

光学学报

成像系统中偏振片初始方向对大气偏振模式测量精度的影响与校正方法

华豆¹, 范之国^{1*}, 金海红^{1,2,3}, 桂策定¹, 韦坤¹

¹合肥工业大学计算机与信息学院, 安徽 合肥 230601;

²安徽建筑大学电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601;

³安徽建筑大学建筑信息获取与测控技术重点实验室, 安徽 合肥 230601

摘要 大气偏振模式为仿生偏振光导航提供方向基准。在大气偏振模式测量系统中,当偏振片透光轴的起始方向与相机的偏振参考轴之间存在偏差角时,测得的大气偏振模式偏振角分布会出现太阳子午线弯曲的现象。为了解决偏差角对大气偏振模式测量产生的影响,通过建立偏差角误差模型,针对偏差角对大气偏振模式测量精度的影响进行了详细的分析;并提出了利用大气偏振模式特征校正偏差角的方法,利用大气偏振模式的中性点和对称性特征获取偏振角分布的最优对称轴,实现对偏差角的校正。实验结果表明,通过对偏差角的校正,能够提高大气偏振模式的测量精度。

关键词 成像系统; 大气偏振模式; 偏振光导航; 偏振成像系统; 太阳子午线弯曲; 中性点

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2211003

Influence of Initial Orientation of Polarizer in Imaging System on Measurement Accuracy of Atmospheric Polarization Pattern and Correction Method

Hua Dou¹, Fan Zhiguo^{1*}, Jin Haihong^{1,2,3}, Gui Ceding¹, Wei Kun¹

¹School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, Anhui, China;

²School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China;

³Key Laboratory of Building Information Acquisition and M & C Technology, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China

Abstract The atmospheric polarization pattern provides an orientation reference for bionic polarized light navigation. Solar meridian bending can be observed in the distribution of the polarization angle in the atmospheric polarization pattern measured when a deviation angle occurs between the initial orientation of the transmission axis of the polarizer and the polarization reference axis of the camera in the measurement system for the atmospheric polarization pattern. To overcome the influence of the deviation angle on the measurement of the atmospheric polarization pattern, this paper presents a model of the deviation angle error and analyzes the influence of the deviation angle on the measurement accuracy of the atmospheric polarization pattern in detail. Then, it proposes a method of correcting the deviation angle by the characteristics of the atmospheric polarization pattern, that is, utilizing the neutral points and symmetry of the atmospheric polarization pattern to obtain the optimal symmetry axis for the distribution of the polarization angle and thereby correct the deviation angle. The experimental results show that the measurement accuracy of the atmospheric polarization pattern can be improved by correcting the deviation angle.

Key words imaging systems; atmospheric polarization pattern; polarized light navigation; polarization imaging system; solar meridian bending; neutral point

收稿日期: 2022-03-17; 修回日期: 2022-04-20; 录用日期: 2022-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(61571177)

通信作者: *fzg@hfut.edu.cn

1 引言

太阳光在经过地球大气层时因大气分子、气溶胶粒子的散射作用会形成具有一定分布规律的偏振光,在全天域内呈现出稳定的偏振态分布模式,称之为“大气偏振模式”^[1-2],这是地球重要的自然属性之一。科学家通过动物行为学和电生理学研究发现,沙蚁、蟋蟀、蝗虫、蝴蝶、蜜蜂等^[3-7]生物均可以通过感知天空偏振光进行导航和定向,这些研究为仿生偏振光导航提供了生物基础,并且大气偏振特性的应用已经广泛存在于导航定位^[8-9]、偏振遥感^[10-11]、天文观测^[12-13]等方面。

在利用大气偏振模式进行导航的研究中,国内外许多学者设计了多种偏振成像系统,并对偏振成像系统开展了标定研究。1997年 Voss 等^[14]针对研制的一种时序天空偏振光检测系统,对系统线性度、光谱响应以及穆勒(Mueller)矩阵表示法中对仪器的表征进行了标定,建立入射光通量、偏振度与仪器输出之间的函数关系。2002年 Horváth 等^[15]针对研制的三相机同时偏振测量系统,对不同相机中偏振片的方向进行标定,三镜头的采用克服了时间延迟带来的误差。2012年 Stürzl 等^[16]针对四相机大气偏振测量系统,将 360°的全景场景标定扩展到多摄像机标定,实现了 4 个鱼眼摄像机获取图像中心位置的标定和相同图像像素间偏移误差的配准。2015年怀宇等^[17]针对其研制的全天域大气偏振模式测量装置进行了标定研究,主要分析了多通道响应非一致性、偏振片的偏振方向、系统的 Mueller 矩阵等参数的标定。2019年闫羽等^[18]针对微偏振阵列成像系统,通过确定像元级响应值与入射光功率的变化关系,实现了消光比等参量的计算,获得各微偏振片的 Mueller 矩阵,完成对微偏振阵列成像系统的标定。2019年 Sun 等^[19]考虑偏振成像系统畸变后的大气偏振模式,研究了这些成像模型中大气偏振模式畸变的程度,并建立了改进模型。2021年王成等^[20]针对全偏振大气偏振模式成像系统,通过分析传输矩阵的特性并建立目标函数,确定了最优系统传输矩阵,并对系统 1/4 波片的延迟量、偏振片的消光比以及传输矩阵进行标定。这些研究对大气偏振模式测量精度的提升都有很大的贡献。

大气偏振模式测量系统中偏振片透光轴的起始方向与相机的偏振参考轴之间存在偏差角,会造成偏振角分布中出现太阳子午线弯曲^[21-24]的现象。为了解决偏差角对大气偏振模式测量精度产生的影响,建立偏差角的误差模型,在仿真条件下分析偏差角对大气偏振模式测量精度的影响,并提出利用大气偏振模式特征校正偏差角的方法,通过大气偏振模式中性和对称性特征,获取偏振角分布的最优对称轴,实现了对偏差角的校正。最后通过实测实验验证校正偏差角方法的有效性和准确性。

2 偏差角建模和误差分析

2.1 偏差角建模

在偏振光学中,Stokes 矢量同 Mueller 矩阵相结合

可以用来表征偏振光在光学元件中透射的传输变化过程。令 S_{out} 为输出偏振光的 Stokes 矢量, S_{in} 为输入偏振光的 Stokes 矢量, M 为 Mueller 矩阵,则一束光在经过偏振器件之后的传输可表示为

$$S_{out} = MS_{in}. \quad (1)$$

Stokes 矢量包含 4 个元素,表示为 $S = [I \ Q \ U \ V]^T$,其中, I 为辐射总光强, Q 为 0° 与 90° 方向上线偏振光的分量之差, U 为 45° 与 -45° 方向上线偏振光的分量之差, V 为圆偏振光强。Stokes 矢量用来描述被测量光波的强度和偏振态,被描述的光可以是完全偏振光、部分偏振光和完全非偏振光。研究表明,大气中的圆偏振分量极少,可以忽略不计,因此 Stokes 矢量可以简化为 $S = [I \ Q \ U]^T$,入射光和出射光的 Stokes 矢量关系为

$$\begin{bmatrix} I' \\ Q' \\ U' \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\theta) & \sin(2\theta) \\ \cos(2\theta) & \cos^2(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) \\ \sin(2\theta) & \sin(2\theta)\cos(2\theta) & \sin^2(2\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: I' 、 Q' 、 U' 为输入偏振光的 Stokes 矢量; θ 为检偏角度。

