

文章编号 1004-924X(2013)01-0034-06

太阳光与月光对曙暮光偏振模式的影响

崔岩*, 高启升, 褚金奎, 陈辰

(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)

摘要:为研究曙暮光时分天空的偏振模式,确定了太阳光偏振模式与月光偏振模式在曙暮光时分天空偏振模式形成中所起的作用。首先基于 Rayleigh 散射理论,运用 matlab 对太阳光与月光的偏振模式进行仿真,分析二者的差异性;接着利用成像式全天空测试系统对曙暮光的偏振模式进行测试,获取了晴朗天气下曙暮光偏振模式分布图;最后将测试结果与太阳光和月光偏振模式分别进行对比,基于中性点位置、中性点数量和子午线方向确定了太阳光与月光对曙暮光偏振模式的影响。结果表明:曙暮光偏振模式测试分布图与太阳光偏振模式理论分布图更加接近,证明了太阳光偏振模式在曙暮光时分天空偏振模式的形成中起主要作用。

关键词:曙暮光;偏振模式;成像式全天空测试;中性点;子午线

中图分类号:P427.12;P407.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132101.0034

Influence of sunlight and moonlight on polarization patterns during twilight

CUI Yan*, GAO Qi-sheng, CHU Jin-kui, CHEN Chen

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: yanc@dlut.edu.cn

Abstract: To explore the skylight polarization patterns during twilight, the effects of sunlight and moonlight on the skylight polarization patterns during twilight were investigated. First, the polarization patterns of sunlight and moonlight were simulated by matlab based on Rayleigh scattering theory and the differences between them were analyzed. Then, the polarization patterns during twilight were measured by a full-sky imaging test system and the polarization pattern distributions during twilight were obtained on a good day. Finally, the test results were compared with the simulation polarization patterns of sunlight, respectively and moonlight and the effects of sunlight and moonlight on polarization patterns during twilight were studied based on the positions of the neutral points, the number of neutral points and the direction of the meridian. The results show that the tested polarization patterns are in agreement with the theoretical polarization patterns of sunlight, which concludes that the polarization patterns of sunlight play a major role in the polarization patterns during twilight.

Key words: twilight; polarization pattern; full-sky imaging test; neutral points; meridian

1 引言

近年来,关于天空偏振光领域的研究已经从白天扩展到曙暮光时分甚至夜晚各个时段。曙暮光时分指日出或日落前后的一段时间,这时太阳光虽可照射到高空大气,但因空气分子散射使天空和地面仍维持微明(本文规定为太阳升起或者落山前后1小时)。晴朗天气下,天空中的曙暮光是太阳光偏振模式与月光偏振模式的综合结果。此时,太阳光的偏振模式和月光的偏振模式谁占的比重更大对于研究曙暮光时分的天空偏振模式具有指导性意义。鉴于此,确定太阳光与月光的偏振模式在曙暮光时分天空偏振模式形成中所起的作用势在必行。

目前,国外对于太阳光及月光偏振模式的研究已经取得一定的进展。2004年,Warrant等研究发现巴拿马森林中的一种蜜蜂(*The halictid bee Megalopta genalis*)能够感应到曙暮光时分天空中的光,利用曙暮光的偏振特性分布模式出去寻找食物^[1]。2003年,Dacke等发现蜚螂能够利用月光的偏振模式实现定位,从而能够在寻找到食物后迅速返回^[2-3]。2001年,Gal和Horvath利用成像式全天空测试系统,选择几乎相同的太阳和月亮高度角,每隔0.5 h测试一次,用实验成功验证了太阳与月光在相同位置时,满月晴朗夜间月光的偏振模式与白天天空散射光的偏振模式基本相同^[4]。2005年,Cronin利用成像式天空偏振光测试系统获取了曙暮光的偏振模式^[5]。国内对于该领域的研究起步比较晚,近年来成果比较突出的有:2009~2011年,北京大学晏磊等研究了利用天空偏振光分布特性确定仿生导航航向角的方法,并通过成像式测试系统对天空散射光的偏振分布规律及中性点的特性进行了研究^[6-8]。2010年,合肥工业大学高隽等通过电矢量法来描述偏振度和偏振方位角,并经过仿真实验证明了该方法能够比较准确地描述理想情况下大气的偏振模式^[9]。2005年至今,大连理工大学褚金奎课题组对白天天空散射光的偏振特性和不同天气条件下天空散射光的偏振特性分布规律进行了研究^[10-11]。

