

黄海海域天空光偏振分布仿真与测试

崔 岩¹, 赵金勇¹, 关 乐^{2*}, 褚金奎¹, 张西光¹, 刘 慧³

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;

³大连海事大学环境科学与工程学院, 辽宁 大连 116026

摘要 研究了黄海海域的天空光偏振分布模式, 分析了海洋上空日光和月光的偏振特性分布规律以及云层对其产生的影响。基于瑞利散射理论对日光和月光的偏振分布模式进行仿真, 利用图像式全天空偏振模式测试系统对黄海海域的天空偏振模式进行测试, 分别将日光和月光的偏振测试结果与对应的理论仿真结果进行对比, 并重点分析子午线方向和中性点的异同。结果表明: 测试得到的日光和月光的子午线方向与对应的理论模式基本一致; 测试得到日光的偏振模式中中性点与理论仿真结果基本相同, 但是测试得到月光的偏振模式中中性点与理论仿真结果明显不同, 在民用暮光阶段, 天空光的偏振模式会受到月光和日光的双重影响。此外, 云层会影响偏振方位角和偏振度的观测, 致使测试仪器目前无法识别部分区域的偏振分布结果。

关键词 大气光学; 偏振分布模式; 中性点; 子午线; 月光

中图分类号 P427.1; P407 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1001004

Simulation and Measurement of Skylight Polarization Distribution in Yellow Sea

Cui Yan¹, Zhao Jinyong¹, Guan Le², Chu Jinkui¹, Zhang Xiguang¹, Liu hui³

¹Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining, 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;

³College of Environmental Sciences and Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China

Abstract The skylight polarization distribution pattern in Yellow Sea is studied. The distribution properties of polarization pattern of the sunlight and the moonlight above the sea are analyzed, and the effects of clouds are also investigated. The polarization distribution patterns of the sunlight and the moonlight are simulated based on the Rayleigh scattering theory, and then the polarization patterns of the sunlight and the moonlight in Yellow Sea are measured with an image full-sky polarization pattern measurement system. The polarization measured results of the sunlight and the moonlight are compared with the simulated results. The differences and similarities of neutral points and the direction of the meridian in the polarization pattern are analyzed emphatically. The results reveal that the measured directions of the meridian of sunlight and moonlight are mostly in accord with the theoretical results. The measured neutral points of sunlight have the same rules as the theoretical patterns, but the measured neutral points of moonlight are apparently different from the theoretical results. In the civil evening twilight, the skylight polarization pattern is affected by both the moonlight and the sunlight. Owing to the influence of the cloud on the polarization direction angle and the polarization degree, the measurement instrument cannot identify the part of the polarization pattern at present.

Key words atmospheric optics; polarization distribution pattern; neutral points; meridian; moonlight

OCIS codes 010.1310; 290.5870; 010.1290

收稿日期: 2017-04-17; 收到修改稿日期: 2017-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(51675076)

作者简介: 崔 岩(1967—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事传感器和精密测量技术等方面的研究。E-mail: yanc@dlut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: haishengtian@mail.dlut.edu.cn

1 引 言

光在大气中传播时,会受到大气物质的散射、吸收和辐射,呈现部分偏振特性^[1]。有生物学家发现一些昆虫具有感知偏振光的能力,并对其机理进行了深入研究^[2-3],为研究仿生偏振导航技术提供了灵感。关于偏振导航的研究主要集中于两方面:一方面是开发能够探测导航信息的仿生偏振光传感器,并在不同载体上对其性能进行测试^[4-5];另一方面是对包含偏振导航信息的天空光偏振模式进行建模与测试分析^[6-7]。

