

晴朗天气下满月偏振模式的研究

崔 岩 陈小龙 褚金奎 陈 辰 李晨牧 关 乐

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要 研究晴朗天气条件下满月天空偏振模式,分析并探索太阳光和月光天空偏振特性的分布规律。对夜间光源进行分析,以 Rayleigh 散射理论为基础对满月天空偏振模式进行了仿真。利用成像式全天空偏振光测试系统对太阳光、暮光和满月月光的天空偏振模式进行了测试,通过偏振模式中的特殊点——中性点和子午线方向进行对比分析。结果表明:晴朗天气下满月偏振模式与仿真结果基本一致,符合 Rayleigh 散射理论;暮光偏振模式同时受到月光和太阳光的影响;当太阳高度角和月亮高度角相近时,太阳光和月光分布规律是相似的;光强大小并不改变天空光偏振模式的分布规律和偏振度的大小。

关键词 测量;大气光学;满月偏振模式;成像式全天空测试;散射光

中图分类号 P427.1+2; P415.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1012002

Study on Polarization Pattern of Full Moonlight in Clear Sky

Cui Yan Chen Xiaolong Chu Jinkui Chen Chen Li Chenmu Guan Le

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology,

Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract The polarization pattern of full moonlight in clear sky is investigated in order to understand the distribution law of polarization properties of full-sky scattered light better. Night skylight sources have been investigated. The polarization pattern of full moonlight has been simulated based on Rayleigh scattering theory. The distribution patterns of full moonlight, twilight and sunlight as well as the distribution patterns of continuous observation from twilight to moonlight have been acquired using a full-sky imaging measurement system. After contrasting and analyzing the neutral point and the orientation of meridian line, it is proved that the polarization pattern of full moonlight in clear sky is basically consistent with the simulation results, and it conforms to the Rayleigh scattering theory; the twilight polarization pattern is affected by sunlight and moonlight simultaneously; when the altitude angle of the sun is similar to that of the moon, the distribution trends of polarization patterns are identical; the power of the light does not change the value of skylight polarization distribution patterns.

Key words measurement; atmospheric optics; moonlight polarization pattern; full-sky imaging measurement; scattered light

OCIS codes 120.4825; 120.5820; 230.5440

1 引 言

生物学家研究发现沙蚁、蜜蜂、蟋蟀和蜣螂等昆虫能够利用太阳光和月光偏振模式进行导航^[1-2],因此对于天空中实际偏振模式的研究成为热点。目前对于太阳光偏振模式的研究已经取得一定成绩,并已经应用到仿生导航领域。Gál 等^[3]于 2000 年

研制出了一套全天空偏振测量系统,对晴天天气情况下的偏振度和偏振方位角分布模式进行了测量,获得了晴天全天空的偏振分布规律,同时 Lambrinos 等^[4-5]设计了天空光偏振仿生导航传感器,并对生物基于天空光偏振模式的导航机理进行了研究和分析。2007 年, Hegedüs 等^[6]发现,有云

收稿日期: 2014-05-05; **收到修改稿日期**: 2014-06-16

基金项目: 国家 973 计划(2011CB302105)、国家自然科学基金青年基金(51305057)

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@dut.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

的天气情况下,偏振方位角的分布模式和晴天的分布模式是相似的。2011年,关桂霞等^[7]分别对单次散射理论下中性点的形成机理和偏振模式进行大量研究。2010年,吴良海等^[8]利用 Mie 散射理论对 O₂、N₂、CO₂、水滴和气溶胶等粒子的散射与偏振特性进行了系统的理论研究。2005年至今,刘琦等^[9-11]分别搭建了点源式测试系统和图像式测试系统,对太阳光和暮光的偏振分布模式进行了深入的研究,显然国内外对于太阳光及各种天气情况的偏振模式和偏振探测装置有了一定的研究^[12-18],然而对于夜间偏振模式的研究相对较少。

目前,蜣螂是已知的唯一一种能利用昏暗的月光偏振模式进行导航的动物。月光偏振模式强度随着月亏而下降,因此会影响蜣螂导航的精度。蜣螂在满月的导航精度和利用太阳光导航的生物在日间导航的精度是一致的^[19],受此启发 Gal 等^[20]在2001年对满月夜间的偏振模式进行了测量,并总结了中性点的出现规律,但没有对夜间偏振模式建立理论模型。实际月光偏振模式受到诸多外界因素的影响,而夜间月亮圆缺等变化更增加了夜间偏振模式研究的难度。为进一步完善日间和夜间天空光偏振模式以及研究夜间生物定位导航机理,本文对夜间的偏振模式进行了研究,分析了夜间光源的情况,将 Rayleigh 散射^[21]理论引入夜间天空偏振光的研究,对晴朗天空下满月偏振模型进行了仿真;利用自主搭建的成像式全天空偏振光测试系统分别对暮光和满月月光的偏振模式进行了大量测试,并结合理论模型,对太阳光和月光偏振模式进行了对比分析研究,得到了月光和暮光偏振模式的分布规律。

2 月光偏振模式仿真

2.1 夜间光源分析

夜间光源主要来自于月光、太阳光(非直射)、恒星、行星、气辉、银河系漫射光、黄道光 and 宇宙光等。这些光源光强信息如表 1 所示。大气层在夜间天空起着重要的作用,光在经过大气层时被散射和吸收,形成了大量非直射光^[22]。当太阳高度角低于 18°时,天文学上的暮光结束,天空正式进入了夜间模式。夜间晴朗天空可以分为无月和有月的情况:无月时,气辉、黄道光、星光是夜间天空光源的重要组成部分;有月时,月光是夜间天空的主要光源,尤其满月时,月光占主导地位。因此,晴天天气下满月的偏振模式将是研究的重点。