综上所述,国内外对于曙暮光及月光偏振模式的研究已取得一定的成效,但并没有深入地分析日月交汇的曙暮光时分太阳光和月光的偏振模式对于天空偏振模式的作用。本文利用偏振模式

中的特殊点——中性点(偏振度为0)及其子午线来分析太阳光和月光的偏振模式在曙暮光时分天空偏振模式形成中所起的作用,将太阳光与月光的偏振模式仿真与曙暮光偏振模式的测试结合起来,总结得出了曙暮光时分天空偏振模式的相关规律。

2 太阳光与月光偏振模式仿真

2.1 太阳光与月光偏振模式仿真原理

在天文学中,天球是以地球为中心、半径无限大的想象球体,日月星辰在天球上做着各自的运动,如图1所示。图中黑色圆表示月亮,黑色方形表示太阳,中心小球体表示地球, O 表示地心,弧 AB 表示赤道, Z 表示北极。

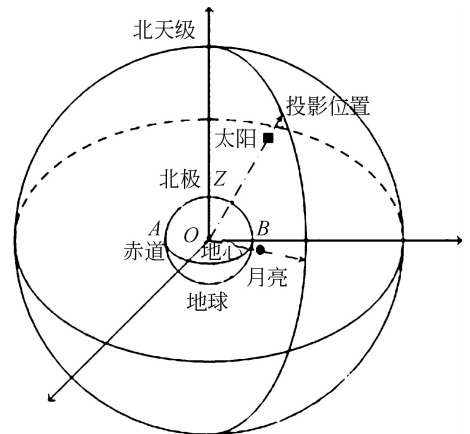


图1 天球坐标系

Fig. 1 Celestial coordinates

图2所示为以观测者为中心,以任意长为半径的假想球面,将所观测到的天体投影到此球面上用以标记和度量天体的位置和运动。

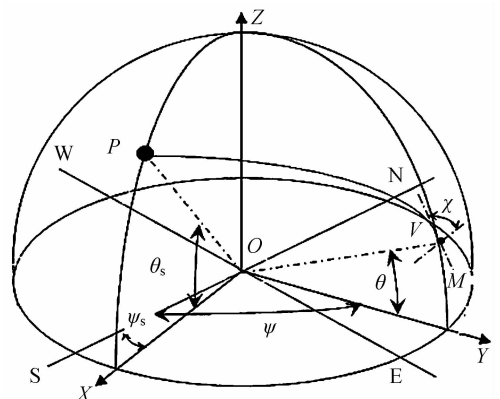


图2 地平坐标系

Fig. 2 Horizontal coordinate system

地平坐标系中,坐标系原点 O 为观测者的位置, P 代表天体(太阳或者月亮), Z 表示天顶, OV 为天空中的观测方向, XOY 平面为当地水平面。在地平坐标系中用方位角和高度角表示天体的位置, θ_s 表示太阳(或月亮)高度角, ψ_s 表示太阳(或月亮)方位角, θ 为测量高度角, ψ 为测量方位角, S 代表正南, N 代表正北, W 代表正西, E 代表正东。方位角是通过天体 P 的地平经圈与午圈之间的夹角,以正南方为起算点,由南向东为负,由南向西为正;高度角由地平圈向天顶为正,从地平圈向天底为负。 χ 表示偏振方位角。