在晴朗天气下,瑞利散射理论能很好地解释天空光偏振模式的产生机理^[8],研究者们对陆地上空的天空光偏振模式进行了大量研究。Pomozi 等^[6,9]用摄像式和图像式全天空偏振光测定方法研究日光偏振模式,测试发现偏振方位角模式不容易受到大气状况的干扰,并且有云和晴朗天气的偏振方位角模式都符合单次瑞利散射模型;Kyba 等^[10]发现天空光的偏振度随着月亮的升起而减小,之后又随着月亮升高而增大;晏磊等^[7]建立了一种天空偏振光的理论和实验模型,确定了太阳子午线,并将其用于提供导航信息;Ma 等^[11]对晴朗和有云天气天空光的偏振方位角进行评估,并分析了偏振度和方位角偏差之间的关系;Wu 等^[12]搭建了图像式偏振测试系统,并对日落后城市高浓度气溶胶区域的天空光偏振模式进行测试分析;张楠等^[13]设计了一种偏振成像系统,并通过视场校正使由二维偏振模式转化成的空间偏振模式与单次瑞利散射理论模型相一致;闫皓等^[14]根据偏振度分布规律,并使用 K-means 聚类算法处理偏振度数据,从而得到太阳的空间位置,并分析了仿真和测试结果中的太阳位置误差;刘琦等^[15-17]对太阳光、暮光和满月月光的偏振模式进行了初步研究。但是,目前关于海洋天空光偏振模式的研究相对较少。Hegedüs 等^[18]将北冰洋多云和雾天的天空光偏振模式与晴朗天气的天空光偏振模式进行对比研究;Barta 等^[19]通过测量天空偏振光,获取海洋上空的云层覆盖面积。

综上所述,目前对于海洋天空光偏振模式的研究只局限于日光偏振模式,缺乏对同一天内海洋日光和月光偏振模式的仿真和测试分析。因此,在白天和夜晚开展海洋天空光偏振模式的研究,能够为探索仿生偏振导航在海洋上的昼夜应用提供基础。在此对日本横滨到大连航线所在的黄海海域上空的日光和月光偏振模式开展了仿真与测试研究,首先用单次瑞利散射模型^[20]进行了理论仿真,其次搭乘大连海事大学“育鲲”轮,并用图像式全天空偏振模式测试系统沿航线进行了测试分析。通过对比仿真和测试结果,重点分析了太阳子午线和中性点的异同,对海洋上日光和月光偏振模式的变化规律进行了初步研究。

2 黄海海域天空光偏振模式仿真

2.1 天空偏振光模式理论模型

为了清晰表征天空光偏振模式理论模型,基于瑞利散射理论,将仿真涉及到的参量用地平坐标系来描述,地平坐标系示意图如图 1 所示。观测点位置为 O 点, N 、 E 、 S 、 W 依次代表正北、正东、正南和正西方向, XOY 平面代表观测者所处的地平面, M 为天体(太阳或月亮), OV 为观测方向, V 为被观测点, T 为天顶。 M 和 V 都在半径为 r 的半球面上。天体的高度角定义为 M 和 O 点间的连线与地平面之间的夹角,以水平

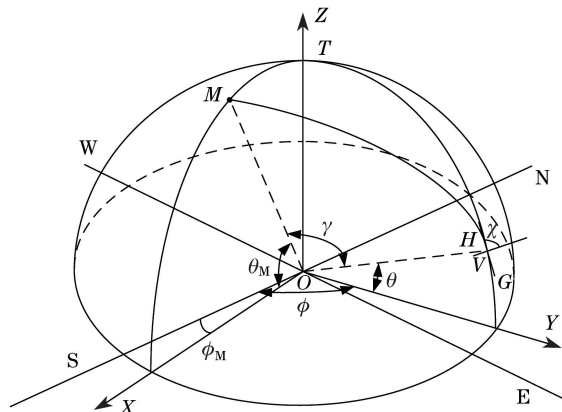


图 1 地平坐标系示意图

Fig. 1 Schematic of horizontal coordinate system

面向上为正、向下为负,天体的方位角定义为 M 所在的午圈与过正南方向午圈之间的夹角,从正南向西为正、向东为负。 θ_M 为天体的高度角, X 轴为度量天体和被观测点位置的参考轴, ϕ_M 为天体的方位角, θ 为被观测点的高度角, ϕ 为被观测点的方位角, H 表示偏振方位角。