表 1 夜间光源光强

Table 1 Intensity of night skylight source

Component	Irradiance / (W/m ²)
Sunlight	1.3 × 10 ³
Full moon	2.1 × 10 ⁻³
Zodiacal light	1.2 × 10 ⁻⁷
Integrated starlight	3.0 × 10 ⁻⁸
Airglow	5.1 × 10 ⁻⁸
Diffuse galactic light	9.1 × 10 ⁻⁹
Cosmic light	9.1 × 10 ⁻¹⁰

对于日间太阳光而言,晴朗天空起散射作用的是气体分子,太阳光穿过地球大气层时,在气体分子作用下,主要发生 Rayleigh 散射。对于夜间月光而言,月亮是一个弱反射源,仅反射入射太阳光的 7.2%,剩余光被吸收转化为热量等其他形式^[23]。晴朗满月夜空,太阳光经过月球反射后,穿过地球大气层,在气体分子的作用下发生多次散射,因为气体分子体积小,主要发生 Rayleigh 散射,因此晴朗天气下满月月光散射符合 Rayleigh 散射理论模型。

2.2 月光偏振模式仿真原理

依据 Rayleigh 散射理论,使用地平坐标系(图 1)来描述月光偏振模式的仿真过程,地平坐标系中,坐标系原点 O 为观测者所在的位置, U 代表月亮, Z 代表天顶, OZ 轴为观测者和天顶的连线, OV 为观测方向, XOY 平面为水平面。用高度角和方位角表示月亮的位置, θ_u 代表月亮的高度角, φ_u 代表月亮方位角, θ 为观测高度角, ψ 为观测方位角, S、N、W、E 分别代表正南、正北、正西、正东。月亮 U 的午圈与地平经圈之间的夹角为方位角,方位角以正南方为起点,由南向西为正,由南向东为负;观测者 O 和月亮 U 的连线与地平圈的夹角为高度角,从地平圈向天顶为正,从地平圈向天底为负, χ 表示偏振方位角。

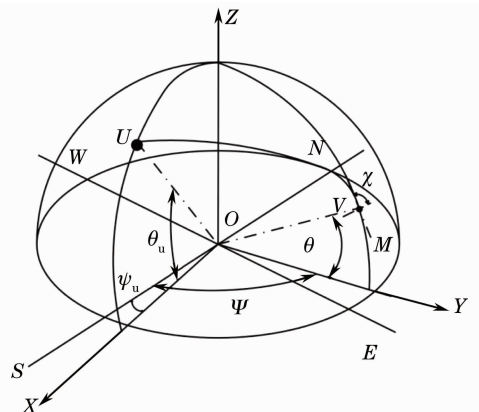


图 1 地平坐标系

Fig. 1 Horizontal coordinate system

散射面是由观测方位 OV 与月亮方位 OU 所形成的球面三角形,用 UOV 表示.由 Rayleigh 散射理论可知,图 1 中的 $\angle OVM$ 即为散射角 γ , $\angle UOV = \angle OVM$,即可以用 $\angle UOV$ 来表示散射角 γ .偏振方位角 χ 定义为过 V 点子午线(弧 ZV)与观测方向 V 点的 e 矢量振动方向的夹角,故任何一个观测方向上的偏振光 e 矢量都垂直于观察者、月亮和被观察点三者构成的平面,即 UOV 面,则 U 点的 e 矢量振动方向垂直于 UV , $\chi = 90^\circ - \angle ZVU$.在球面三角形 ZVU 中,根据球面三角形余弦定理得

$$\cos \gamma = \sin \theta \sin \theta_u + \cos \theta \cos \theta_u \cos(\psi - \psi_u), \quad (1)$$

偏振度为

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

式中 P_{\max} 为最大偏振度.点 $R(\gamma, \theta, \psi)$ 处的 e 矢量为

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

式中 $v = (-\cos \theta \cos \psi, -\cos \theta \sin \psi, \sin \theta)$, $h =$

$(-\sin \psi, \cos \psi, 0)$.当月亮的三维坐标为 (γ, θ, ψ) 时,点 $R(\gamma, \theta, \psi)$ 处的偏振方位角 χ 为^[21]

$$\chi = \arctan \left[\frac{\sin \theta \cos \theta - \cos \theta \cos(\psi - \psi_u) \sin \theta_u}{\sin(\psi - \psi_u) \sin \theta_u} \right]. \quad (4)$$

由(2)式和(4)式可以计算得到天空中某点的偏振度 P 和偏振方位角 χ .

2.3 月光偏振模式仿真结果与分析

利用月光偏振度和偏振方位角计算公式(2)式和(4)式以及和 Matlab 软件对晴朗天气下满月偏振特性分布模式进行建模仿真,选择辽宁大连($38^\circ 55' N$, $121^\circ 36' E$)为观测点,以 2012 年 11 月 28 日(满月)为仿真对象,从 19:05~21:35 对满月月光偏振模式进行模拟,月亮的高度方位信息如表 2 所示,月光偏振度和偏振方位角仿真结果如图 2(a)和图 2(b)所示,偏振度和偏振方位角的图例分别如图 2(c)和图 2(d)所示.