太阳(或月亮)方位 OP 与观测方位 OV 所形成的球面三角形 POV 表示散射面。由 Rayleigh 散射理论^[13] 知,散射角 γ 即为该图中的 $\angle OVM$, $\angle OVM = \angle POV$, 在球面三角 ZVP 中,由球面三角形的余弦定理可得:

$$\cos \gamma = \sin \theta \sin \theta_s + \cos \theta \cos \theta_s \cos(\psi - \psi_s). \quad (1)$$

偏振度为:

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

其中: P_{\max} 为最大偏振度。

偏振方位角是和天空中的 e 矢量紧密相关的,任何一个观测方向的偏振光 e 矢量垂直于太阳、观察者和被观察点三者构成的平面^[12]。根据瑞利散射定律^[13],点 $R(r, \theta, \psi)$ 处的 e 矢量为:

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

其中: $v = (-\cos \theta \cos \psi, -\cos \theta \sin \psi, \sin \theta)$, $h = (-\sin \psi, \cos \psi, 0)$ 。当天体三维坐标为 (r, θ_s, ψ_s) 时,点 $R(r, \theta, \psi)$ 处的偏振方位角 χ 为:

$$\chi = \arctan \left(\frac{\sin \theta \cos \theta_s - \cos \theta \cos(\psi - \psi_s) \sin \theta_s}{\sin(\psi - \psi_s) \sin \theta_s} \right). \quad (4)$$

2.2 太阳光与月光偏振模式仿真结果与分析

由于农历十五前几日(包括农历十五),太阳落山后月亮就会升起,所以本文选择辽宁大连(东经 $121^{\circ}36'$, 北纬 $38^{\circ}55'$) 为观测点,运用 matlab 分别对 2012 年 5 月 3 日(农历十三)曙暮光时分(19:00~20:00)太阳光产生的偏振模式和月光产生的偏振模式的理论分布模型进行了仿真,结果如图 3 和图 4 所示。黑色粗线表示子午线, A 表示 Arago 中性点, B 表示 Babinet 中性点。表 1 列出了 3 个时刻太阳与月亮的位置信息。通过对

比得出:

(1)由偏振度分布图(图 3)可知:图 3(a1)~3(a3)中存在 Arago 和 Babinet 两个中性点,而图 3(b1)~3(b3)中仅存在一个 Babinet 中性点;同一时刻太阳光偏振模式与月光偏振模式的中性点位置差异很大,如图 3(a1)和 3(b1)中的 Babinet 中性点;图 3(a1)~3(a3)中子午线方向几乎保持一致,图 3(b1)~3(b3)中子午线变化也不大,但同一时刻,太阳光偏振模式与月光偏振模式的子午线方向差异很大,如图 3(a1)和 3(b1)。

(2)由方位角分布图(图 4)可知:图 4(a1)~4(a3)中,中性点不明显,仅仅在图 4(a3)中可以看出 Babinet 中性点,图 4(b1)~4(b3)中存在一个 Babinet 中性点;同一时刻太阳光偏振模式与月光偏振模式的中性点位置差异很大,如图 4(a3)和图 4(b3)中的 Babinet 中性点;图 4(a1)~4(a3)的子午线方向几乎保持一致,图 4(b1)~4(b3)的子午线变化也不大,但同一时刻太阳光偏振模式与月光偏振模式的子午线方向差异很大,如图 4(a3)和 4(b3)。

