

基于偏振成像技术的空间大气偏振模式分布获取

张楠 王飞 刘俊 王晨光 李大林 任建斌 薛晨阳 唐军

中北大学电子测试技术国家重点实验室, 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西太原 030051

摘要 根据仿生偏振导航对天空偏振模式信息的需求,设计实现了一种利用具有180°视场的鱼眼镜头构建的偏振成像系统采集天空偏振信息,并将采集得到的平面二维偏振模式经Matlab程序处理后还原为空间偏振模式分布,从偏振成像理论进行分析,并对所需要的实验设备进行标定,得到了实验中鱼眼镜头的成像公式及参数,并对所采集的图像进行视场校正。标定与校正后所得空间偏振模式分布与单次瑞利散射理论模型保持一致,且具有较高的相似度,其中偏振方位角相似度可达82.4%,偏振度相似度可达96.91%。

关键词 成像系统; 偏振光; 偏振模式空间分布; 180°视场; 高相似度

中图分类号 TP311

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.091101

Spatial Distribution Polarization Pattern Acquisition Based on Polarization Imaging Technology

Zhang Nan Wang Fei Liu Jun Wang Chenguang Li Dalin Ren Jianbin
Xue Chenyang Tang Jun

Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, State Key Laboratory of Science and Technology on Electronic Test & Measurement, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract According to the needs of bionic polarized navigation to sky polarization pattern, a polarization imaging system, based on fish-eye lens with the field of view of 180° is designed to gather sky polarization information. Besides, the collected two-dimensional plane polarization pattern through Matlab software processing can revert to the spatial polarization pattern. The polarization imaging theories are introduced. The experimental instruments are calibrated, imaging formula and parameters of fisheye lens are obtained in the experiment. And the images collected by polarization imaging system are corrected in the field of viewing. By using of the calibrated systems and imaging. The spatial polarization pattern after calibration and correction is consistent with the single Rayleigh scattering theory model. And they are in a high degree of similarity, azimuth polarization can reach 82.4%, and the degree of polarization similarity is up to 96.91%.

Key words imaging systems; polarized light; spatial distribution polarization pattern; 180° field of view; high similarity

OCIS codes 110.5450; 170.0110; 260.5430; 290.5855; 310.5448

1 引言

偏振是光的基本特性之一。太阳光进入大气层后在传输过程中,由于大气的散射、辐射和吸收等作用发生了偏振,形成了具有分布规律的偏振模式^[1]。天空的偏振模式与太阳的位置、空气中的粒子成分、天气条件等有密切联系^[2],其蕴含的偏振信息为仿生偏振导航的研究提供重要信息^[3-5]。其中应用天空偏振光分布模式进行仿生偏振导航因在大范围内很难受到人为干扰,且误差不随时间累积的优点而成为近年来的研

收稿日期: 2015-01-15; 收到修改稿日期: 2015-04-10; 网络出版日期: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金培养项目、面上项目、青年基金(91123016,61171056,51105345)、国家重点基础研究发展计划(2012CB723404)、国家杰出青年科学基金(51225504)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划(晋教科[2013]8号)

作者简介: 张楠(1988—),男,硕士研究生,主要从事仿生偏振光导航方面的研究。E-mail: 436026761@qq.com

导师简介: 唐军(1981—),男,博士,副教授,主要从事仿生偏振光导航、微/纳米器件制备等方面的研究。

E-mail: tangjun16@126.com

究热点^[6-7]。

目前,国内外学者在天空偏振光导航方面做了诸多工作。偏振光信息的获取目前有两种方式:1)点源式测量法;2)偏振成像测量法^[8-9]。其中,Lanbrinos等^[10]研制了搭载基于点源式测量法偏振光检测装置的Sahabot型机器人,成功得到了机器人轴在地理坐标系中的方位角,验证了偏振光导航的可行性。国内学者也做了大量相关的研究,大连理工大学褚金奎等^[11-13]根据点源式测量原理,研制了六通道偏振光导航传感器,将其用于移动机器人的导航,实现了精度为0.2°的导航;合肥工业大学田柳等^[14]针对局部天空偏振光信息受天气等因素影响的缺陷,提出利用全天域大气偏振模式分布的对称性来获取导航航向信息,并且对大气偏振模式在载体空间姿态信息获取上的应用做了初步探索^[15]。国内外的研究表明,天空偏振光导航其核心是获取精准的大气偏振模式空间分布并加以利用。因此,获取大气偏振模式空间分布对高精度的天空偏振光导航有重要意义。