利用具有三个及以上的不同 θ 角度的偏振光强图像,就能解算出入射光强的 Stokes 矢量。获取三个不同 θ 角度下的偏振光强图像,其光强度分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 ,解算 Stokes 矢量:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = 0.5 \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\theta_1) & \sin(2\theta_1) \\ 1 & \cos(2\theta_2) & \sin(2\theta_2) \\ 1 & \cos(2\theta_3) & \sin(2\theta_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: θ_1 、 θ_2 、 θ_3 为不相等的三个检偏角度; T 为光学系统在笛卡儿坐标系下的传输矩阵,因此 Stokes 矢量为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: K 为求解 Stokes 矢量的转换矩阵。偏振度 P 和偏振角 χ 可分别表示为

$$P = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I}, \quad (5)$$

$$\chi = 0.5 \arctan\left(\frac{U}{Q}\right). \quad (6)$$

偏振片透光轴的起始方向与相机的偏振参考轴之间存在一个偏差角 σ 时,偏振片偏振方向所在的坐标系 xoy 和相机所在的坐标系 $x'oy'$ 也会出现 σ 的偏移(图 1)。

偏振成像系统的 Mueller 矩阵不仅与器件的固有特性(如透过系数)有关,还与其所在坐标系中的位置有关。设偏振器件在笛卡儿坐标系 xoy 中的 Mueller 矩阵为 M ,在笛卡儿坐标系 $x'oy'$ 中的 Mueller 矩阵为 M' ,其中坐标系 $x'oy'$ 是由坐标系 xoy 逆时针旋转 σ 得

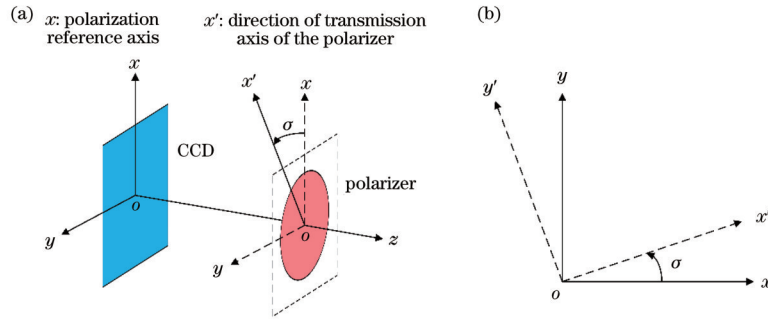


图 1 偏振片和相机之间的位置关系。(a)偏振片和相机之间的三维坐标关系;(b)偏振片和相机之间的二维坐标关系

Fig. 1 Positional relationship between camera and polarizer. (a) Three dimensional coordinate relationship between polarizer and camera; (b) two dimensional coordinate relationship between polarizer and camera

来的,坐标系之间的旋转矩阵 $A(\sigma)$ 为

$$A(\sigma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\sigma) & \sin(2\sigma) \\ 0 & -\sin(2\sigma) & \cos(2\sigma) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

M 和 M' 的关系如下:

$$M' = A(-\sigma)MA(\sigma). \quad (8)$$

存在偏差角 σ 时,获取的三个不同 θ 下的偏振光强图像分别为 I'_1, I'_2, I'_3 , 解算 Stokes 矢量如下:

$$\begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ I'_3 \end{bmatrix} = T' \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = 0.5 \begin{bmatrix} 1 & \cos 2(\theta_1 + \sigma) & \sin 2(\theta_1 + \sigma) \\ 1 & \cos 2(\theta_2 + \sigma) & \sin 2(\theta_2 + \sigma) \\ 1 & \cos 2(\theta_3 + \sigma) & \sin 2(\theta_3 + \sigma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中: T' 为光学系统在 $x'oy'$ 坐标系下的传输矩阵, $T' = TA$, 因此 Stokes 矢量可表示为

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = A^{-1}K \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ I'_3 \end{bmatrix} = K' \begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ I'_3 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

已知 xoy 坐标系和 $x'oy'$ 坐标系的夹角为 σ 时,通过旋转矩阵 A 可以得到 $x'oy'$ 坐标系下解算 Stokes 矢量的转换矩阵 K' , 然后获取天空偏振模式信息。计算过程中忽略了偏差角 σ 时,定义由光强 I'_1, I'_2, I'_3 和转换矩阵 K 得到的 Stokes 矢量为 $[I_{\text{crooked}}, Q_{\text{crooked}}, U_{\text{crooked}}]^T$, 偏振角为 χ_{crooked} , 偏振度为 P_{crooked} , 则有

$$\begin{bmatrix} I_{\text{crooked}} \\ Q_{\text{crooked}} \\ U_{\text{crooked}} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ Q \cos(2\sigma) + U \sin(2\sigma) \\ -Q \sin(2\sigma) + U \cos(2\sigma) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

此时的偏振角和偏振度分别为

$$\chi_{\text{crooked}} = 0.5 \arctan \frac{-Q \sin(2\sigma) + U \cos(2\sigma)}{Q \cos(2\sigma) + U \sin(2\sigma)}, \quad (12)$$

$$P_{\text{crooked}} = \frac{\sqrt{[Q \cos(2\sigma) + U \sin(2\sigma)]^2 + [-Q \sin(2\sigma) + U \cos(2\sigma)]^2}}{I}, \quad (13)$$

化简得

$$\chi_{\text{real}} = \chi_{\text{crooked}} + \sigma, \quad (14)$$

$$P_{\text{real}} = P_{\text{crooked}}. \quad (15)$$

当存在 σ 时获取三个角度下的偏振光强信息,用 xoy 坐标系下的 Mueller 矩阵求得的偏振角为 χ_{crooked} , 用 $x'oy'$ 坐标系下的 Mueller 矩阵求得的偏振角为 χ_{real} , 其中 χ_{real} 可以通过 χ_{crooked} 加上 σ 得到。偏振角分布是关于偏振角为 $\pm 90^\circ$ 的区域,即关于太阳子午线呈对称分布,这种对称关系是对称轴两边的数值和对称轴对应的数值之间的距离是一致的,因此弯曲偏振角分布关于偏振角为 $90^\circ - \sigma$ 的区域呈对称分布。当存在偏差角 σ 时偏振度分布不变。

根据建立的模型对偏振角信息进行仿真,分别在 Rayleigh 散射模型和 libRadtran 辐射传输模型下进行仿真,结果如图 2 所示,可以看到建立的偏差角解析模型能仿真出存在 σ 情况下的偏振角分布,这验证了偏

振角分布中太阳子午线的弯曲现象是真实存在的。

2.2 误差分析

在偏振信息获取过程中,偏振片和相机之间存在偏差角 σ , 会导致获取的偏振角分布出现太阳子午线弯曲的现象。为了定量研究 σ 对偏振角信息的影响程度,首先利用 Rayleigh 模型仿真某一时刻的天空偏振角信息,设置 σ 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的范围内,以 1° 为间隔,仿真出不同 σ 角度下的天空偏振角分布。然后通过设定相应的阈值,提取偏振角为 $\pm 90^\circ$ 的区域,即太阳子午线区域。利用最小二乘的方法拟合出太阳子午线的位置,研究偏差角 σ 对太阳子午线的影响。最后将不存在 σ 时的偏振角仿真信息和不同 σ 下的偏振角仿真信息进行对比,研究偏差角 σ 对整体天空偏振角分布的影响。