天体方位 OM 与观测方位 OV 构成的球面三角形 MOV 为散射平面, OM 与 OV 的夹角 γ 为散射角, 偏振方位角为过 V 的子午线与过 V 的 e 矢量振动方向的夹角, 并且 e 矢量的振动方向垂直于 MOV 平面, χ 为偏振方位角, $\chi = 90^\circ - \angle ZVM$ 。

在球面三角形 MTV 中, 由三角形余弦定理可得

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

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。

偏振方位角与天空偏振光 e 矢量紧密相关, 根据瑞利散射定律, 被观测点 $V(r, \theta, \phi)$ 处的 e 矢量为

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

式中 $h = (-\sin \phi, \cos \phi, 0)$, $v = (-\cos \theta \cos \phi, -\cos \theta \sin \phi, \sin \theta)$, r, θ, ϕ 为天体的 3 个坐标分量。当 M 的三维坐标为 (r, θ_M, ϕ_M) 时, $V(r, \theta, \phi)$ 处的 χ 有如下关系:

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

根据(2)、(4)式可以解得天空任意一点处的 P 和 χ ^[20]。

2.2 黄海海域日光偏振模式仿真

根据偏振度和偏振方位角的计算公式, 用 Matlab 仿真程序对 2016 年 5 月 18 日“育鲲”轮航线上晴朗天气的日光理论偏振分布模式进行仿真。“育鲲”轮航行的地点为黄海海域, 对应的地理位置为 $(36^\circ 06' N, 124^\circ 57' E)$ 。日光的仿真时间为 13:00—17:00, 时间间隔为 1 h。测试的地理坐标和太阳的位置信息如表 1 所示, 仿真所得日光理论偏振分布模式如图 2 所示, 图中黑色直线代表太阳子午线, 黑色圆点代表 Babinet 中性点(B 中性点)。

表 1 测量地理坐标和太阳位置

Table 1 Measuring geographical coordinate and position of sun

Time	Latitude	Longitude	Altitude angle /($^\circ$)	Azimuth angle /($^\circ$)
13:00	$36^\circ 06' N$	$124^\circ 57' E$	65.66	59.22
14:00	$34^\circ 21' N$	$124^\circ 50' E$	54.99	74.59
15:00	$34^\circ 36' N$	$124^\circ 43' E$	41.66	86.18
16:00	$34^\circ 52' N$	$124^\circ 43' E$	30.18	94.00
17:00	$35^\circ 08' N$	$124^\circ 28' E$	18.27	101.64

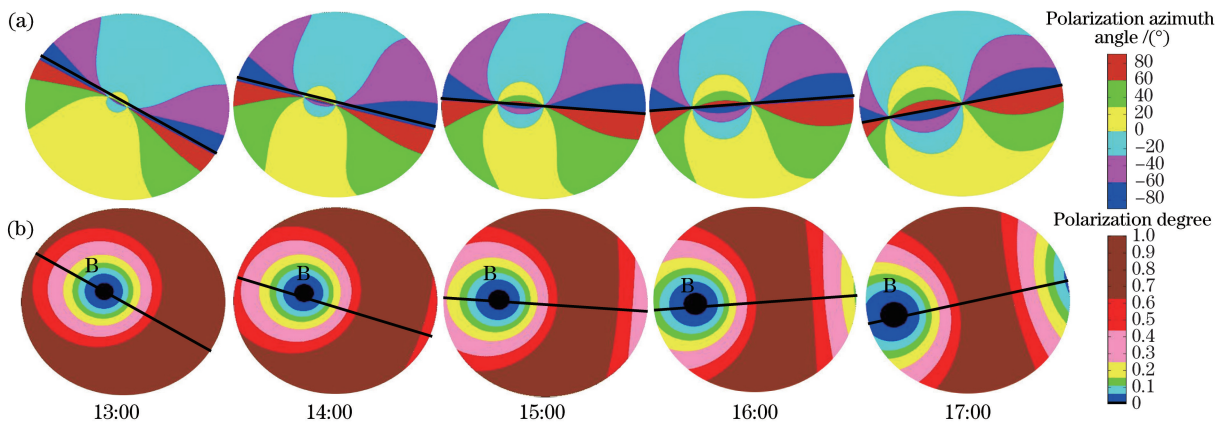


图 2 仿真得到的日光偏振分布模式图。(a)偏振方位角;(b)偏振度

Fig. 2 Simulated polarization distribution patterns of sunlight. (a) Polarization azimuth angle; (b) polarization degree