本文根据大气偏振模式空间分布测量的需求,构建了180°视场的全天域偏振成像检测系统,并对成像系统进行了标定,将成像系统采集的数据由二维模式还原至空间偏振模式分布,二维模式可提供天空中的点信息,偏振模式空间分布可提供全天域空间矢量信息,为偏振光三维定姿提供更为丰富的信息源。180°成像系统解决了以往系统观测视场小的问题;成像系统的标定减小了系统误差,提高了数据准确性,同时,成像系统的标定为偏振模式从二维模式还原到空间分布模式提供了理论基础,二维模式经Matlab处理后所得的大气偏振模式空间分布与单次瑞利散射理论模型保持一致,且具有较高的相似度^[16-17]。为偏振光导航提供了更为丰富及精准的大气偏振模式空间分布信息。

2 实验平台

2.1 基于斯托克斯矢量的偏振成像原理

斯托克斯矢量被广泛应用于大气偏振探测与遥感领域,任意偏振状态的光波均可以用斯托克斯矢量描述,即 $S=[I, Q, U, V]^T$,其中 I 为部分偏振光的总光强, Q 代表同参考方向平行的线偏振光分量, U 代表同参考方向成45°方向的线偏振光分量, V 代表圆偏振光。由于在大气偏振光测量与研究中,圆偏分量往往可以忽略,因此大多数偏振探测应用中认为 $V=0$,仅研究散射光的线偏振特性。用穆勒矩阵表征光学元件对偏振光的传输特性,即对于一束斯托克斯矢量为 $[I, Q, U, V]^T$ 的入射光和经过光学元件后的斯托克斯矢量 $[I_0, Q_0, U_0, V_0]^T$,两者之间的转换关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

偏振探测系统中的电荷耦合器件(CCD)探测器只能探测入射光线的光强参数,探测器接收到的光强同入射光的斯托克斯矩阵和系统的穆勒矩阵相关,通过改变探测系统穆勒矩阵并测量相应的入射光同过系统后的光强参数,即可以解算出入射光的斯托克斯矢量。采用三组不同方向的偏振片($\psi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$)作为检偏器,则探测器接受到的光强表示为 I_1, I_2, I_3 ,并可以解算出入射光的斯托克斯矢量 I_0, Q_0 和 U_0 ,进而入射光线的偏振角度 γ 可以表示为

$$\gamma_1 = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{I_1 + I_3 - 2I_2}{I_3 - I_1} \right), \quad (2)$$

式中 γ 取值范围为 $[-45^\circ, 45^\circ]$,根据偏振角度定义需要通过几何变换至 $[-90^\circ, 90^\circ]$:

$$\gamma_2 = \begin{cases} \gamma_1, & I_1 > I_3 \\ \gamma_1 + 90^\circ, & (I_1 \leq I_3) \& (I_1 + I_3 < 2I_2) \\ \gamma_1 - 90^\circ, & (I_1 \leq I_3) \& (I_1 + I_3 \geq 2I_2) \end{cases}. \quad (3)$$

对所有采样点来说,上述求解的 E 矢量的偏振角度都是以载体体轴方向为基准,需要将其转换为以被测方向的当地子午线为基准方向

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_2 - \alpha, & -90^\circ \leq \gamma_2 - \alpha \leq 90^\circ \\ \gamma_2 - \alpha + 180^\circ, & -270^\circ < \gamma_2 - \alpha \leq -90^\circ \\ \gamma_2 - \alpha + 360^\circ, & -450^\circ \leq \gamma_2 - \alpha < -270^\circ \end{cases}, \quad (4)$$