由图 3 可知:当 σ 较小时,偏振角分布的太阳子午线弯曲较小;在 $\sigma < 5^\circ$ 时,太阳子午线弯曲不明显,并且

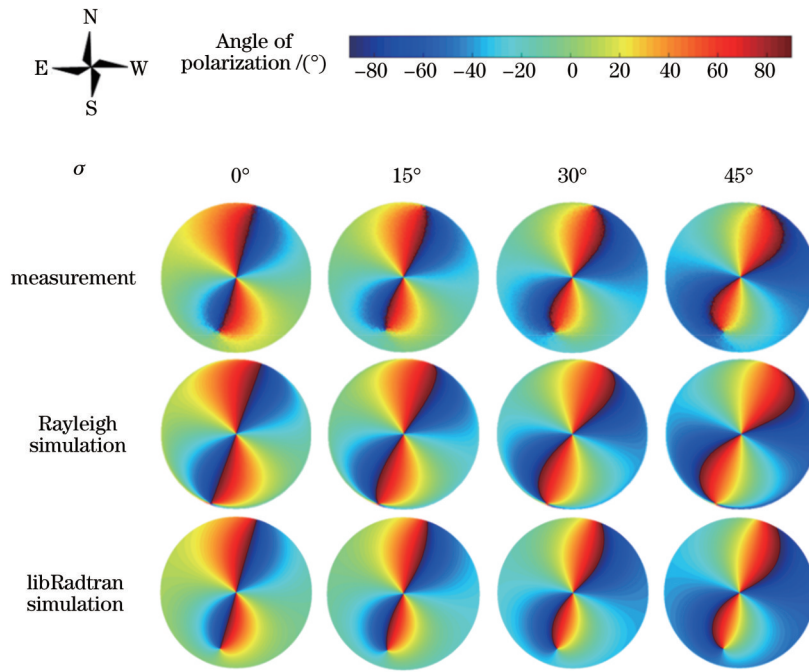


图 2 实测和仿真数据的偏振角信息对比

Fig. 2 Information comparison of polarization angle between measured and simulated data

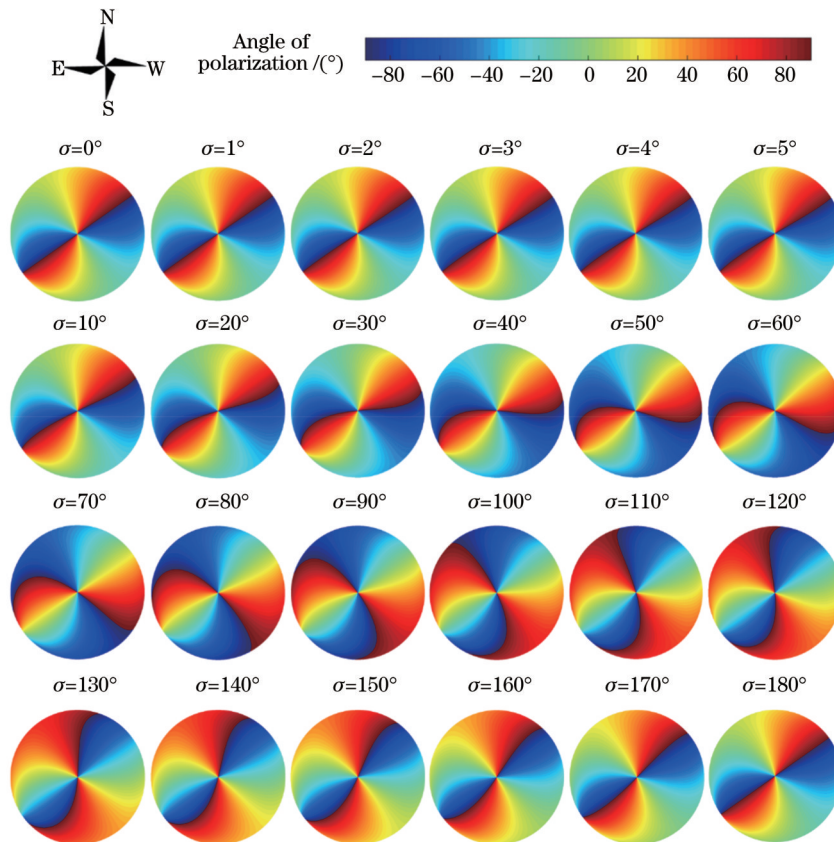


图 3 不同偏差角 σ 对偏振角分布的影响

Fig. 3 Influence of deviation angle σ on distribution of polarization angle

接近于一条直线; σ 逐渐增大时, 太阳子午线的弯曲程度和方位偏差逐渐增大; σ 为 90° 时对偏振角分布的影响程度最大, 并且 σ 对偏振角分布的影响周期为 180° 。

由式(14)可知, σ 会导致整体的偏振角信息发生变化, 在进行数据分析时会出现误差。因此在获取偏振信息时, 需要考虑偏差角 σ 是否存在, 如果存在则需要对获

取装置进行标定。

偏差角 σ 的存在导致全天空的偏振角信息都发生了变化,定义天空偏振角分布对称性的变化程度为 $\Delta\chi$,即不存在 σ 时和存在 σ 时仿真出的天空偏振角信息之差:

$$\Delta\chi = \left| \left| \chi_{\text{real}} \right| - \left| \chi_{\text{crooked}} \right| \right| \quad (16)$$

在偏振角分布的对称性研究中,一般排除极性相反带来的影响,因此,计算 $\Delta\chi$ 时都对偏振角信息进行绝对值运算。通过 $\Delta\chi$ 的均值来定量比较不同 σ 对整体天空偏振角分布对称性的影响,结果如图 4 所示。

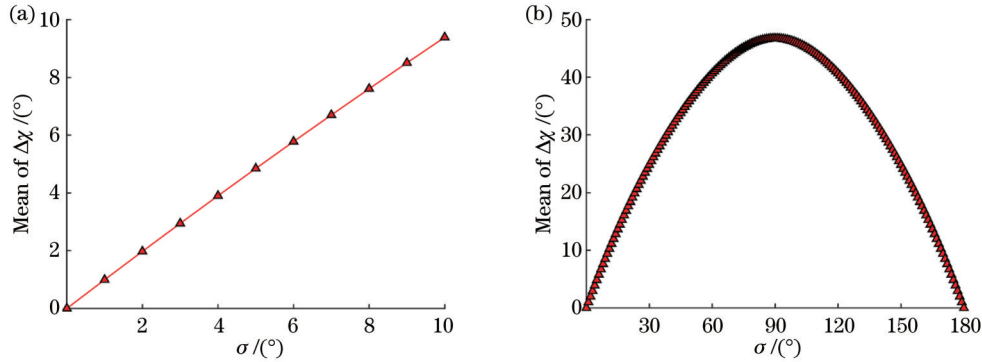


图 4 不同偏差角 σ 对偏振角分布的影响。(a) 偏差角 σ 从 $0^\circ \sim 10^\circ$ 变化时偏振角分布的变化规律;(b) 偏差角 σ 从 $0^\circ \sim 180^\circ$ 变化时偏振角分布的变化规律

Fig. 4 Effect of deviation angle σ on distribution of polarization angle. (a) Variation rule of distribution of polarization angle when deviation angle σ changes from 0° to 10° ; (b) distribution of polarization angle when deviation angle σ changes from 0° to 180°

图 4(a) 显示 σ 较小时,对全天空的偏振角对称性的影响也比较明显,因此在天空偏振角分布规律和特性研究中,对 σ 的精确标定至关重要。图 4(b) 显示了 σ 对全天空的偏振角分布的影响有明显的规律性:在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内, $\Delta\chi$ 的均值逐渐增大;在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 的范围内, $\Delta\chi$ 的均值逐渐减小。其中 $\Delta\chi$ 呈对称分布, σ 对全天空偏振角分布的影响周期为 180° 。