对比图 2 中的仿真结果可得,日光的理论偏振分布模式中的偏振方位角关于子午线呈对称分布,子午线的方向由太阳的方位角决定。在偏振度图中只存在一个中性点,即 B 中性点。随着太阳高度角的减小,B 中性点逐渐下降,偏振度以 B 中性点为中心呈环状分布,偏振度的最大值可达 1。在航行路线上,所有日光偏振分布模式都围绕经过天顶点和观测点的轴线转动。每个测试地点在固定时刻都有对应的偏振分布模式。当船正常行驶时,相邻测试地点间的偏振分布模式变化稳定。

2.3 黄海海域月光偏振模式仿真

使用 Matlab 仿真程序,依据(2)、(4)式计算偏振度和偏振方位角,对 2016 年 5 月 18 日“育鲲”轮航线上晴朗天气的月光理论偏振分布模式进行仿真。测试地点为黄海海域,对应的地理位置为(35°39'N, 124°13'E)。月光(盈凸月)的仿真时间为 19:00—21:30,时间间隔为 0.5 h。测试地理坐标和月亮的位置信息如表 2 所示,仿真所得的月光理论偏振分布模式图如图 3 所示。图中的黑色直线代表月亮子午线,黑色圆点代表 B 中性点。

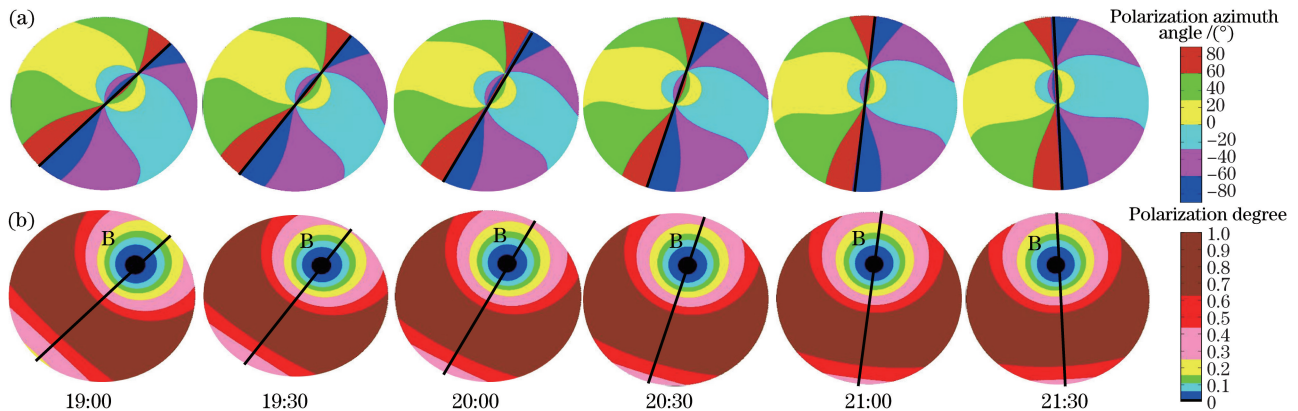


图 3 仿真所得的月光理论偏振分布模式图。(a)偏振方位角;(b)偏振度

Fig. 3 Simulated polarization distribution patterns of moonlight. (a) Polarization azimuth angle; (b) polarization degree

对比图 3 中仿真结果可得:月光的理论偏振分布模式与日光的相似,偏振方位角也关于子午线呈对称分布,子午线的方向由月亮的方位角决定。在偏振度图中只存在一个中性点,即 B 中性点,随着月亮高度角的增加 B 中性点逐渐升高,偏振度以 B 中性点为中心呈环状分布,偏振度的最大值能达到 1。在航行路线上,所有月光偏振分布模式都围绕经过天顶点和观测点的轴线转动。每个测试地点在固定时刻都有对应的偏振分布模式。当船正常行驶时,相邻测试地点间的偏振分布模式变化稳定,这为偏振仿生导航在夜间应用提供了理论基础。