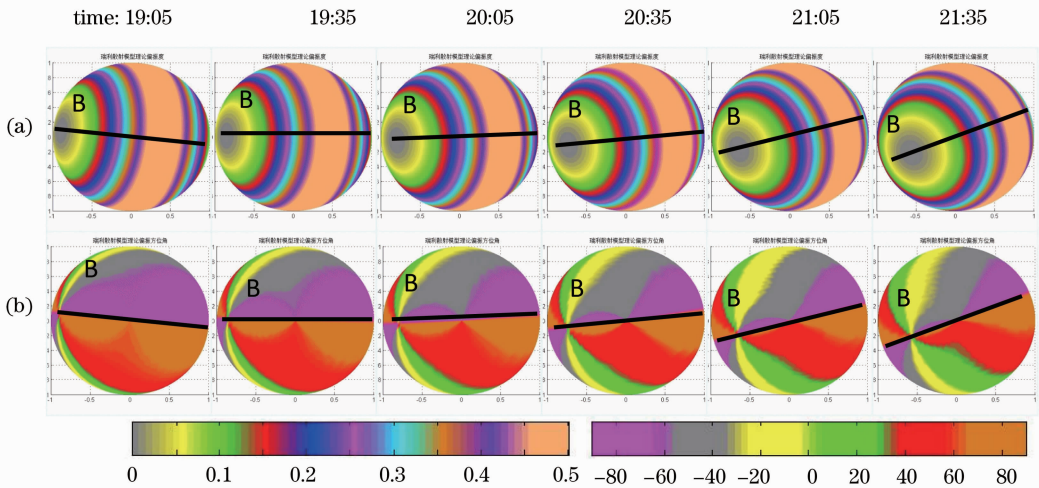


图 2 满月月光理论偏振模式的连续变化图。(a)理论偏振度连续变化图;(b)理论偏振方位角连续变化图;
(c)偏振度图例;(d)偏振方位角图例

Fig. 2 Continuous observation pictures of the theoretical moonlight polarization pattern. (a) Continuous variation of theoretical degree of polarization; (b) continuous variation of theoretical angle of polarization; (c) polarization degree legend; (d) polarization angle legend

表 2 月光方位信息

Table 1 Positions of the moon

Time	Altitude	Azimuth
19:05	$24^\circ 57'$	$-95^\circ 39'$
19:35	$30^\circ 31'$	$-91^\circ 11'$
20:05	$36^\circ 05'$	$-86^\circ 28'$
20:35	$41^\circ 38'$	$-81^\circ 20'$
21:05	$47^\circ 06'$	$-75^\circ 35'$
21:35	$52^\circ 24'$	$-68^\circ 51'$

图中黑色粗线表示月亮子午线的位置,B 表示 Babinet 中性点的位置.仿真结果:1)晴朗天气下满月月光的偏振模式只和月亮的高度角有关系,月亮高度角一定时,偏振模式是确定的;2)被测点偏振度随着该点离中性点角距(散射角)的增加而增大(角距在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围),在角距为 90° 的位置达到最大,理想条件下最大偏振度为 1,偏振度以中性点为中心成环状分布;3)月光偏振方位角关于中性点对称

分布。

3 暮光和月光偏振模式的测试与分析

利用成像式全天空偏振光测试系统,对晴朗天气下的偏振模式进行了测试。测试地点在大连理工大学(38°55'N, 121°36'E)机械工程学院东楼楼顶。

3.1 天空偏振模式测试系统

天空偏振模式成像式测试系统由可旋转偏振片、鱼镜头(AF DX Fisheye 10.5 mm f/2.8 G ED, 视场角度 180°)、单反相机、三角支架及微型计算机组成,如图 3 所示,但是受偏振连接件的影响,测试系统的实际视场角度为 130°。本文采用 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵来进行偏振信息的计算,入射光的 Stokes 矢量为 $S = (I, Q, U, V)^T$ 。其中 I 为总光强, Q, U 分别代表两个正交方向上的线偏振光光强, V 代表圆偏振光光强。通常圆偏振分量在仪器可以检测的范围内忽略不计,故认为 $V=0$ 。

经过偏振器件出射的天空光的 Stokes 矢量为

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \\ V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}. \quad (5)$$

对于配备了线性偏振片的理想光学系统而言,其通过光学检测系统的出射光总光强为^[24]

$$I'(\theta) = \frac{1}{2}(I + Q\cos 2\theta + U\sin 2\theta). \quad (6)$$

通过偏振片 0°、45°和 90°的旋转完成测试,短时间内得到三张包含偏振信息的图片,可求得入射光



图 3 测试系统实物图

Fig. 3 Hardware configuration of the measurement system

Stokes 矢量的各分量值为

$$\begin{cases} I = I'(0^\circ) + I'(90^\circ) \\ Q = I'(0^\circ) - I'(90^\circ) \\ U = 2I'(45^\circ) - I'(0^\circ) - I'(90^\circ) \end{cases}, \quad (7)$$

进而可以得到入射光的偏振度 P 、偏振方位角 χ 为^[25]

$$\begin{cases} P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ \chi = \frac{1}{2} \arctan \frac{U}{Q} \end{cases}. \quad (8)$$