式中 α 为载体坐标系下观测方向的方位角, $\alpha \in [0^\circ, 360^\circ]$ 。被测点偏振度(DOP)为

$$d = \frac{\sqrt{(I_1 + I_3)^2 + (I_1 + I_3 - 2I_2)^2}}{I_1 + I_3}. \quad (5)$$

2.2 全天域偏振成像系统

全天域偏振成像计的结构如图1所示,由三个数码/CCD相机、三个内置不同偏振方向偏振片的鱼镜头(sigma EX DC fish-eye, $F=2.8$, 焦距 4.5 mm)构成,安装时每个相机的纵轴线一致。相机感光互补金属氧化物半导体(CMOS)的三色滤镜系统允许探测三个不同波段(红、绿、蓝)下的大气偏振模式,鱼镜头可以提供 180° 视场。三台相机可以利用无线触发装置控制同时采集图像,保证了采集的实时性,每台相机的光圈和曝光参数一致,并且均聚焦到无穷远,可以保证三台相机安装位置的差异不会造成采集图像的显著视场差异。根据前述的偏振信息解算算法,三个镜头后安装的偏振片透光轴方向同参考方向夹角分别设置为 0° 、 45° 、 90° ,每个偏振片的偏振方向均经过标定,避免了因人工转动偏振片产生角度误差影响大气偏振模式探测精度。

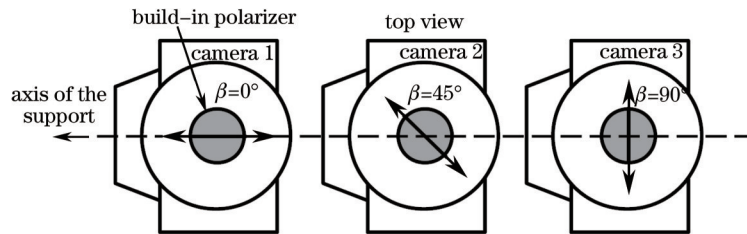


图1 全天域偏振成像系统

Fig.1 Imaging system of whole horizon polarization

采用基于鱼镜头的偏振成像系统,使用的鱼镜头遵循等距投影成像原理。鱼镜头的成像系统如图2所示,物像 P 经过鱼镜头在下方的图像传感器中成像在 Q 点, Q' 为普通镜头成像位置。根据等距投影原理,可得鱼镜头的有效成像面积是一圆形区域。

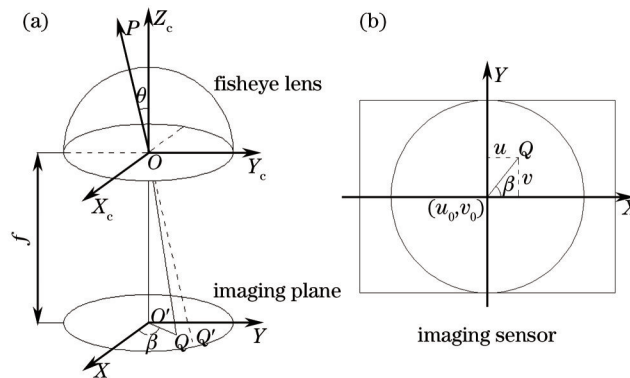


图2 鱼镜头成像系统

Fig.2 Fisheye lens imaging system

大气偏振模式的解算过程需要确定成像系统的中心点和镜头的径向畸变,通过实验的方式来标定以上两个参数。

2.2.1 镜头中心标定

镜头中心坐标 (u_0, v_0) 的标定,采用激光中心标定法。利用常见的激光笔作为激光光源,将镜头固定在光学平台上。

镜头中心标定的光学原理,光线在相机图像传感器上成像,当入射光线与镜头光轴不在同一直线时,将有一部分入射光在镜头表面反射到遮光板处形成反射光斑。因此,通过缓慢调整转台的角度,使反射光斑逐渐靠近挡板的开孔处,此时图像传感器采集得到图像亮点光斑,对此光斑进行质心计算即可得到镜头图像中心点坐标。