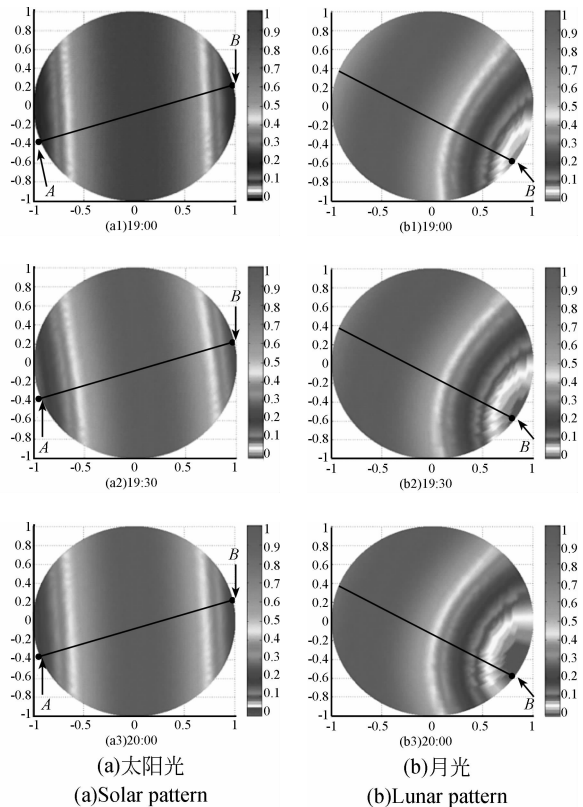


图 3 太阳光与月光的偏振度理论分布模型对比
Fig. 3 Contrast of theoretical distribution models of polarization degrees in solar and lunar patterns

表 1 太阳(月亮)的位置

Tab.1 Positions of sun(moon)

时间	天体	高度角	方位角
19:00	太阳	-2°59'	113°12'
	月亮	33°27'	-43°31'
19:30	太阳	-8°14'	118°10'
	月亮	36°56'	-35°44'
20:00	太阳	-13°15'	123°27'
	月亮	39°46'	-27°11'

(3) 综上可知,中性点信息与子午线信息在偏振模式分布图中差异比较大,因此本文利用偏振模式中的中性点及其子午线作为分析工具,将太阳光偏振模式和月光偏振模式的理论分布图同曙暮光天空偏振模式的测试分布图进行对比,进而判别太阳光与月光对曙暮光偏振模式的影响。

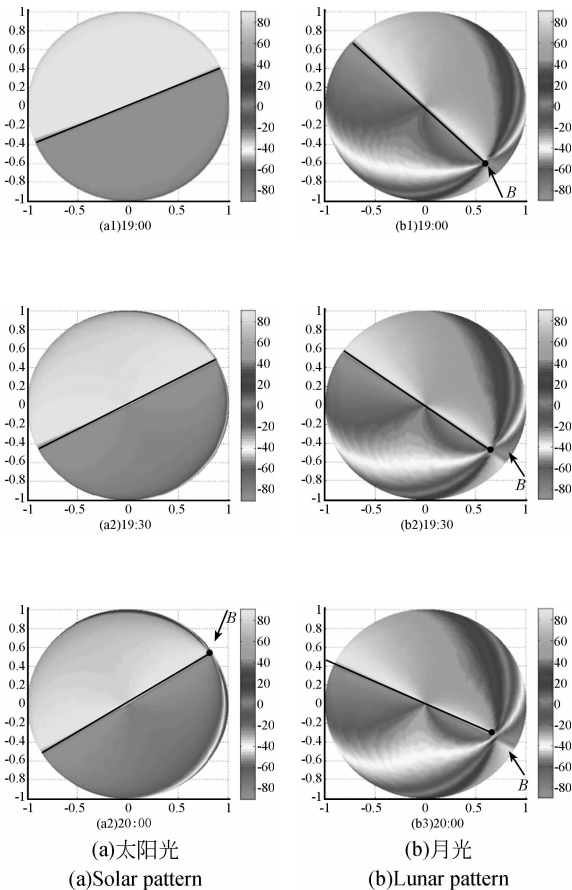


图 4 太阳光与月光的偏振方位角理论分布模型对比
Fig. 4 Contrast of theoretical distribution models of polarization angles in solar and lunar patterns

3 曙暮光偏振模式测试结果与分析

3.1 成像式全天空测试系统

利用成像式全天空测量系统对曙暮光的偏振模式进行了测试。地点在大连理工大学(北纬 38°55', 东经 121°36')机械工程学院东楼楼顶。测试系统由可旋转偏振片,鱼镜头(AF DX Fisheye 10.5 mm f/2.8G ED),单反相机(Nikon D300s)及三角支架组成,如图 5 所示。测试时,鱼镜头的主光轴垂直对准天顶,通过偏振片 0, 45 和 90°的旋转完成测试,短时间内得到 3 张包含偏振信息的图片。测试完成后,通过 matlab 对测试所得图片进行数据处理,最后得出曙暮光偏振模式的测试分布图。