3.2 测试系统的标定

3.2.1 线性偏振片的标定

由于偏振片本身存在着消光率和透射率的问题,实际测量过程中并不能完全达到理想情况,因此实际的 Mueller 矩阵为^[24]

$$M = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & (k_1 - k_2)\cos 2\psi & (k_1 - k_2)\sin 2\psi & 0 \\ (k_1 - k_2)\cos 2\psi & (k_1 + k_2)\cos^2 2\psi + 2\sqrt{k_1 k_2}\sin^2 2\psi & (k_1 + k_2 - 2\sqrt{k_1 k_2})\cos 2\alpha \sin 2\psi & 0 \\ (k_1 - k_2)\sin 2\psi & (k_1 + k_2 - 2\sqrt{k_1 k_2})\cos 2\alpha \sin 2\psi & (k_1 + k_2)\sin^2 2\alpha + 2\sqrt{k_1 k_2}\cos^2 2\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 k_1 和 k_2 分别为主透光轴的透射率以及正交光轴的消光率。则实际的总光强为

$$I'(\psi) = \frac{1}{2}[(k_1 + k_2)I + (k_1 - k_2)Q\cos 2\psi + (k_1 - k_2)U\sin 2\psi]. \quad (10)$$

实际的 I, Q 和 U 为

$$\begin{cases} (k_1 + k_2)I = I'(0^\circ) + I'(90^\circ) \\ (k_1 - k_2)Q = \frac{1}{2}[I'(0^\circ) - I'(90^\circ)] \\ (k_1 - k_2)U = \frac{1}{2}[2I'(45^\circ) - I'(0^\circ) - I'(90^\circ)] \end{cases}. \quad (11)$$

实际测得的偏振度和方位角为

$$\begin{cases} P = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \\ \tan 2\chi = \frac{(k_1 - k_2)U}{(k_1 - k_2)Q} = \frac{U}{Q} \end{cases} \quad (12)$$

因此当线性偏振片为非理想情况时，测得偏振度值为真实值的 $\frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}$ 倍，方位角 χ 没有变化。图 4 为 Edmund0.75 线性偏振片的透射率和消光率在不同波段的参数。设 $T = \frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}$ ，由于线性偏振片对光谱波长的透射率具有选择性，经计算可得 T 在 400~450 nm 之间约等于 90%，在 450~700 nm 之间，稳定地保持在 95%，从 700~750 nm 之间逐渐下降至 90%。这些结果说明，只有在 400~750 nm 之间，测量系统所测得的偏振度为真实偏振度的 90% 左右。

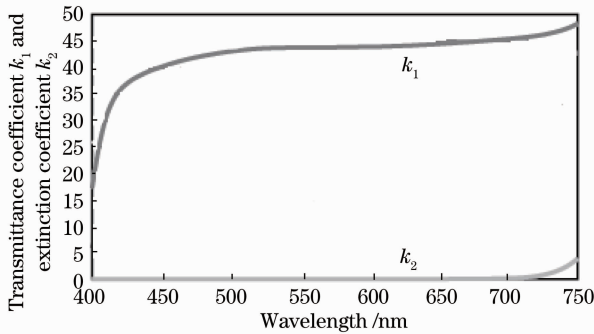


图 4 透射率、消光率参数

Fig. 4 Parameters of the transmittance and extinction coefficients

3.2.2 鱼镜头头的标定

鱼镜头头提升视角是以像素畸变为代价的，而鱼镜头头的畸变会对偏振度和偏振方位角的测量带来一定影响，本文引入轴偏距角和投影角两个参数进行标定^[23]，轴偏距角 β 和投影角 β_p 的关系如图 5 所示。光学相机电荷耦合器件 (CCD) 的半径为 R ，当一束光线按照给定的轴偏距角度 β 入射到鱼镜头头上，并聚焦到上述圆形平面上，焦点距离圆形图像中心为 r ，则投影角的计算公式为 $\beta_p = 90^\circ r/R$ 。

当一束光入射时，将相机围绕图 6 中 x 轴方向以 10° 为间隔旋转，计算投影角 β_p 的值，如图 7 所示，轴偏距角 β 和投影角 β_p 的关系非常接近理想水平，即 $\beta = \beta_p$ 。随着轴偏距角 β 的增加（入射范围的增加），有效光圈减小，但是相对光强变化较小，如图 8 所示。这说明光线以任何角度经过鱼镜头头入射到 CCD 上时相对光强的变化是很小的。