利用偏振角信息获取太阳方位时,利用太阳子午线区域偏振角为 $\pm 90^\circ$ 的特性,可以通过最小二乘的方法拟合出太阳子午线,进而获取太阳的方位信息。通过对偏振角信息进行阈值提取,获取偏振角为 $\pm 90^\circ$ 的区域,阈值提取区域的拟合直线为 $Ax + B - y = 0$,其中 A 为直线的斜率, B 为直线的截距。对于等精度测量所得到的 N 组数据 (x_i, y_i) , $i = 1, 2 \dots N$, x_i 为精确

值, y_i 为观测值,基于最小二乘的理论,需要得到的观测值误差的平方和最小,设定目标函数 F 为

$$F(A, B) = \sum_{i=1}^N (Ax_i + B - y_i)^2 \quad (17)$$

目标函数分别对 A 和 B 求偏导,并令其为零,进一步能求出 A, B 。 σ 的存在导致太阳子午线出现弯曲,拟合出的太阳子午线位置有偏差。通过计算分析 σ 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 时,利用最小二乘方法计算出的太阳方位和仿真条件下实际太阳方位之间的误差关系。

由图 5(a) 可知,在 $\sigma < 5^\circ$ 时,偏振角分布的太阳子午线弯曲程度不明显,但是获取的太阳方位信息会有明显的偏差,误差最大会达到 3° 左右。这样在利用偏振角分布来获取太阳的方位信息时,如果没有消除 σ 带来的影响,即使 σ 很小,也会对求解结果带来较大的

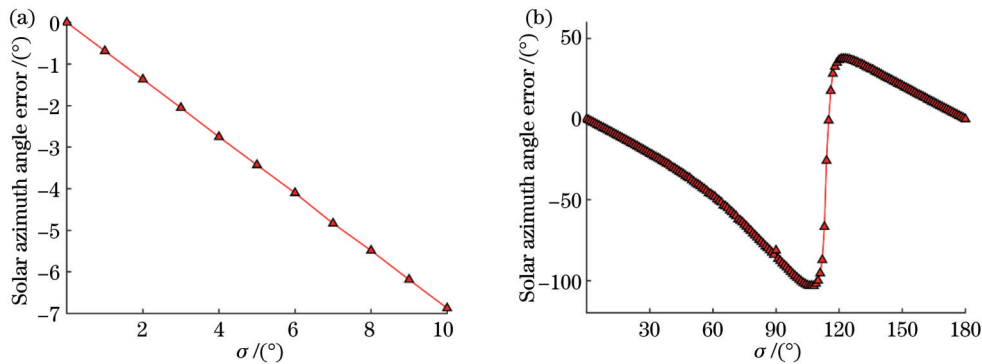


图 5 太阳方位角受偏差角 σ 影响的误差曲线图。(a) σ 在 $0^\circ \sim 10^\circ$ 时计算的太阳方位的误差曲线;(b) σ 在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 时计算的太阳方位的误差曲线

Fig. 5 Error curves of solar azimuth angle affected by deviation angle σ . (a) Error curve of solar azimuth angle when deviation angle σ changes from 0° to 10° ; (b) error curve of solar azimuth angle when deviation angle σ changes from 0° to 180°

误差。由图5(b)可知, σ 对求解太阳方位信息的影响周期为 180° , 考虑到拟合直线的双向性, σ 在 90° 附近时, 计算的太阳方位误差最大。

3 利用大气偏振模式特征校正偏差角的方法

在大气偏振模式测量之前, 对偏振成像系统中偏振片起始放置位置产生的偏移进行标定, 能避免太阳子午线出现弯曲的现象。但是, 在分时旋转型偏振成像系统中, 偏振片的手动放置和旋转很难保证不会出现偏振片方向的偏移。并且在商用的分振幅和分焦平面型偏振成像系统中, 偏振器件在成像系统中是集成的, 偏振器件的安置也会存在偏振方向的偏移问题, 因此需要对测量结果进行校正。

目前大气偏振模式常用的描述参数主要有偏振度和偏振角, 偏振度和偏振角分布中包含中性点和对称性等重要特征。在偏振度分布中, 中性点的偏振度最小且为0, 中性点附近的偏振度以中性点为中心向外逐渐增大, 在观测模式中偏振度分布近似为圆或椭圆, 其等偏振度线以中性点为中心呈环形分布, 中性点还位于太阳和天顶点的主平面上, 因此利用中性点可以获取太阳的方位信息。偏振角分布中存在对称关系, 其对称轴是太阳子午线。

在对偏差角的校正过程中使用大气偏振模式中的中性点和对称性等特征。首先根据式(15)中偏振度不变的特性, 从偏振度分布中找到中性点位置, 进而获取太阳的方位角; 然后通过太阳的大致方位获取偏振角分布中对称轴所在的对称区域, 利用和声搜索(HS)算

法找出偏振角分布中的最优对称轴; 最后根据最优对称轴对应的偏振角计算校正角度 σ' , 并利用偏振角周期为 180° 的特性校正偏振角信息。

在偏振度分布中, 对较小偏振度的分布形态进行椭圆形态拟合, 通过检测拟合椭圆的中心实现对中性点的识别^[25]。首先对偏振度信息进行滤波预处理, 平滑偏振度图像; 然后通过设定相应的阈值提取偏振度较小的中性点区域, 并提取中性点所在区域边缘 P_{edge} ; 最后利用最小二乘椭圆拟合, 获取与 P_{edge} 形态最接近的拟合椭圆。拟合椭圆可表示为

$$F(x, y) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{u} = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f, \quad (18)$$

式中: $\mathbf{a} = [a \ b \ c \ d \ e \ f]^T$, 是椭圆的参数矩阵; $\mathbf{u} = [x^2 \ xy \ y^2 \ x \ y \ 1]^T$ 。最小二乘椭圆拟合是通过最小二乘法寻找一组椭圆参数矩阵 \mathbf{a} , 使数据点与拟合椭圆间的距离最小, 即

$$\hat{\mathbf{a}} = \arg \min_{\mathbf{a}} \left\| \sum_{i=1}^n E(\mathbf{a}, \mathbf{u}_i)^2 \right\| = \arg \min_{\mathbf{a}} \|\mathbf{u}_a\|^2, \quad (19)$$

式中: $\hat{\mathbf{a}}$ 为椭圆拟合的最优参数矩阵; \mathbf{u}_i 为数据采集样本; n 为样本数; \mathbf{u}_a 为求解拟合椭圆最优参数的样本, \mathbf{a} 有6个参数, \mathbf{u}_a 的维度为6。

为避免无效解, 设置条件 $\|\mathbf{a}\| = 1$, 并约束椭圆方程满足 $4ac - b^2 = 1$ 。通过对 $F(x, y)$ 的广义特征值求解, 可获得最小二乘的椭圆拟合方程:

$$x_c = \frac{be - 2cd}{4ac - b^2}, \quad y_c = \frac{bd - 2ac}{4ac - b^2}, \quad (20)$$

