论,对东海海域的天空光偏振模式进行了仿真,并对其天空光偏振模式进行了测试分析,研究结果表明,东海海域的偏振模式符合瑞利散射理论,均关于子午线对称分布。太阳高度角

为 $25^\circ\sim 85^\circ$ 时,利用偏振度分布的对称轴获取子午线位置,解决了难以利用偏振方位角获取子午线的问题;太阳高度角为 $85^\circ\sim 90^\circ$ 时,海面上空偏振方位角分布的对称性稳定,可用于确定子午线位置,解决了正午天空偏振度分布的对称轴不唯一时利用偏振度确定子午线失效的问题;随着太阳高度角降至

25°以下,天空偏振模式由日光偏振模式变为曙暮光模式,即使在有云层干扰时,仍可通过偏振方位角分布确定子午线方向。研究结论为新型偏振导航测试设备的应用提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Strutt J W. On the light from the sky, its polarization and colour[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1871, 41(271): 107-120.
- [2] Horváth G, Wehner R. Skylight polarization as perceived by desert ants and measured by video polarimetry[J]. Journal of Comparative Physiology A: Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, 1999, 184(1): 1-7.
- [3] Lee R L, Samudio O R. Spectral polarization of clear and hazy coastal skies [J]. Applied Optics, 2012, 51(31): 7499-7508.
- [4] Aycock T M, Lompadó A, Wheeler B M. Using atmospheric polarization patterns for azimuth sensing [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9085: 90850B.
- [5] 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, 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.
- [6] Tian L, Gao J, Fan Z 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.
田柳, 高隽, 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): 1701-1705.
- [7] Lu H, Zhao K C, You Z, *et al.* Design and verification of an orientation algorithm based on polarization imaging[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2014, 54(11): 1492-1496.
卢皓, 赵开春, 尤政, 等. 基于偏振成像的方位角度解算算法的设计与验证[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(11): 1492-1496.
- [8] Ren J B, Liu J, Tang J, *et al.* Determination of the spatial position of the sun and solar meridian using atmospheric polarization mode [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(7): 0701002.
任建斌, 刘俊, 唐军, 等. 利用大气偏振模式确定太阳和太阳子午线空间位置法 [J]. 光子学报, 2015, 44(7): 0701002.
- [9] Li D L, Tang J, Liu L S. Analysis of the influence of solar altitude angle on the course error of atmospheric polarization mode[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(9): 15-20.
李大林, 唐军, 刘丽双. 太阳高度角对大气偏振模式航向解算误差影响分析 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(9): 15-20.
- [10] 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.
- [11] Cui Y, Gao Q S, Chu J K, *et al.* Influence of sunlight and moonlight on polarization patterns during twilight [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(1): 34-39.
崔岩, 高启升, 褚金奎, 等. 太阳光与月光对曙暮光偏振模式的影响 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 34-39.
- [12] Cui Y, Chen X L, Chu J K, *et al.* Study on polarization pattern of full moonlight in clear sky[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1012002.
崔岩, 陈小龙, 褚金奎, 等. 晴朗天气下满月偏振模式的研究 [J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1012002.
- [13] Hegedüs R, Åkesson S, 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: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 463(2080): 1081-1095.
- [14] Barta A, Horváth G, Horváth Á, *et al.* Testing a polarimetric cloud imager aboard research vessel Polarstern: Comparison of color-based and polarimetric cloud detection algorithms [J]. Applied Optics, 2015, 54(5): 1065-1077.
- [15] Cui Y, Zhao J Y, Guan L, *et al.* Simulation and measurement of skylight polarization distribution in Yellow Sea [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(10): 1001004.
崔岩, 赵金勇, 关乐, 等. 黄海海域天空光偏振分布仿真与测试 [J]. 光学学报, 2017, 37(10): 1001004.
- [16] Zhu Z F, Yang J T, Wang C G, *et al.* Solar

autonomous-positioning method based on Rayleigh atmosphere polarization pattern and its implementation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(2): 022901.

朱志飞, 杨江涛, 王晨光, 等. 基于瑞利大气偏振模式的太阳自主定位方法及其实现[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 022901.