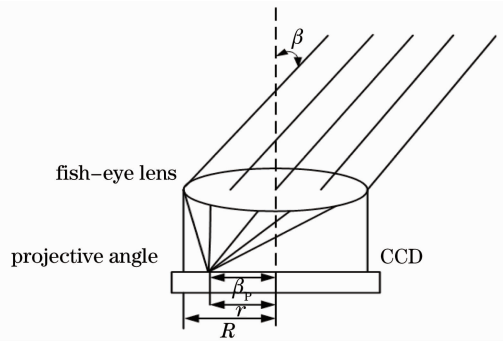


图 5 轴偏距角 β 和投影角 β_p

Fig. 5 Off-axis angle β and projected angle β_p

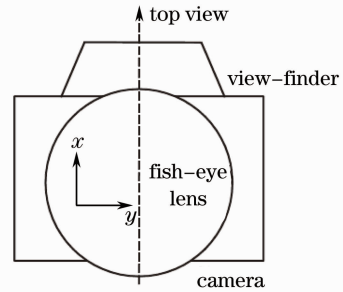


图 6 测试仪器俯视图

Fig. 6 Vertical view of measurement equipment

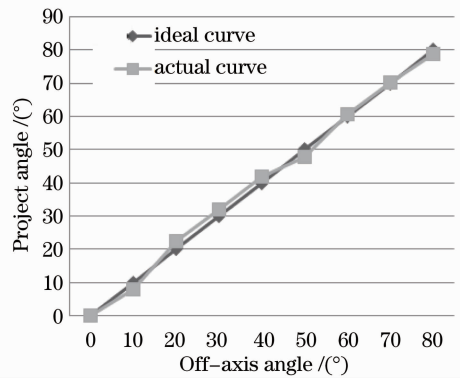


图 7 投影角 β_p 随轴偏距 β 的变化

Fig. 7 Variation in projected angle β_p with off-axis angle β

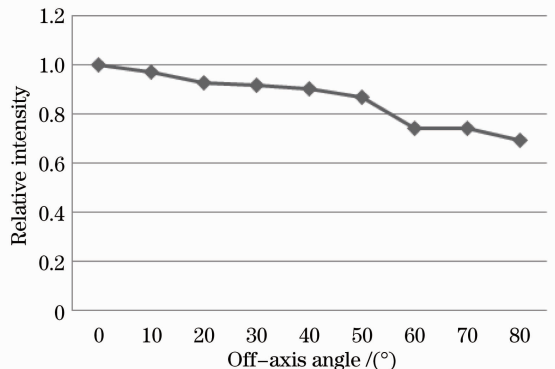


图 8 相对光强随轴偏距角 β 的变化

Fig. 8 Variation in relative intensity with off-axis angle β

另一方面,当一束天空光入射到偏振器件上时,通过 Stokes 矢量来描述这束光的偏振信息,对于鱼镜头而言,通过 Mueller 矩阵来表示其对入射光的 Stokes 矢量的改变。Stokes 矢量和 Mueller 矩阵分别简称为 S 和 M ,则经过鱼镜头出射的天空光的 Stokes 矢量 $S' = MS$ 。

鱼镜头的 Mueller 矩阵(轴偏距角度 β 为变量的函数)中,只需要计算 $m_{00}(\beta)$ 、 $m_{01}(\beta)$ 和 $m_{02}(\beta)$ 便可以知道一束光经过它时光学性能的改变。只要获取入射光强和出射光强的 Stokes 矢量,便可以确定 $m_{00}(\beta)$ 、 $m_{01}(\beta)$ 和 $m_{02}(\beta)$ 。如图 9、10 所示, $m_{01}(\beta)$ 和 $m_{02}(\beta)$ 几乎等于零,即 $I = m_{00}(\beta)I'$ 。说明入射光经过鱼镜头之后,其偏振特性是没有变化的。

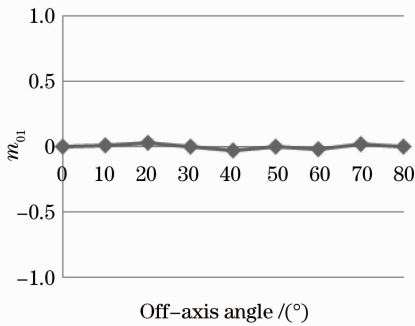


图 9 $m_{01}(\beta)$ 随轴偏距角的变化

Fig. 9 Variation in $m_{01}(\beta)$ with off-axis angle β

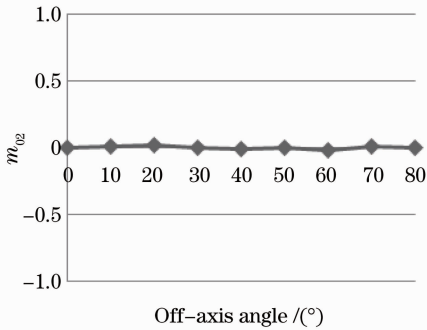


图 10 $m_{02}(\beta)$ 随轴偏距角的变化

Fig. 10 Variation in $m_{02}(\beta)$ with off-axis angle β

由以上实验可知,天空光经过鱼镜头时其相对光强和偏振特性是没有发生变化的,因此鱼镜头的误差可以忽略不计。

3.3 暮光偏振模式测试结果与分析

暮光天空偏振模式如图 11 所示,测试时间为 2012 年 7 月 3 日(农历十五),图 11(a)为太阳及月亮方位角信息图(信息来源:日梭万年历),图 11(b)为偏振度观测图,图 11(c)为偏振方位角观测图,图 11(d)和图 11(e)分别为偏振度图例和偏振方位角图例,其中红色圆点表示太阳,黑色圆点表示月亮,

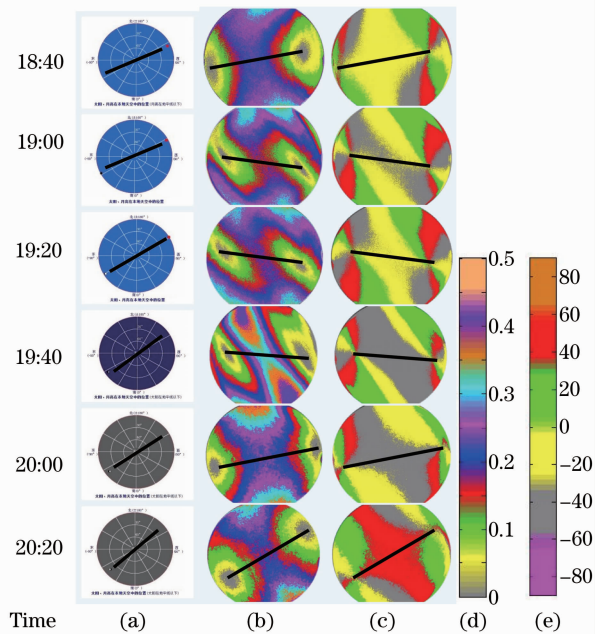


图 11 暮光偏振模式连续观测图。(a) 太阳及月亮方位角信息图;(b) 偏振度连续观测图;(c) 偏振方位角连续观测图;(d) 偏振度图例;(e) 偏振方位角图例