式中: (x_c, y_c) 为椭圆中心 C (即中性点 C)的坐标。利用该方法对中性点进行识别, 结果如图6所示。

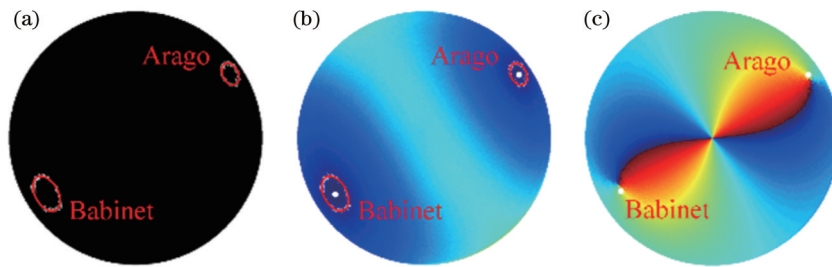


图6 中性点识别结果。(a)中性点所在区域椭圆拟合;(b)偏振度分布中的中性点识别;(c)偏振角分布中的中性点识别

Fig. 6 Identification results of neutral points. (a) Ellipse fitting of region of neutral points; (b) neutral point identification of distribution of degree of polarization; (c) neutral point identification of distribution of angle of polarization

图6(a)为中性点所在区域的边缘椭圆拟合结果, 椭圆形的曲线即为拟合结果。图6(b)为在偏振度分布中的中性点识别结果。图6(c)为偏振角分布中对应的中性点位置。

通过中性点获取太阳方位有一定的误差, 因为中性点是一个区域范围, 因此把中性点方位 $\pm 5^\circ$ 的区域当作弯曲偏振角分布的对称区域, 以排除少量的错误信息, 获取弯曲偏振角分布的对称轴所在的有效区域。通过平均距离体现最小二乘法拟合直线的离散程度 d :

$$d = \sum_{i=0}^n \frac{1}{n} \cdot \frac{|Ax_i + By_i + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \quad (21)$$

式中: n 为拟合点的个数; A, B 为不同时为0的实数, C 为常数项。离散程度 d 的单位为像素。

利用HS算法估计最优对称轴的位置并获取校正角度 σ' , HS算法包括三个基本步骤: 1)初始化和声记忆库(HM); 2)和声向量的生成; 3)更新HM。HS算法的参数有HM的大小[也就是HM中解向量的数量(HMS)]、HM保留率(HMCR)、音高调整率(PAR)、距离带宽(BW)和最大迭代次数(Max I)。其中, 一组

好的参数可以提高算法以较高的收敛速度搜索全局最优或接近最优解的能力。

HS算法的全局优化程度是利用拟合直线的离散程度进行表示,离散程度越小,则拟合的直线越优,把最优拟合直线作为弯曲偏振角分布的对称轴。目前在偏振导航中,偏振角分布的对称轴测量精度大多在 1° 以内,把偏振角有效对称区域范围内以 1° 为间隔的所有数据作为初始化生成的HM,并在初始HM中找到最优解,使后续搜索范围在初始最优解上下 1° 以内,保证了测量精度,并且防止随机初始化HM时导致搜索过程陷入局部最优,产生较大的误差。然后通过记忆

库保留规则更新决策变量 $x_{new}(j)$ 。以PAR的概率进行音调调整,音调调整规则为

$$x'_{new}(j) = x_{new}(j) \pm rB_w, \quad (22)$$

式中: $x'_{new}(j)$ 为迭代后的决策变量; r 为 $0\sim 1$ 之间的均匀随机数; B_w 为BW。

在更新HM的过程中,设置Max I为500,保证搜索过程逐渐收敛,得到最优解,如图7所示。从初始化HM中的数据可以获得一个极小值点,作为初始最优校正角度。然后缩小HS范围,不断迭代搜索:在迭代次数为100左右时,搜索过程收敛;当继续迭代搜索时,最优结果不变或有细微的变化。

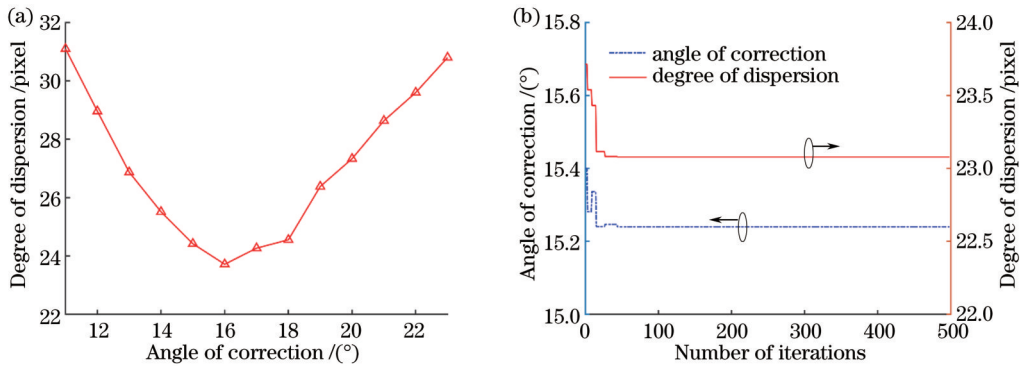


图7 HS结果。(a)初始化HM;(b)迭代搜索结果

Fig. 7 HS results. (a) Initialized HM; (b) iterative search results

当获取最优校正角度 σ' 时,通过式(14)对偏振角信息进行校正,根据偏振角范围为 $-90^\circ\sim 90^\circ$ 的周期性,对校正后的偏振角信息重新进行 ∞ 字形变换,可以得到正常天空下的偏振角信息:

$$\chi_{\text{correction}} = \begin{cases} \chi_{\text{crooked}} + \sigma' - 180^\circ, & \chi_{\text{crooked}} + \sigma' > 90^\circ \\ \chi_{\text{crooked}} + \sigma' + 180^\circ, & \chi_{\text{crooked}} + \sigma' < -90^\circ \end{cases} \quad (23)$$

综上所述,通过校正偏差角获取正常大气偏振模式的过程如图8所示。

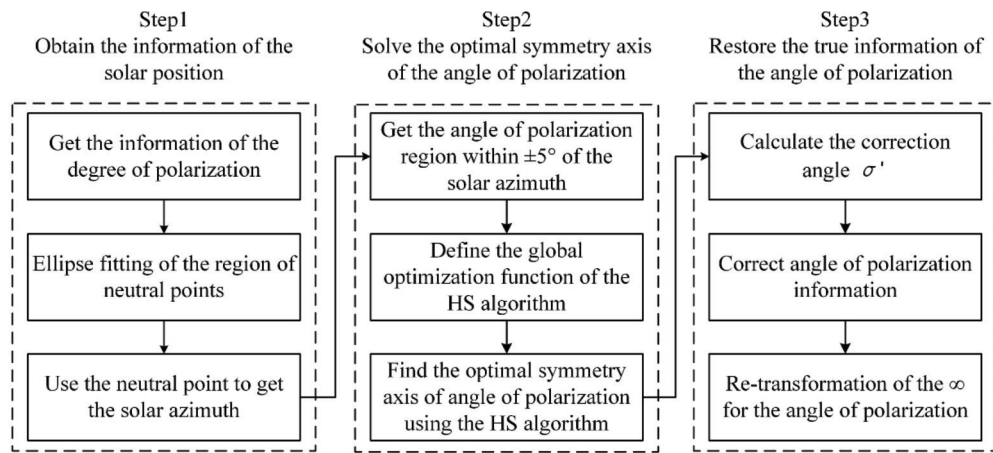


图8 算法流程图

Fig. 8 Flow chart of algorithm

4 实验与分析

4.1 外场实验

大气偏振模式受太阳方位角和高度角的影响,为了进行不同太阳位置下的数据分析,拍摄了全天实验,

实验装置采用全天空分时成像系统,主要由偏振片、Sigma 8 mm F/3.5鱼镜头、尼康D850单反相机组成。鱼镜头的视场角为 142° 。通过旋转偏振片获取 0° 、 60° 、 120° 三个检偏角下的偏振光强图像,进而获得大气偏振模式的分布特性,并对偏振片检偏角分别为