表 2 测量地理坐标和月亮位置

Table 2 Measuring geographical coordinate and position of moon

Time	Latitude	Longitude	Altitude angle / (°)	Azimuth angle / (°)
19:00	35°39'N	124°13'E	25.12	-42.54
19:30	35°48'N	124°12'E	28.66	-35.64
20:00	35°54'N	124°07'E	31.63	-28.17
20:30	36°01'N	124°05'E	33.91	-20.17
21:00	36°08'N	124°01'E	35.43	-11.72
21:30	36°15'N	123°56'E	36.11	-2.99

3 黄海海域天空光偏振模式测试

3.1 天空光偏振模式测试系统

搭乘大连海事大学远洋教学实习船“育鲲”轮,利用已搭建好的图像式全天空偏振模式测试系统^[17]对黄海海域的日光和月光的偏振模式进行了测试。天气状况为少云,测试地理坐标如表 1、2 所示。图像式全天空偏振模式测试系统由单反相机(型号D300s,尼康公司,日本)、鱼镜头(型号AF DX Fisheye 10.5 mm f/2.8G ED,

尼康公司,日本)、可旋转线性偏振片(型号86191,爱特蒙特光学公司,美国)及三角架(型号A-550,百诺公司,中国)构成。图像式全天空偏振模式测试系统示意图如图4所示,其中鱼眼镜头和线性偏振片的规格如表3所示。由于偏振片位于鱼眼镜头前方,将测试仪器的实际视角减小为 130° 。测试前,调整测试系统使线性偏振片与水平面保持平行,这时鱼眼镜头对准天顶点。测试时,在每个测试时刻可获得偏振片在 0° 、 45° 和 90° 位置时含有偏振信息的图片。经过电脑测试程序处理,得到对应时刻测试地点上方天空光偏振模式的测试图。

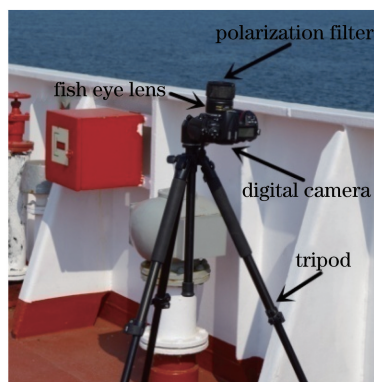


图4 图像式全天空偏振模式测试系统示意图

Fig. 4 Schematic of image measurement system with full-sky polarization pattern

表3 鱼眼镜头和线性偏振片规格

Table 3 Specifications of fisheye lens and linear polarizer

Component	Technical parameter	Nominal value
Fisheye lens	Maximum aperture /mm	3.75
	Minimum aperture /mm	0.47
	Focal length /mm	10.5
	Picture angle /($^\circ$)	180
Linear polarizer	Thickness /mm	0.75
	Extinction ratio	9000:1
	Transmission /%	42
	Wavelength range /nm	400-700
	Polarization efficiency /%	99

3.2 黄海海域日光偏振模式测试结果与分析

黄海海域日光偏振分布模式的测试时间为2016年5月18日13:00—17:00,时间间隔为1h,测试天气状况为晴间少云。测试所得日光测试偏振分布模式图如图5所示,图中黑色短线表示太阳子午线,由红色字母B标记的黑色区域表示B中性点。

分析图5(b)和图2(a),即对比日光晴间少云天气下测试偏振方位角图与其晴朗天气下理论偏振方位角图。测试方位角图的子午线方向同理论方位角图的子午线方向基本一致。测试方位角与理论方位角相似,也关于子午线呈对称分布。图中可基本呈现整体测试偏振方位角,但是太阳及其周围出现过曝光,使测试仪器无法识别太阳周围的方位角。同时,云层也会影响测试方位角图的清晰度,使方位角相邻区域间的分界线不够清晰。