Fig. 11 Continuous observation pictures of twilight polarization pattern. (a) Azimuth of the sun and the moon; (b) continuous observation picture of polarization degree; (c) continuous observation picture of polarization angle; (d) polarization degree legend; (e) polarization angle legend

黑色粗线表示太阳或月亮子午线。

暮光时分偏振分布模式中存在两个中性点,如图 11 所示,偏振度关于两个中性点成环状分布。图 11(a)和图 11(b)、(c)中子午线方向对比发现:1) 18:40 时月亮还没有出现在地平线上,天空中只有太阳,测试的偏振分布模式符合太阳光偏振分布规律测试,此时测试分布图的子午线与太阳子午线方向一致;2) 19:00~19:20,太阳和月亮都在地平线上,测试的偏振模式受两个天体同时影响,此时测试分布图的子午线和太阳或月亮子午线的方向不相同;3) 19:40~20:00,太阳在地平线以下,月亮在天空中,但此时偏振模式还受到太阳的影响,测试分布图的子午线与月亮子午线方向并不相同;4) 20:20,此时偏振模式已经完全属于月光偏振模式,测试分布图的子午线方向与月亮子午线方向相同。由此可知,暮光天空偏振模式受太阳光和月光共同影响,天空存在两个中性点,偏振度关于两个中性点成环状分布,偏振方位角关于中性点成中心对称分布。

3.4 满月偏振模式观测结果与分析

满月偏振模式如图 12 所示,测试时间为 2012 年 11 月 28 日(满月)19:05~21:35,每隔 0.5 h 提取一次数据,其中图 12(a)为月亮方位角信息图,图 12(b)为测试原图,图 12(c)为测试偏振度连续观测图,图 12(d)为测试偏振方位角连续观测图,图 12(e)、(f)分别为偏振度和偏振方位角的图例,图中黑色长线为月亮子午线,天体位置、偏振度、方位角中的黑色圆点均为月亮。

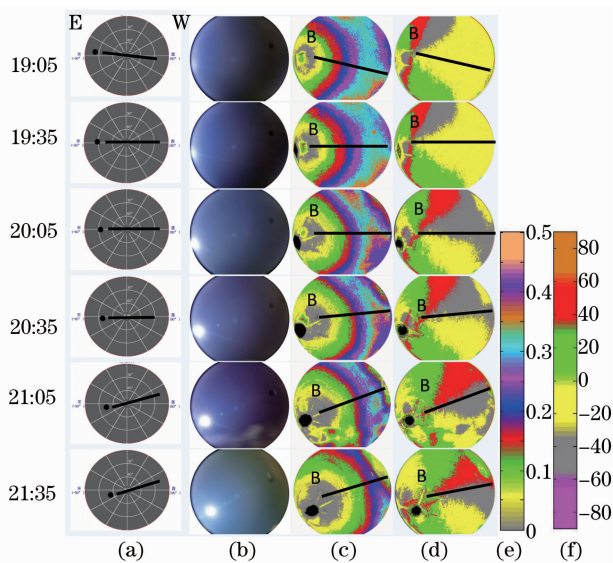


图 12 满月月光偏振模式的连续观测图。(a)月亮方位角信息图；(b)测试原图；(c)偏振度连续观测图；(d)偏振方位角连续观测图；(e)偏振度图例；(f)偏振方位角图例

Fig. 12 Continuous observation picture of moonlight polarization pattern. (a) Azimuth of the moon; (b) original image; (c) continuous observation picture of polarization degree; (d) continuous observation picture of polarization angle; (e) polarization degree legend; (f) polarization legend angle

图 12(c)和图 2(a)为晴朗天气下,月光偏振度测试分布图与理论分布图的对比。测试图中偏振度和理论分布图中的偏振度都是关于 Babinet 中性点成环状分布。月光偏振度测试分布图与理论分布图中的子午线方向基本保持一致。月光偏振度测试分布图中偏振度值在 0.4 以下,而理论分布图中偏振度能够达到理想值 1。

图 12(d)和图 2(b)为晴朗天气下,月光偏振方位角测试分布图与理论分布图的对比。月光偏振方位角测试分布图与理论分布图都是关于 Babinet 中性点成中心对称分布。月光偏振方位角测试分布图

与理论分布图中子午线的方向基本保持一致。偏振方位角测试分布图中方位角的值在 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间变化,而理论分布图中方位角的值在 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间变化。

月光偏振度和偏振方位角,其理论分布图和测试分布图之间有一定的误差,具体原因如下:1)理论模型是以 Rayleigh 散射理论为前提的,而实际的天空中不仅存在着 Rayleigh 散射还存在着 Mie 散射,产生退偏效应,因此造成了理论值与实际值之间的差异;2)鱼镜头成像时,除中心点以外,图像上的其他点均存在一定的畸变,导致了实际测量结果存在一定的误差。