0°、60°、120°时检测装置的 Mueller 矩阵进行标定^[25]。

实验地点为合肥工业大学翡翠湖校区体育馆附近 (31°46′42″N, 117°12′51″E), 实验时间为 2021 年 11 月 27 日 7:00—17:00, 时间间隔为 1 h, 天气晴朗。实验过程中, 当偏振片透过轴的起始位置和相机的偏振参考轴方向一致时, 获取的是检偏角为 0° 的偏振光强图像, 然后旋转偏振片, 以 15° 为间隔依次拍摄检偏角为 0°~180° 的偏振光强图像。在计算大气偏振模式时, 忽略了偏差角 σ 的存在, 因此用标定后的 0°、60°、120° 三个检偏角的 Mueller 矩阵进行计算。偏差角的大小等于计算大气偏振模式时每一组检偏角的起始角度, 当每组检偏角的起始角度为 0°、15°、30°、45° 时, 可以得到偏差角分别为 0°、15°、30°、45° 时对应的不同检偏角, 如表 1 所示。

根据式 (12)、(13), 计算 σ 分别在 0°、15°、30°、45° 时

表 1 偏差角分别为 0°、15°、30°、45° 时对应的检偏角
Table 1 Corresponding angles of declination when angle of deviation is 0°, 15°, 30°, and 45° respectively

Angle of deviation / (°)	Angles of declination / (°)
0	0, 60, 120
15	15, 75, 135
30	30, 90, 150
45	45, 105, 165

的大气偏振模式, 部分偏振模式分布如图 9 所示。

当 σ 不为 0° 时, 天空偏振角分布出现了太阳子午线弯曲的现象。在不同时刻, 偏振角分布出现了相似的弯曲情况, 在同一时刻不同 σ 角度的条件下, 偏振度分布保持不变。由于受到太阳高度角和测量装置视场的影响, 只有 Babinet 中性点会一直出现在相机视场中。

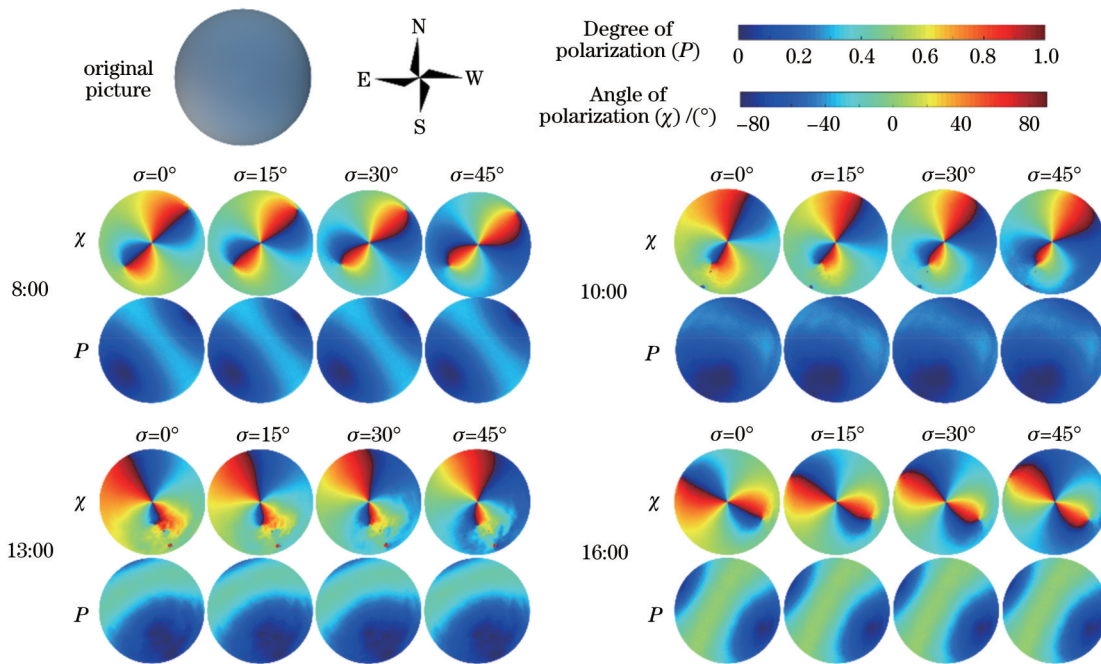


图 9 不同偏差角 σ 下的天空偏振模式分布图

Fig. 9 Distributions of polarized skylight patten at different deviation angle σ

4.2 结果分析

在校正结果分析中, 从两个方面来验证偏差角校正方法的有效性和准确性。首先分析偏差角 σ 和校正角度 σ' 之间的误差 E_{angle} 。然后分析校正后的偏振角信息和真实的偏振角信息之间的相似度 $\chi_{\text{similarity}}$, 校正之后的结果为 $\chi_{\text{correction}}$ 。

$$E_{\text{angle}} = |\sigma - \sigma'|, \quad (24)$$

$$\chi_{\text{similarity}} = \frac{N_{\text{um}}(|\chi_{\text{real}} - \chi_{\text{correction}}| \leq \zeta)}{N_{\text{um, all}}}, \quad (25)$$

式中: $N_{\text{um}}(\cdot)$ 为像素点的个数; $N_{\text{um, all}}$ 为所有的有效像素点点数; ζ 为阈值。

偏振角的周期为 180°, 在相似程度的阈值设定上, 使用周期的 5% 作为阈值 ζ 来判定校正后的偏振角和

真实的偏振角是一致的。

首先在全天实验中, 分别对 σ 在 15°、30°、45° 时的偏振角信息进行校正, 恢复出同一时刻正常情况下的天空偏振角信息。偏振角的部分校正结果如图 10(a) 所示, 校正后的偏振角分布和真实的偏振角分布之间的差值如图 10(b) 所示。

图 10(a) 分别显示了不同时间下偏振角的校正结果, 能明显地看出, 当偏差角 σ 或太阳高度角不同时, 偏振角分布的弯曲程度是不同的, 但是通过对偏差角 σ 的校正, 都能正确恢复出真实的天空偏振角分布。图 10(b) 为部分时刻下真实偏振角和校正之后的偏振角之间的差值信息, 天空真实偏振角和经过校正后的偏振角在大部分天空区域相对一致, 差异主要是在偏振角为 $\pm 90^\circ$ 区域和中性点区域。二者在 $\pm 90^\circ$ 区域极