分析图5(c)和图2(b),即对比日光晴间少云天气下测试偏振度图与其晴朗天气下理论偏振度图。测试偏振度图与理论偏振度图相似,都以B中性点为中心呈环状分布。但云层会影响测试偏振度图的质量,使测试偏振图中相邻环之间出现交叠。图中最大偏振度为0.25,未能达到如图2所示的理论最大值1,原因是即使在晴朗天气下,大气中也会存在单次瑞利散射、米散射和多次散射,从而产生退偏效应。当天空有少量云时,云层中随机发生的多次散射会进一步使实测偏振度数值变小^[6]。13:00的测试偏振度图中没有显示出B中性点,原因是当太阳高度角比较大时,B中性点与太阳很近,但由于太阳及其周围出现过曝光,测试系

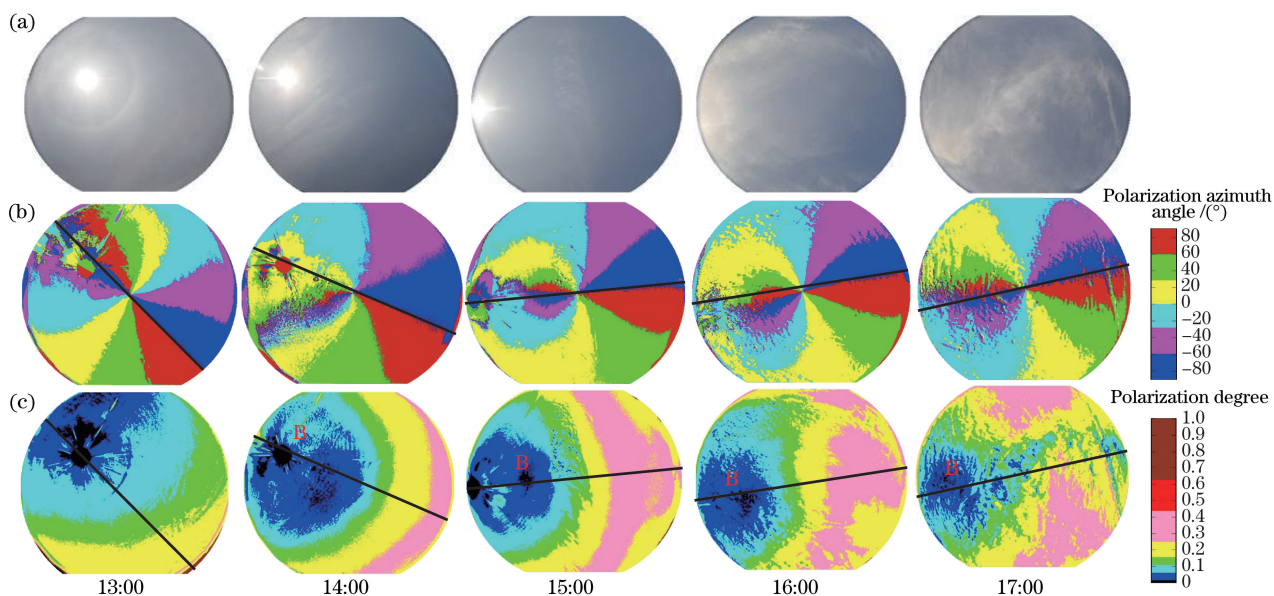


图 5 测试所得日光偏振分布模式图。(a)测试原图;(b)偏振方位角;(c)偏振度
 Fig. 5 Tested polarization distribution patterns of sunlight. (a) Original images;
 (b) polarization azimuth angle; (c) polarization degree

统无法识别 B 中性点。

3.3 黄海海域月光偏振模式测试结果与分析

黄海海域月光偏振分布模式的测试时间为 2016 年 5 月 18 日 19:00—21:30,月相为盈凸月。测试天气状况为晴间少云。测试所得月光的偏振模式图如图 6 所示,图中黑色短线表示月亮子午线,由红色字母 B 标记的黑色区域表示 Arago 中性点(A 中性点)或 B 中性点。