月光偏振模式测试分布图与月光偏振模式理论分布图分布规律基本保持一致,符合 Rayleigh 散射理论。晴朗天气下满月时存在一个相对稳定的月光偏振模式,月光偏振模式随着月亮位置而变化;月亮附近存在一个中性点,偏振度测试分布图以中性点为中心成环状分布,被测点偏振度随着该点离中性点角距(散射角)的增加而增大(角距在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围),在角距为 90° 的位置达到最大,偏振方位角测试分布模式在中性点处成中心对称;月光的偏振模式测试分布图与太阳光的偏振模式分布具有相同的分布规律。

3.5 月光与太阳光偏振模式对比分析

太阳光偏振模式分布图如图 13 所示,测试时间为 2012 年 5 月 15 日 16 时 34 分(太阳高度角 $30^{\circ}22'$,太阳方位角 $90^{\circ}07'$)。满月偏振模式分布图如图 14 所示,测试时间为 2012 年 5 月 5 日 23 时 03 分(农历十五)(月亮高度角 $32^{\circ}03'$,月亮方位角 $-10^{\circ}04'$)。测试时的天气情况均为晴天。图中黑色粗线表示月亮子午线的位置,B 表示 Babinet 中性点的位置。

满月偏振度如图 14(a)所示,存在 Babinet 中性点,与图 2(a)月光偏振度理论分布图基本吻合,偏振度都围绕 Babinet 中性点成环状分布。满月偏振方位角如图 14(b)所示,存在 Babinet 中性点,这与图 2(b)中月光偏振方位角理论分布图基本吻合,偏振方位角关于中性点呈中心对称分布。实验说明,晴朗天气下满月天空中存在着具有规律性的偏振模式,与仿真结果一致,符合 Rayleigh 散射理论。

图 13 中的太阳和图 14 中的月亮高度角都近似为 30° ,图 6 和图 7 对比发现,当太阳和月亮高度角近似相同时,其天空偏振模式分布规律是相同的。日间偏振度平均值 $P_{\text{mean}}=0.1470$,满月偏振度平均

值 $P_{\text{mean}} = 0.1005$ 。虽然日间太阳光强度要比满月月光强度值大几百万倍,但偏振度平均值相近,由理论(2)式和(4)式知偏振度与偏振方位角和入射光强没有关系,光强大小并不改变天空光偏振模式的分

布规律和偏振度的大小。太阳光偏振模式和满月偏振模式测试实验验证了天空光偏振模式不受光强大小影响。

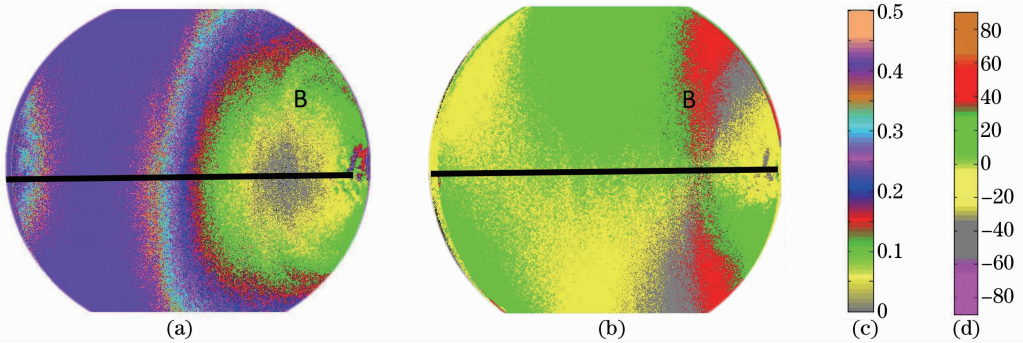


图 13 白天偏振模式测试分布图。(a)偏振度测试分布图;(b)偏振方位角测试分布图;(c)偏振度图例;(d)偏振方位角图例

Fig. 13 Testing polarization distribution picture of daytime. (a) Testing distribution of the polarization degree; (b) testing distribution of the polarization angle; (c) degree of polarization legend; (d) angle of polarization legend

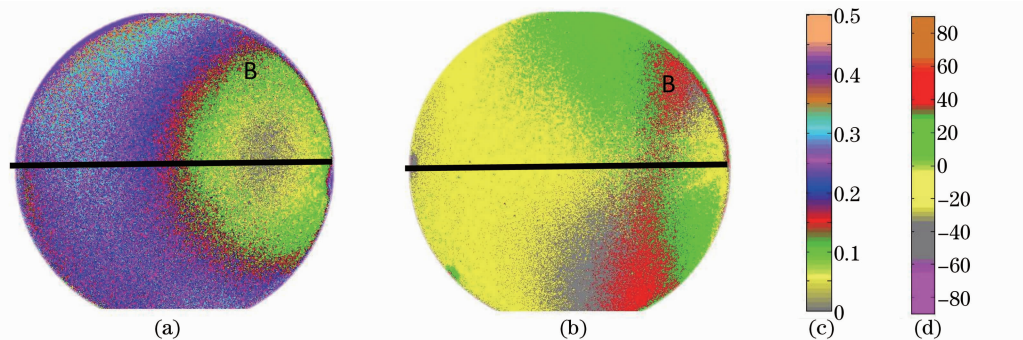


图 14 满月偏振模式测试分布图。(a)偏振度测试分布图;(b)偏振方位角测试分布图;(c)偏振度图例;(d)偏振方位角图例

Fig. 14 Testing full moon polarization distribution. (a) Testing distribution of the polarization degree; (b) testing distribution of the polarization angle; (c) degree of polarization legend; (d) angle of polarization legend