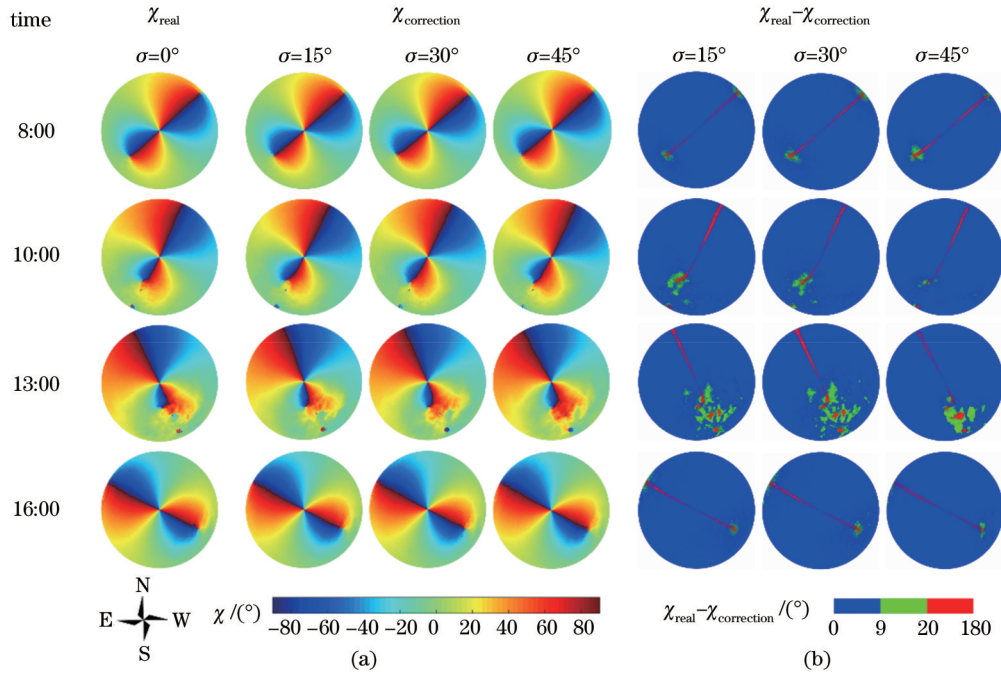


图 10 偏振角校正结果及误差分析。(a)偏振角校正结果;(b)真实的偏振角和校正后偏振角的差值

Fig. 10 Corrected results of polarization angle and error analysis. (a) Results of polarization angle correction; (b) difference between real polarization angle and corrected polarization angle

性相反并且数值差距较大,因此会产生一些像素数值上的偏移,导致计算出的偏振角信息和天空正常偏振角信息不匹配。中性点区域偏振角的数值范围在 $-90^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间,特征比较复杂、难以控制,因此中性点区域的偏振角信息在校正之后和天空真实偏振角信息

差异较大。

通过分析全天实验数据,首先统计了偏差角 σ 和校正之后的校正角度 σ' 之间的误差关系,如图 11(a)所示。然后统计校正后的偏振角信息和真实的偏振角信息之间的相似度,如图 11(b)所示。

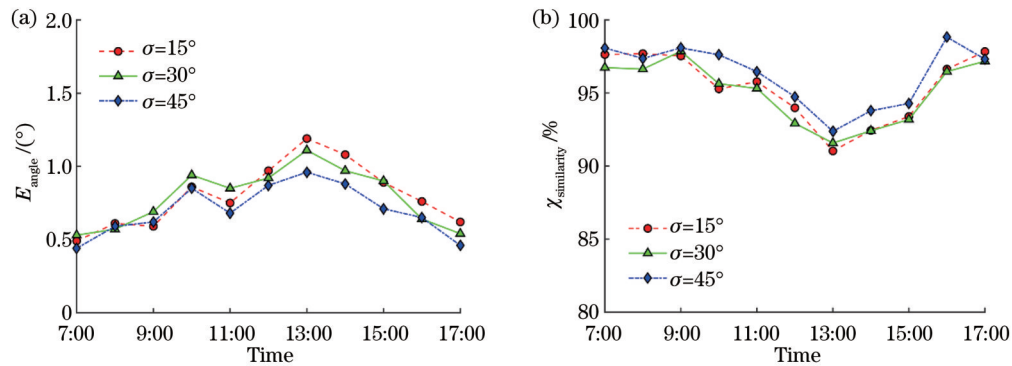


图 11 不同偏差角 σ 时的校正结果。(a)偏差角 σ 的校正误差曲线图;(b)校正后偏振角信息相似度曲线图

Fig. 11 Correction results at different deviation angle σ . (a) Error curves of correction for different deviation angle σ ; (b) information similarity curves of polarization angle after correction

当太阳高度角较大时,偏振角信息受到太阳位置的影响,校正角度误差变大。全天实验数据显示, σ 在 15° 、 30° 、 45° 时,校正角度误差都在 1.5° 以内,其中三个 σ 对应的全天校正角度误差的平均值和方差分别为 0.8009° 、 0.7873° 、 0.7009° 和 0.0484 、 0.0401 、 0.0298 。获取的不存在 σ 下的偏振角信息和经过校正之后的天空偏振角信息的相似度都在 90% 以上。当太阳高度角较大时,太阳位置对天空偏振角信息的影响较大,其影响主要是在太阳子午线和中性点区域。在通过对 σ

进行校正获取的大气偏振模式中,大太阳高度角时刻获取的偏振角信息相似度小于小太阳高度角时刻。在 σ 为 15° 、 30° 、 45° 时,校正之后的偏振角信息相似度的均值和方差分别为 95.38% 、 95.08% 、 96.26% 和 0.0563 、 0.0470 、 0.0448 。通过误差统计分析,可知偏差角的校正方法能根据任意初始偏差角获取正确的校正角度,进而通过校正角度获取天空正常情况下的偏振角信息。

从校正角度的误差曲线和偏振角信息的相似度中

可以看到,在同一时刻不同 σ 下的校正结果比较接近,并且早上和傍晚的结果比较好。因此通过分析 7:00 和 17:00 的实验数据,分别计算 σ 在 $15^\circ\sim 165^\circ$ 的范围内以 15° 为间隔使用偏差角校正方法的校正结果,结果如图 12 所示。

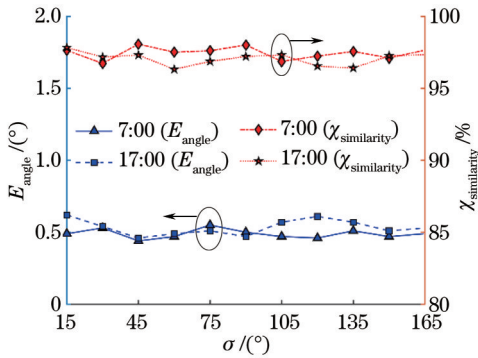


图 12 7:00 和 17:00 时刻不同偏差角 σ 下的校正结果对比
Fig. 12 Comparison of correction results at different deviation angle σ at 7:00 and 17:00

在 7:00 和 17:00 时刻,太阳的高度角都在 1° 左右,因此天空的偏振角信息受到相同太阳高度的影响。从图 12 中可以看出,两个时刻计算的校正角度误差和偏振角信息相似。其中 7:00 获取的校正角度误差的均值和方差分别为 0.4897° 和 0.0010, 获取偏振角信息相似度的均值和方差分别为 97.45% 和 0.1826。17:00 获取的校正角度误差的均值和方差分别为 0.5345° 和 0.0028, 偏振角信息相似度的均值和方差分别为 97.05% 和 0.2148。因此在全天实验数据中,7:00 的数据在偏差角校正方法中有更好的效果。

在相同偏差角 σ 的一组全天数据,由于 σ 角度是固定的,天空偏振角信息的好坏受到太阳位置的影响,导致校正方法的精度受到影响。因此选择偏振角信息最好的一个时刻,利用最优校正角度去校正同一个 σ 下的全天数据。分别选择 σ 为 15° 、 30° 和 45° 的情况,利用 7:00 的校正角度校正全天实验数据,分析校正后偏振角信息的相似度,结果如图 13 所示。

利用 7:00 的校正角度校正全天数据,校正后偏振

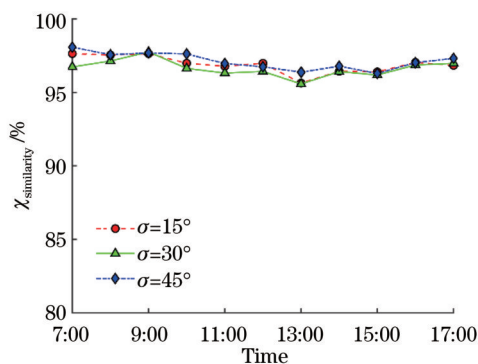


图 13 使用 7:00 的校正角度校正偏振角信息的结果
Fig. 13 Correction results of polarization angle information using correction angle at 7:00