图 5 成像式全天空测试系统
Fig. 5 Full-sky imaging test system

3.2 曙暮光偏振模式测试结果与分析

图 6 为晴朗天空下,2012 年 5 月 3 日暮光时分 19:30 的天空散射光偏振模式的测试分布图,图中黑色粗线表示子午线,A 表示 Arago 中性点,B 表示 Babinet 中性点。

偏振度测试分布图(图 6(a))中,存在 Arago 和 Babinet 两个中性点,并且与图 3(a2)中太阳光偏振度理论分布图的 Arago 和 Babinet 两个中性点的位置相近;图 6(a)中子午线方向与图 3(a2)太阳光偏振度理论分布图的子午线方向几乎保持一致。这些与图 3(b2)的月光偏振度理论分布图的差异都比较大。

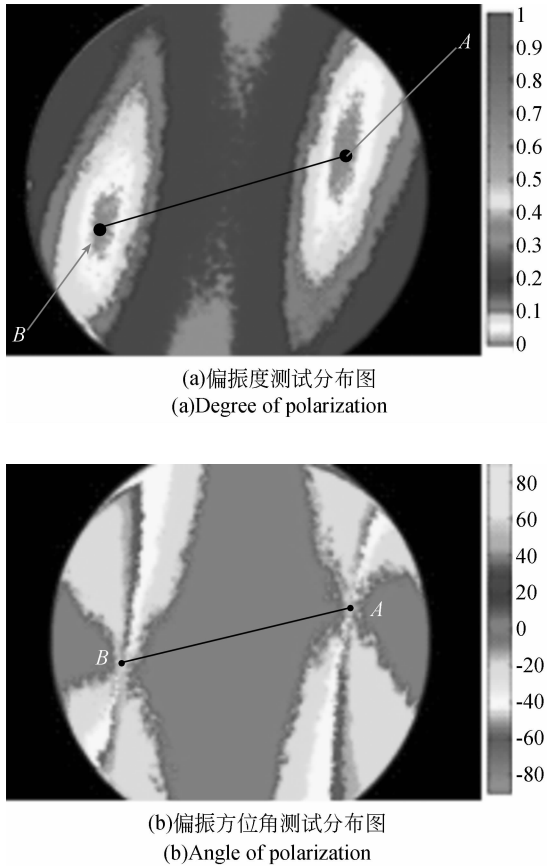


图 6 曙暮光的偏振模式测试分布图

Fig. 6 Tested distribution maps of polarization patterns during twilight at 19:30

偏振方位角测试分布图(图 6(b))中,存在 Arago 和 Babinet 两个中性点,这与图 4(a2)与(b2)的太阳光和月光偏振方位角理论分布图都存在一定的差异;图 6(b)中子午线方向与图 3(a2)中太阳光偏振方位角理论分布图的子午线方向几乎保持一致,与图 3(b2)中的月光偏振方位角理论分布图的差异比较大。

经以上对比可以得出,曙暮光时分天空偏振模式的测试分布图与太阳光偏振模式的理论分布图更加接近,这表明曙暮光时分,虽然太阳可能不在地平线上,同时月亮已经升起,但太阳光的偏振模式仍然占主要成分,天空中存在的偏振模式主要是由太阳光经过地球大气层散射形成的。

5 结 论

本文分别以太阳和月亮为天体建立了地平坐标系,并对太阳光和月光的偏振模式进行了理论仿真;搭建了成像式全天空测试系统,对曙暮光时分的天空偏振模式进行了测试;通过分析偏振模式中的特殊点——中性点及其子午线,得出太阳光偏振模式在曙暮光偏振模式形成中占主导地位。