4 结 论

通过对夜间光源的分析,得出晴朗满月天空中光源的主要成分是月光,并且符合 Rayleigh 散射。在 Rayleigh 散射理论上,对理想条件下的晴朗天空满月偏振模式进行仿真模拟。在实验的基础上获取了太阳和月光相同高度角时的偏振模式分布图、暮光和满月连续观测偏振模式图,分析得出以下结论:当月亮高度角和太阳高度角相近时,其分布规律是相似的,光强大小并不改变天空光偏振模式的分布规律和偏振度的大小;晴朗天气下满月夜间天空存在规律性的月光偏振模式,符合 Rayleigh 散射的理论,与仿真结果基本一致;暮光偏振模式受太阳和月亮的共同作用,天空中存在两个中性点,偏振度关于两个中性点成环状分布,偏振方位角关于中性

点成中心对称分布。

参 考 文 献

- 1 S Rössel, R Wehner. Polarization vision in bees [J]. Nature, 1986, 323(6084): 128–131.
- 2 M Dacke, D E Nilsson, E J Warrant, *et al.*. Built-in polarizers form part of a compass organ in spiders [J]. Nature, 1999, 401(6752): 470–473.
- 3 J Gál, G Horváth, V B Meyer-Rochow, *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]. Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001, 457(2010): 1385–1399.
- 4 D Lambrinos, R Möller, T Labhart, *et al.*. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. Robotics and Autonomous systems, 2000, 30(1): 39–64.
- 5 S Heinze, U Homberg. Maplike representation of celestial E-vector orientations in the brain of an insect [J]. Science, 2007, 315(5814): 995–997.

- 6 R Hegedüs, S Åkesson, G Horváth. Polarization patterns of thick clouds; overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies [J]. *J Opt Soc Am A*, 2007, 24(8): 2347–2356.
- 7 Guan Guixia, Yan Lei, Chen Jiabing, *et al.*. Research on sky polarized light distribution [J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 32(4): 459–463.
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.
- 8 Wu Lianghai, Gao Jun, Fan Zhiguo, *et al.*. Scattering of particles in the atmosphere and their influence on celestial polarization patterns [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(7): 0701005.
吴良海, 高隽, 范之国, 等. 大气粒子散射特性及其对空间偏振分布的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0701005.
- 9 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.
- 10 Wang Wei, Chu Jinkui, Cui Yan, *et al.*. Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513001.
王威, 褚金奎, 崔岩, 等. 基于矢量辐射传输的大气偏振建模[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513001.
- 11 Cui Yan, Cao Nannan, Chu Jinkui, *et al.*. Design of skylight polarization measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(6): 1431–1435.
崔岩, 曹楠楠, 褚金奎, 等. 天空偏振光侧量系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(6): 1431–1435.
- 12 Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, *et al.*. System design and implementation of multi-angle polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828003.
崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计 with 实现[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0828003.
- 13 Yang Zhiwen, Gao Shenggang, Wang Peigang. Polarization of reflected light by earth objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2): 241–245.
杨之文, 高胜钢, 王培纲. 几种地物反射光的偏振特性[J]. *光学学报*, 2005, 25(2): 241–245.
- 14 M Dacke, D E Nilsson, E J Warrant, *et al.*. Built-in polarizers form part of a compass organ in spiders [J]. *Nature*, 1999, 401(6752): 470–473.
- 15 He Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu, *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0101002.
郝增周, 龚芳, 潘德炉, 等. 沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0101002.
- 16 N J Pust, J A Shaw. Wavelength dependence of the degree of polarization in cloud-free skies; simulations of real environments [J]. *Opt Express*, 2012, 20(14): 15559–15568.
- 17 Zhao Kaichun, Lu Hao, You Zheng. Automatic detection system for skylight polarized pattern [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 239–245.
赵开春, 卢皓, 尤政. 天空光偏振模式自动探测装置[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2): 239–245.
- 18 Li Zhanfeng, Wang Shurong, Huang Yu, *et al.*. A method on measurement of Mueller matrix elements for polarization correction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0628001.
李占峰, 王淑荣, 黄煜, 等. 用于偏振修正的穆勒矩阵元素的测量方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0628001.
- 19 M Dacke, M J Byrne, C H Scholtz, *et al.*. Lunar orientation in a beetle [J]. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 2004, 271(1537): 361–365.
- 20 J Gál, G Horváth, A Barta, *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: Atmospheres*, 2001, 106(D19): 22647–22653.
- 21 K L Coulson. *Polarization and Intensity of Light in the Atmosphere* [M]. Hampton: A Deepak Pub, 1988.
- 22 H W Jensen, F Durand, J Dorsey, *et al.*. A physically-based night sky model [C]. *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM, 2001, 399–408.
- 23 H W Jensen, S Premoze, P Shirley, *et al.*. Night Rendering [R/OL]. University of Utah Technical Report (UUCS-00-016), 2000. <http://graphics.ucsd.edu/henrik/papers/night>.
- 24 Xin Gulongyi, Fan Aiyong, Kang Changhe. *Polarized Light* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1994.
新谷隆一, 范爱英, 康昌鹤. *偏振光* [M]. 北京: 原子能出版社, 1994.
- 25 Yao Hongyi. *Research on the Skylight Polarization for the Bionic Micro-Nano Navigation System* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. 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, 2006.

栏目编辑：何卓铭