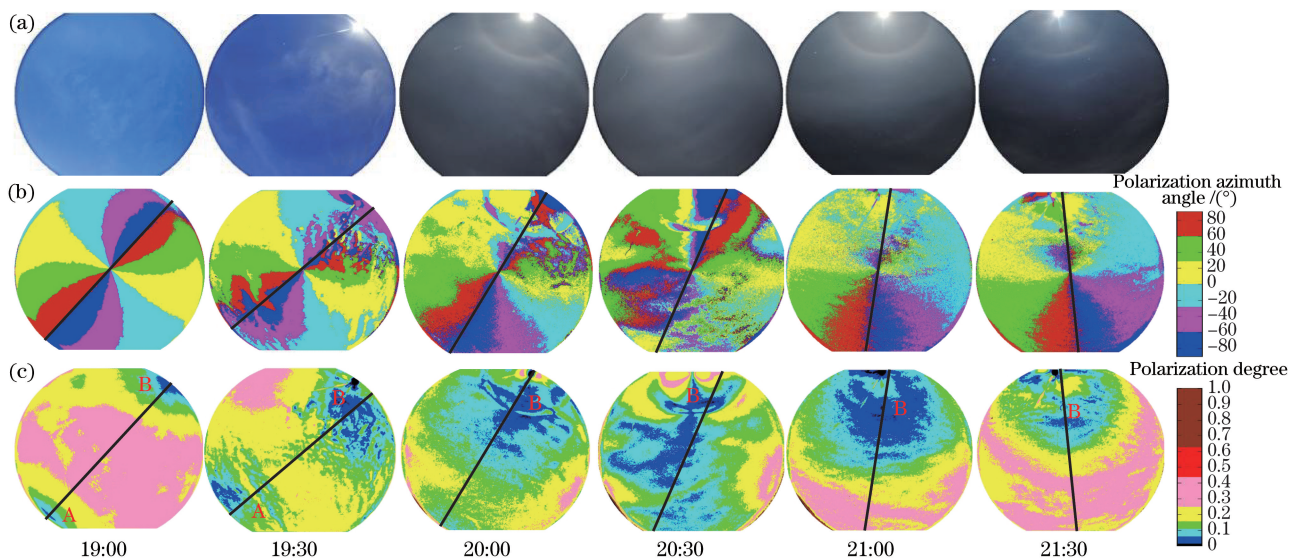


图 6 测试所得月光偏振分布模式图。(a)测试原图;(b)偏振方位角;(c)偏振度
 Fig. 6 Tested polarization distribution patterns of moonlight. (a) Original images;
 (b) polarization azimuth angle; (c) polarization degree

分析图 6(b)和图 3(a),即对比月光晴间少云天气下测试偏振方位角图与晴朗天气下的理论偏振方位角图。除了 19:30 的测试结果,其余测试方位角图的子午线方向同理论方位角图的子午线方向大体一致,测试方位角图与理论方位角图相似,也是关于子午线呈对称分布。云层会使测试方位角相邻区域间的分界线产生波动,甚至使 19:30 时刻的测试偏振方位角的子午线出现偏离。由于月光的亮度比日光的亮度小几个数量级^[21],在测试偏振方位角中月亮周围区域散射角较小,天空光偏振度数值较小,测试仪器无法识别这一区

域的方位角,而对散射角较大区域的方位角能够正常识别。20:30时刻的偏振方位角不符合这一规律,对比测试原图可以看出,20:30时刻的测试原图中由月亮形成的亮斑比其他原图中的大,原因是受海浪影响,该测试时刻的测试系统出现了大的抖动。

分析图 6(c)和图 3(b),即对比海洋晴朗少云天气下月光测试偏振度图与理论分布偏振度图。在 19:00 和 19:30 时刻的测试偏振图出现了两个中性点,并且以 A 中性点和 B 中性点为中心呈环状分布,这与理论偏振度图不同。当天民用暮光的结束时间是 19:12,这两个测试时间处于暮光到月光的过渡阶段,此时太阳在地平线之下,天空光偏振模式受月光的影响逐渐加强,受日光的影响逐渐减弱。而理论偏振度模式则只考虑了月光单一光源对天空光偏振模式的影响,因此测试偏振度图的中性点与理论偏振度图不同。在 20:00—21:30 的测试偏振度图中只有一个中性点,并以 B 中性点为中心呈环状分布,这与理论偏振度图相似。但是,云层会影响测试偏振度图的质量,使部分环状结构无法形成,测试偏振图的最大偏振度为 0.25。