通过多组实验,得到镜头中心点的坐标均值为 $(u_0, v_0) = (295, 429)$

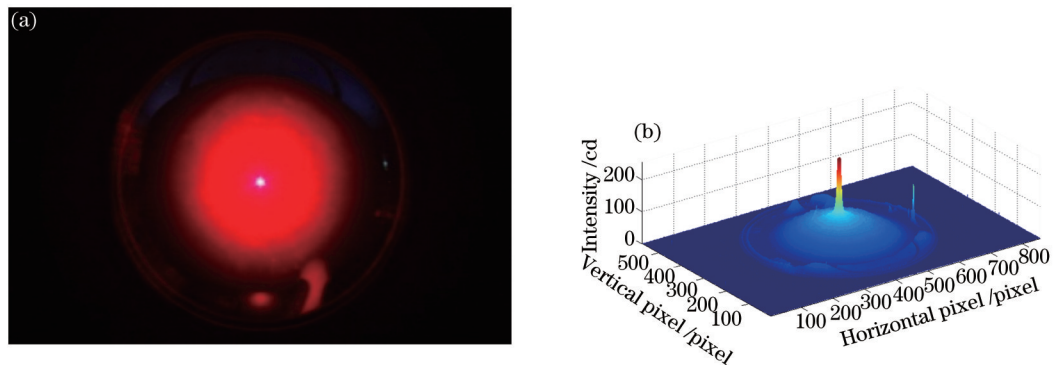


图3 镜头中心点标定实验。(a) 激光入射到图像传感器的图像; (b) 激光入射到图像传感器图像的灰度图

Fig.3 Calibration experiment of the lens center. (a) Image of laser light incident on the image sensor; (b) grey-scale image of laser light incident on the image sensor

2.2.2 成像公式标定

鱼眼镜头成像模型一般分为三种:抛物面投影模型、球面投影模型和多项式逼近模型。其中抛物面投影模型和球面投影模型测试过程复杂,需要确定的参数较多。鱼眼镜头投影成像公式与畸变模型都为多项式,且多项式逼近法具有方法简单的特点,故采用多项式逼近方法来获取鱼眼镜头成像系统的成像公式。

以鱼眼镜头中心点为起始点, $[0^\circ, 90^\circ]$ 范围内以 10° 为间距, 鱼眼镜头为圆心, 定长 R 为半径, 摆放铅笔, 由此得到一组物体与成像坐标的数据, 对此数据进行基于最小二乘法的多项式拟合得到的拟合公式, 即为鱼眼镜头成像的实际成像公式^[18]。

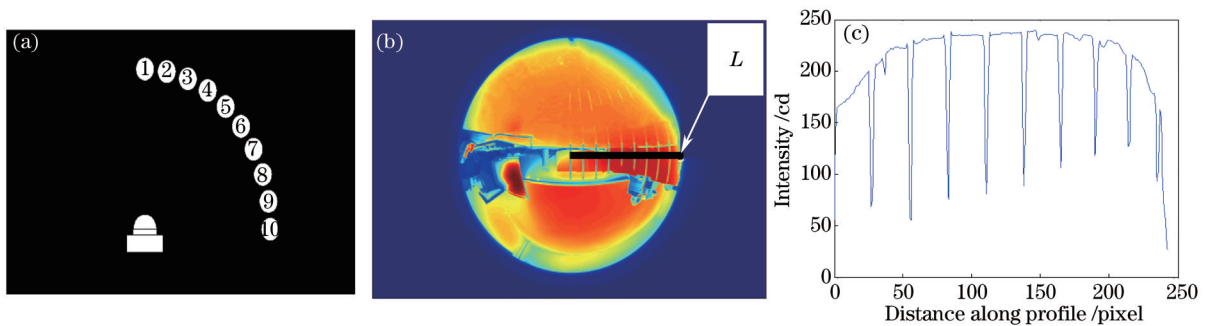


图4 成像公式标定实验。(a) 实验示意图; (b) 实验灰度图; (c) 图(b)中L上的灰度变化图

Fig.4 Calibration experiment of the imaging formula. (a) Schematic diagram of the experiment; (b) grey-scale image of the experiment; (c) gray change image on L of Fig.(b)

表1 成像公式拟合结果

Table 1 Fitting results of imaging formula

Polynomial fitting order	Fitting result	Error of fitting
1	$\theta = 0.3765r - 0.91$	average value: 0.78 maximum value: 2.25
2	$\theta = 0.0001724r^2 + 0.3355r + 0.523$	average value: 0.46 maximum value: 0.91
3	$\theta = 1.5 \times 10^{-6}r^3 - 3.574 \times 10^{-4}r^2 + 0.383r - 0.145$	average value: 0.18 maximum value: 0.31