曙暮光时分太阳光偏振模式是怎样向月光偏振模式进行转变以及月光偏振模式的相关规律将是作者下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] WARRANT E J, KELBER A, GISLÉN A, *et al.*. Nocturnal vision and landmark orientation in a tropical halictid bee *Curr* [J]. *Biol*, 2004, 14: 1309-1318.
- [2] DACKE M, MARCUS J, WARRANT E J, *et al.*. Lunar orientation in a beetle [J]. *Proc. R. Soc. London Ser. B*, 2004, 271: 361-365.
- [3] DACKE M, NILSSON D-E, SCHOLTZ C H, *et al.*. Insect orientation to polarized moonlight [J]. *Nature*, 2003, 424: 33.
- [4] GÁL J, HORVÁTH G, BARTA A, *et al.*. Polarization of the moonlit clear night sky measured by full-sky imaging polarimetry at full moon: comparison of the polarization of moonlit and sunlit skies [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 22: 647-653.
- [5] CRONIN T W, WARRANT E J, GREINER B. Polarization patterns of the twilight sky [J]. *SPIE*, 2005, 5888: 58880R1-58880R18.
- [6] 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.
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. (in Chinese)
- [7] 关桂霞, 晏磊, 陈家斌, 等. 单次散射条件下大气偏振中性点的特性研究 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2010, 4, 16: 503-506.
GUAN G X, YAN L, CHEN J B, *et al.*. Characteristics of the neutral points of atmospheric polar-

zation under single scattering conditions [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2010, 4, 16: 503-506. (in Chinese)

- [8] 关桂霞,晏磊,陈家斌,等. 天空偏振光分布的实验研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(4): 459-463.
GUAN G X, YAN L, CHEN J B, *et al.*. Research on sky polarization distribution [J]. *Bing Gong Journal*, 2011, 32(4): 459-463. (in Chinese)
- [9] 张旭东,林金金,高隽,等. 基于电矢量描述的大气偏振建模[J]. 电子学报, 2010, 12: 2745-2750.
ZHANG X D, LIN J J, GAO J, *et al.*. Modeling of skylight polarization pattern based on electric vector [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 12: 2745-2750. (in Chinese)
- [10] 崔岩,曹楠楠,褚金奎,等. 天空偏振光测量系统的设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(6): 1431-1435.

CUI Y, CAO N N, CHU J K, *et al.*. Design of sky light polarization measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6): 1431-1435. (in Chinese)

- [11] CUI Y, ZOU X CH, CHU J K. Patterns of skylight polarization at different conditions [J]. 2011, 483: 770-774. (in Chinese)
- [12] 姚弘轶. 面向仿生微纳导航系统的天空偏振光研究[D]. 大连:大连理工大学机械工程学院, 2006.
YAO H Y. Research on the skylight polarization for the bionic micronano navigation system [D]. Dalian: Dalian University of Technodgy, 2006. (in Chinese)
- [13] COULSON K L. *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere*[M]. Hampton, VA: A. Deepak Pub, 1988. (in Chinese)

作者简介:



崔岩(1967—),女,辽宁大连人,硕士,副教授,1989年于大连理工大学获学士学位,2003于德国卡尔斯鲁厄应用科学大学获第二硕士学位,主要从事微纳传感器和精密测量技术等方面的研究。E-mail: yanc@dlut.edu.cn



高启升(1986—),男,辽宁大连人,硕士研究生,2009年于大连理工大学获得学士学位,主要从事天空光偏振测试技术及仪器的研究。E-mail: achan_123@126.com



褚金奎(1965—),男,河南人,博士,教授,博士生导师,1986年于杭州电子科技大学获得学士学位,1989年于西安科技大学获得硕士学位,1992年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事智能机器人、仿生传感器和微机电测试技术等方面的研究。E-mail: chujk@dlut.edu.cn



陈辰(1988—),男,山东兖州人,研究生,2011年于山东理工大学获得学士学位,主要从事天空光偏振测试技术及仪器的研究。E-mail: 371409517@qq.com

(版权所有 未经许可 不得转载)