角信息的相似度都在 95% 以上,相比于利用自身时刻获取的校正角度校正偏振角信息,校正后偏振角在太阳高度角较大时有明显的提升。在 σ 为 15° 、 30° 、 45° 时,校正之后的偏振角信息相似度的均值和方差分别为 96.89%、96.63%、97.12% 和 0.3620、0.3204、0.3249,全天校正的结果有明显的提升。

5 结 论

大气偏振模式的偏振角分布关于太阳子午线对称,其中蕴含着丰富的方位信息。在大气偏振模式测量系统中,偏振片透光轴的起始方向与相机的偏振参考轴之间存在的偏差角 σ 会造成太阳子午线弯曲的现象。针对偏差角 σ 影响大气偏振模式测量精度的问题,建立了偏差角的解析模型。存在 σ 时,偏振角分布的对称轴会从原来的 $\pm 90^\circ$ 变为 $90^\circ - \sigma$,全天空偏振角的对称性依然存在,偏振度分布不受 σ 的影响。通过仿真发现 σ 在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 时,太阳子午线的弯曲程度和方位偏差逐渐增大,在 $90^\circ\sim 180^\circ$ 时太阳子午线的弯曲程度和方位偏差逐渐减小,变化周期为 180° ,即使 σ 较小时,对偏振角信息的影响也比较明显。基于偏差角的解析模型,提出了利用大气偏振模式特征校正偏差角的方法。实测实验结果表明,校正偏差角的方法能把偏振角分布的对称区域恢复为 $\pm 90^\circ$,进而获取真实的天空偏振角信息,提高了大气偏振模式的测量精度。因此,对偏振片初始放置位置产生的偏差角 σ 进行标定,能有效地提高偏振信息获取的精度,这在仿生偏振光导航领域具有重要的研究意义。

参 考 文 献

- [1] Brines M L. Dynamic patterns of skylight polarization as clock and compass[J]. Journal of Theoretical Biology, 1980, 86(3): 507-512.
- [2] Gao J, Wang L, Bo M, et al. Information acquisition in desert ant navigation[J]. International Journal of Information Acquisition, 2006, 3(1): 33-43.
- [3] Wehner R, Wehner S. Path integration in desert ants: approaching a long-standing puzzle in insect navigation[J]. Monitore Zoologico Italiano-Italian Journal of Zoology, 1986, 20(3): 309-331.
- [4] Labhart T, Petzold J, Helbling H. Spatial integration in polarization-sensitive interneurons of crickets: a survey of evidence, mechanisms and benefits[J]. The Journal of Experimental Biology, 2001, 204(14): 2423-2430.
- [5] Bech M, Homberg U, Pfeiffer K. Receptive fields of locust brain neurons are matched to polarization patterns of the sky[J]. Current Biology, 2014, 24(18): 2124-2129.
- [6] Mouritsen H, Derbyshire R, Stalleicken J, et al. An experimental displacement and over 50 years of tag-recoveries show that monarch butterflies are not true navigators[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(18): 7348-7353.
- [7] Srinivasan M V. Honeybees as a model for the study of visually guided flight, navigation, and biologically

- inspired robotics[J]. *Physiological Reviews*, 2011, 91(2): 413-460.
- [8] Jin H H, Wang X Q, Fan Z G, et al. Linear solution method of solar position for polarized light navigation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(13): 15042-15052.
- [9] 崔岩, 周鑫昌, 刘亚飞, 等. 基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1701002.
Cui Y, Zhou X C, Liu Y F, et al. Solar meridian extraction method based on Hough transformation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1701002.
- [10] 叶松, 屈文学, 李树, 等. 基于偏振时域特性的海面耀光抑制方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(10): 1001003.
Ye S, Qu W X, Li S, et al. Sea surface glint-suppression method based on the polarization time-domain characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(10): 1001003.
- [11] 张艺蔚, 陶邦一, 毛志华, 等. 海洋水色卫星紫外波段的偏振特性分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0601001.
Zhang Y W, Tao B Y, Mao Z H, et al. Polarization characteristics of ultraviolet bands observed by ocean color satellites[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0601001.
- [12] 邵子奇, 金海红, 钱立进, 等. 基于大气光偏振层析的雾天图像重构方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(22): 221009.
Shao Z Q, Jin H H, Qian L J, et al. Method of haze image reconstruction based on polarization layering and analysis of airlight[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(22): 221009.
- [13] 胡浩丰, 李嘉琦, 李校博, 等. 三自由度偏振差分水下成像技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 0329001.
Hu H F, Li J Q, Li X B, et al. Underwater polarization difference imaging with three degrees of freedom[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0329001.
- [14] Voss K J, Liu Y. Polarized radiance distribution measurements of skylight. I. System description and characterization[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(24): 6083-6094.
- [15] Horváth G, Barta A, Gál J, et al. Ground-based full-sky imaging polarimetry of rapidly changing skies and its use for polarimetric cloud detection[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(3): 543-559.
- [16] Stürzl W, Carey N. A fisheye camera system for polarisation detection on UAVs[M]//Fusiello A, Murino V, Cucchiara R. *Computer vision-ECCV 2012 workshops and demonstrations. Lecture notes in computer science*. Heidelberg: Springer, 2012, 7584: 431-440.
- [17] 怀宇, 范之国, 孙洁, 等. 三通棱镜同时偏振测量系统的标定[J]. *光电工程*, 2015, 42(11): 18-24.
Huai Y, Fan Z G, Sun J, et al. Calibration of the three links prism simultaneous polarization measurement system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(11): 18-24.
- [18] 闫羽, 徐小红, 范之国, 等. 微偏振片阵列型长波红外成像系统定标方法[J]. *光子学报*, 2019, 48(6): 0611004.
Yan Y, Xu X H, Fan Z G, et al. Calibration method of micro-polarizer array long-wave infrared imaging system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(6): 0611004.
- [19] Sun S B, Gao J, Wang D Q, et al. Improved models of imaging of skylight polarization through a fisheye lens[J]. *Sensors*, 2019, 19(22): 4844.
- [20] 王成, 范之国, 金海红, 等. 全偏振大气偏振模式成像系统的设计与优化分析[J]. *物理学报*, 2021, 70(10): 104201.
Wang C, Fan Z G, Jin H H, et al. Design and optimization analysis of imaging system of polarized skylight pattern of full polarization[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(10): 104201.
- [21] Barta A, Farkas A, Száz D, et al. Polarization transition between sunlit and moonlit skies with possible implications for animal orientation and Viking navigation: anomalous celestial twilight polarization at partial moon[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(23): 5193-5204.
- [22] Chen Y T, Zhang R, Lin W, et al. Design and construction of real-time all-polarization imaging detector for skylight[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 816-824.
- [23] Yang Y T, Hu P W, Yang J, et al. Clear night sky polarization patterns under the super blue blood moon[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(4): 372.
- [24] Ahsan M, Cai Y Z, Zhang W D. Information extraction of bionic camera-based polarization navigation patterns under noisy weather conditions[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University (Science)*, 2020, 25(1): 18-26.
- [25] 王子谦, 范之国, 金海红, 等. 基于大气偏振模式全局特征的中性点识别方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(7): 0701001.
Wang Z Q, Fan Z G, Jin H H, et al. Neutral points recognition based on the atmospheric polarization pattern's global characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(7): 0701001.