由表1成像公式拟合结果可知,二阶多项式拟合具备足够的精度,而且拟合阶数过高会引起数据的过拟合,因此选择二阶拟合结果。

3 数据处理过程

数据处理过程主要为偏振图像解算与尺度不变特征转换(SIFT)算法视场校正,程序流程图如图5所示。

3.1 偏振图像解算

偏振成像计输出的三幅偏振图像格式为 $3 \text{ bit} \times 8 \text{ bit}(\text{R,G,B})$, 由于鱼眼镜头聚焦图像 ($R \approx 4.6 \text{ mm}$, 即 256 pixel) 尺寸比 CMOS 传感器 ($22.2 \text{ mm} \times 14.8 \text{ mm}$) 小, 图像处理时需将无效区域裁掉, 相机初始分辨率为 $4272 \text{ pixel} \times 2848 \text{ pixel}$, 在处理过程中为方便计算机处理并提高处理速度, 通过双三次插值将图像分辨率降

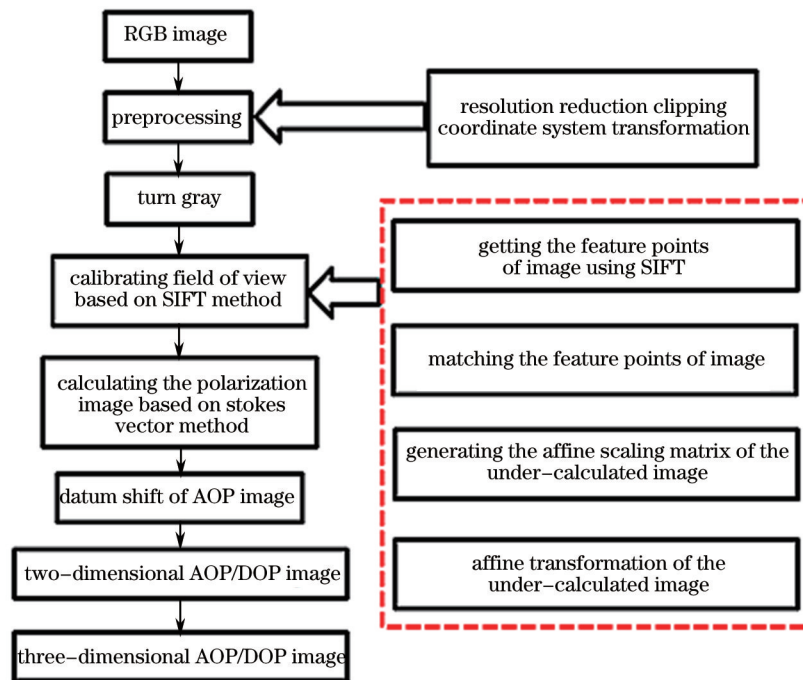


图5 数据处理流程图

Fig.5 Flow chart of data process

低 80%, 即便如此最后得到的全天域偏振图像仍然包含了 20 万以上的采样点, 足以对大气偏振模式进行详细的研究表征, 而且通过插值算法可以滤除图像的部分噪声干扰, 提高图像信噪比。

3.2 基于 SIFT 的视场校正

偏振成像系统使用 0° , 45° , 90° 三个偏振片采集不同偏振方向上的偏振成像, 采集图像时容易造成偏振成像系统的视场差异, 导致系统在进行偏振信息计算时出现误差。因此, 在偏振信息计算时要对采集回的图像进行视场差异校正。需对偏振成像系统采集的图像进行配准^[19]。

利用 SIFT 算法在空间尺度中找到极值点, 提取其尺度、旋转不变量、位置等特征点。使用 SIFT 算法对偏振成像系统所采集的图像配准需以下四步:

- 1) 提取同一时刻 0° 、 45° 、 90° 三个偏振方向图像上的极值点, 并剔除不稳定点和强边缘点;
- 2) 以 0° 偏振方向图像为基础, 分别用 45° 、 90° 偏振方向图像中的特征点与 0° 偏振方向图像中的特征点进行匹配, 得到相应的图像配对点;
- 3) 对上述配对点进行筛选, 剔除错位匹配的点对, 分别计算出 45° 、 90° 偏振方向图像相对于 0° 偏振方向图像的放射变换矩阵;
- 4) 45° 、 90° 偏振方向图像经过仿射变换后, 得到与 0° 偏振方向图像配准后的图像。

利用 SIFT 算法设计了图像视场差异校正算法, 克服了多通道带来的偏振图像质量下降问题。最后通过前面所述斯托克斯矢量法计算得到 d 和 γ 的分布模式图像。

4 测量实验分析

4.1 大气二维偏振模式测试结果

晴朗天气下偏振模式如图 6 所示, 测试时间为 2014 年 12 月 1 日 16:05, 地理坐标为 $38^\circ 0' 54'' \text{N}$, $112^\circ 26' 34'' \text{E}$ 。其中图 6(a) 为测试原图, 图 6(b) 为理论偏振方位角与实测偏振方位角, 图 6(c) 为理论偏振度与实测偏振度, 图 6(d)、(e) 为偏振度和偏振方位角的图例。图中白色圆圈为太阳位置, 白色直线为太阳子午线。

4.2 空间大气偏振模式分布测试结果

为了获取更多的偏振模式信息, 通过图像处理的方式, 将二维偏振分布模式还原到偏振模式空间分布, 晴朗天空下大气偏振模式空间分布如图 7 所示。图 7 为图 6(b) 和 (c) 的偏振模式空间分布表示。图 7 中白色圆圈为太阳位置。

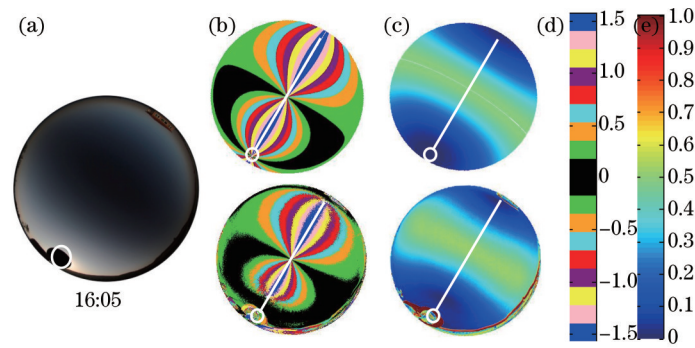


图6 晴朗天空下二维大气偏振模式观测图。(a) 测试原图; (b) 理论偏振方位角与实测偏振方位角; (c) 理论偏振度与实测偏振度; (d) 偏振角图例; (e) 偏振度图例

Fig.6 Observation map of two-dimensional atmospheric polarization pattern under the clear sky.

(a) Original test image; (b) theoretical polarization azimuth angle and measured polarization azimuth angle; (c) theoretical degree of polarization and measured degree of polarization; (d) legend of polarization azimuth angle; (e) legend of degree of polarization

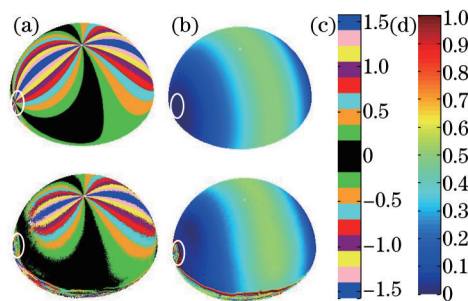


图7 晴朗天气下偏振模式空间分布图。(a) 理论偏振方位角与实测偏振方位角; (b) 理论偏振度与实测偏振度; (c) 偏振角图例; (d) 偏振度图例

Fig.7 Spatial distribution map of atmospheric polarization pattern under the clear sky.