4 结 论

基于瑞利散射理论对黄海海域上日光和月光偏振模式进行了仿真分析,并对相应位置的天空光偏振模式进行了测试分析。通过对比日光和月光偏振模式图可见,测试方位角图与理论方位角图相似,都关于子午线呈对称分布,子午线方向同理论方位角图的子午线方向基本一致。测试偏振度图与理论偏振度图相似,都以中性点为中心呈环状分布,但在民用暮光时刻前后,天空光偏振模式受月光和日光的双重影响,出现两个中性点。测试月光偏振方位角时,测试仪器无法识别月亮周围散射角较小区域内的方位角,而对散射角较大区域的方位角能够正常识别。虽然云层会导致测试仪器无法识别偏振分布模式中的部分区域,但是对子午线方向和中性点的呈现没有显著影响。通过对黄海海域日光和月光偏振模式进行测试研究,可知晴朗天气条件下与陆地情况类似,可以利用瑞利散射理论对海洋型气溶胶为主的天空光偏振分布规律进行理论建模,研究发现偏振方位角分布以及子午线方向的测试结果与理论分析结果基本一致。

该研究对天空偏振光导航技术在海洋中的应用进行了初步探索,为未来仿生偏振光导航技术在昼夜全天候的应用提供了实验支撑。开展同一时间海洋和陆地天空光偏振模式测试并分析两者间的规律是下一步的研究重点。

参 考 文 献

- [1] Cox L J. Optics of the atmosphere-scattering by molecules and particles[J]. Journal of Modern Optics, 1977, 24(7): 779-779.
- [2] Fent K, Wehner R. Ocelli: A celestial compass in the desert ant cataglyphis[J]. Science, 1985, 228(4696): 192-195.
- [3] Dacke M, Byrne M J, Baird E, *et al.* How dim is dim? Precision of the celestial compass in moonlight and sunlight[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 2011, 366(1565): 697-702.
- [4] 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.
- [5] Chahl J, Mizutani A. Biomimetic attitude and orientation sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(2): 289-297.
- [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] 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.
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.
- [8] Strutt J H. Scientific Papers[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [9] Horváth G, Wehner R. Skylight polarization as perceived by desert ants and measured by video polarimetry[J]. Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, 1999, 184(1): 1-7.
- [10] Kyba C C M, Ruhtz T, Fischer J, *et al.* Lunar skylight polarization signal polluted by urban lighting[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116: D24106.
- [11] Ma T, Hu X P, Zhang L L, *et al.* An evaluation of skylight polarization patterns for navigation[J]. Sensors, 2015, 15(3): 5895-5913.

- [12] Wu L H, Gao J, Fan Z G, *et al.* Measurements of skylight polarization: A case study in urban region with high-loading aerosol[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): B256-B265.
- [13] Zhang Nan, Wang Fei, Liu Jun, *et al.* Spatial distribution polarization pattern acquisition based on polarization imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 091101.
张楠, 王飞, 刘俊, 等. 基于偏振成像技术的空间大气偏振模式分布获取[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 091101.
- [14] Yan Hao, Tang Jun, Zhang Nan, *et al.* Calculation of solar spatial position based on Rayleigh atmosphere polarization pattern[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 120103.
闫皓, 唐军, 张楠, 等. 基于瑞利大气偏振模式的太阳空间位置解算方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 120103.
- [15] Liu Qi, Chu Jinkui, Wang Jing, *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.
- [16] Cui Yan, Gao Qisheng, Chu Jinkui, *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.
- [17] Cui Yan, Chen Xiaolong, Chu Jinkui, *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.
- [18] 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 of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 463(2080): 1081-1095.
- [19] 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.
- [20] Coulson K L. *Polarization and intensity of light in the atmosphere*[M]. Hampton: A. Deepak Pub, 1988.
- [21] Jensen H W, Premoze S, Shirley P, *et al.* Night rendering[J]. University of Utah Technical Report (UUCS-00-016), 2000.