(a) Theoretical polarization azimuth angle and measured polarization azimuth angle; (b) theoretical degree of polarization and measured degree of polarization; (c) legend of polarization azimuth angle; (d) legend of degree of polarization

图7(a)为图6(b)的大气偏振方位角空间分布图。晴朗天气下实测分布图中偏振方位角分布是关于太阳子午线对称的,与理论分布图保持一致;偏振方位角理论分布图中,偏振方位角的值在 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间变化,实测分布图与其保持一致;太阳附近存在一个中心点,偏振方位角实测分布关于中心点处对称。通过实验所得到的晴朗天气下天空偏振模式,与仿真结果高度一致,符合瑞利散射理论。

图7(b)为图6(c)的大气偏振度空间分布图。实测分布图中偏振度分布是关于太阳子午线对称的,与理论分布保持一致;在偏振度理论分布图中,最大偏振度线与太阳子午线成垂直关系,实测分布图与其保持一致;同时实测偏振度模式最大偏振度可达0.5~0.6。

4.3 大气偏振模式空间分布测量实验对比

通过实验所获取的实测大气偏振模式空间分布与理论大气偏振模式空间分布进行对比。表2为09:08到16:22五个不同时刻之间,实测偏振方位角、偏振度空间分布与理论模型之间的相似度对比。

表2 不同时刻偏振方位角、偏振度空间分布测量结果与理论模型之间的相似度对比

Table 2 Similarity comparison between testing and theoretical model of polarization azimuth angle and degree of polarization in different time

Observation time	09:08	10:05	11:03	14:55	16:22
Angle of polarization /%	62.16	58.62	44.4	62.43	63.2
Degree of polarization /%	93.12	88.50	88.41	85.06	76.73

为了定量比较实测结果与理论偏振模型之间的相似性,偏振方位角满足 $|\alpha_m - \alpha| \leq 5\%$ 的点,即为相似点,偏振度满足 $\sqrt{P_m - P} \leq 5\%$ 的点,即为相似点,其中 α_m 、 P_m 代表测量值, α 、 P 代表模型仿真结果。计算得出的实测大气偏振模式空间分布与理论模型偏振方位角的分布相似性为63.2%,偏振度的分布相似性为93.12%。

大气偏振方位角和偏振度空间分布,理论分布图和实测分布图存在一定误差,具体原因有:1) 理论大气偏振模式空间分布是以瑞利单次散射理论构建的。实际的大气散射中,不仅仅只存在瑞利单次散射,同时还存在 Mie 散射,造成了大气偏振模式的多样性。因此,理论值与实测值存在着一定差异;2) 成像系统采用 180° 视场角的鱼镜头进行数据采集,除成像中心点以外,其他点均存在一定的图形畸变,致使实测值存在误差。但参考已有的国内外相关测量结果,实测偏振方位角与偏振度空间分布可以准确描述偏振方位角与偏振度的分布规律,同时具有较高的相似度。

缩小视场角至 130°, 计算得出的实测大气偏振模式空间分布与理论模型偏振方位角的分布相似性为 82.4%, 偏振度的分布相似性为 96.91%。表 3 给出了 09:05 到 16:22 五个不同时刻之间, 实测偏振方位角、偏振度空间分布与理论模型之间的相似度对比。

表 3 视场为 130° 时偏振方位角、偏振度空间分布测量结果与理论模型之间的相似度对比

Table 3 Similarity comparison between testing and theoretical model of polarization azimuth angle and degree of polarization when field of view is 130°

Observation time	09:08	10:05	11:03	14:55	16:22
Angle of polarization /%	81.62	71.52	63.61	81.33	82.4
Degree of polarization /%	96.91	91.82	91.59	87.30	88.02

5 结 论

通过对成像系统的标定与分析, 构建了大气偏振模式空间分布, 晴朗天气下实测分布图中偏振方位角分布模式是关于太阳子午线对称的, 偏振方位角的值在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间变化, 太阳附近存在一个中心点, 偏振方位角实测分布模式在中心点处对称。实测分布图中偏振度分布模式是关于太阳子午线对称的, 最大偏振度线与太阳子午线成垂直关系, 同时实测偏振度模式最大偏振度可达 0.6~0.7。与理论仿真模型保持高度一致, 符合瑞利散射理论。大气偏振模式空间分布实测值具有较高精度。大气偏振方位角空间分布相似度可达 82.4%, 大气偏振度空间分布相似度可达 96.91%。

参 考 文 献

- Horváth G, Barta A, Pomozi I, *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: Biological Sciences, 2011, 366(1565): 772-782.
- Cronin T W, Warrant E J, Greiner B. Celestial polarization patterns during twilight[J]. Appl Opt, 2006, 45(22): 5582-5589.
- Wang Qichao, Zhao Dapeng, Wang Jiachun, *et al.*. Recognition of camouflage targets with multi-spectral polarization detection system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2013, 40(3): 29-34.
王启超, 赵大鹏, 汪家春, 等. 多光谱偏振探测对伪装目标的识别研究[J]. 光电工程, 2013, 40(3): 29-34.
- Sun Xia, Zhao Huijie. Retrieval algorithm for optical parameters of aerosol over land surface from polder data [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1772-1777.
孙 夏, 赵慧洁. 基于 POLDER 数据反演陆地上空气气溶胶光学特性[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1772-1777.
- Zhao Yunsheng, Huang Fang, Jing Lun, *et al.*. Study on polarizing reflectance characteristics of plant simple leaf[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(2): 131-135.
赵云升, 黄 方, 金 伦, 等. 植物单叶偏振反射特征研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(2): 131-135.
- Trager U, Homber U. Polarization-sensitive descending neurons in the locust: Connecting the brain to thoracic ganglion [J]. The Journal of Neuro Science, 2011, 31(6): 2238-2247.
- Higashi Y, Tokunami H, Kimura H. Robot navigation using polarized light sensor without crossed-analyzer[C]. Proceedings 6th Int. Symp. on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2011.
- Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, *et al.*. System design and implementation of multi-angle polarimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 38(8): 0828003.
崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计与实现[J]. 光学学报, 2012, 38(8): 0828003.
- 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.
- 10 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.
- 11 Chu Jinkui, Chen Wenjing, Wang Hongqing, *et al.*. Mobile robot navigation tests with polarization sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(10): 2421-2426.
褚金奎, 陈文静, 王洪青, 等. 2011. 基于偏振光传感器的移动机器人导航实验[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(10): 2421-2426.
- 12 Zhao K, Chu J, Wang T, *et al.*. A novel angle algorithm of polarization sensor for navigation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(8): 2791-2796.
- 13 Zhao Kaichun, Chu Jinkui, Zhang Qiang, *et al.*. A novel polarization angle sensor and error compensation algorithm for navigation[J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(2): 503-509.
赵开春, 褚金奎, 张 强, 等. 新型仿生偏振测角传感器及角度误差补偿算法[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 503-509.
- 14 Tian Liu, Gao Jun, Fan Zhiguo, *et al.*. The method of the navigation direction angle calculation with the distribution of the atmosphere polarization pattern[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(1): 141-146.
田 柳, 高 隽, 范之国, 等. 基于大气偏振模式分布规律的导航方向角计算方法[J]. 电子学报, 2012, 40(1): 141-146.
- 15 Gao Jun, Fan Zhiguo, Wang Xin, *et al.*. Three-dimensional attitude acquisition method based on space characteristics of atmospheric polarization mode: Chinese patent, CN102589544A[P]. 2012-07-18.
高 隽, 范之国, 王 昕, 等. 基于大气偏振模式空间特征的三维姿态获取方法: 中国, CN102589544A[P]. 2012-07-18.
- 16 Wu Lianghai, Zhang Jun, Fan Zhiguo, *et al.*. An analytical model for skylight polarization pattern with multiple scattering [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(11): 114201.
吴良海, 张 骏, 范之国, 等. 多次散射因素影响下天空偏振光模式的解析模型[J]. 物理学报, 2014, 63(11): 114201.
- 17 Wang Ziqian, Zhang Xudong, Jin Haihong, *et al.*. All sky turbid atmospheric polarization pattern modeling based on Monte Carlo method[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1013001.
王子谦, 张旭东, 金海红, 等. 基于 Monte Carlo 方法的混浊大气偏振模式全天域建模[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1013001.
- 18 Wang Jun. Design and Implementation of the Sun Sensor[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
王 俊. 太阳传感器设计实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- 19 Ji Eryou, Gu Guohua, Bai Lianfa, *et al.*. Three-channel polarization imaging systems and system error correction method[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(1): 0111002.
季尔优, 顾国华, 柏连发, 等. 三通道偏振成像系统及系统误差校正方法[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 0111002.

栏目编辑: 苏 岑