中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

仿生偏振光罗盘太阳位置检测方法

杨江涛 王明凯 刘思拓 梁磊 刘志 郭越

Detection method of solar position using a biomimetic polarized light compass

YANG Jiang-tao, WANG Ming-kai, LIU Si-tuo, LIANG Lei, LIU Zhi, GUO Yue

引用本文:
杨江涛, 王明凯, 刘思拓, 梁磊, 刘志, 郭越. 仿生偏振光罗盘太阳位置检测方法[J]. 中国光学, 2024, 17(3): 548-559. doi: 10.37188/CO.2023-0192
YANG Jiang-tao, WANG Ming-kai, LIU Si-tuo, LIANG Lei, LIU Zhi, GUO Yue. Detection method of solar position using a biomimetic polarized light compass[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 548-559. doi: 10.37188/CO.2023-0192

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2023-0192

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于大气多次散射的波浪水下偏振模式研究
The polarization mode of underwater waves based on atmospheric multiple scattering
中国光学（中英文）. 2023, 16(6): 1324 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0223

偏振光在椭球细粒子中多次散射传输特性
Multiple scattering transmission characteristic of polarized light in ellipsoidal fine particles
中国光学（中英文）. 2023, 16(2): 348 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0144

斜程湍流大气中部分相干艾里光束的偏振特性研究
Polarization changes of partially-coherent Airy-Gaussian beams in a slanted turbulent atmosphere
中国光学（中英文）. 2021, 14(2): 409 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0095

基于深度学习的空间脉冲位置调制多分类检测器
Spatial pulse position modulation multi-classification detector based on deep learning
中国光学（中英文）. 2023, 16(2): 415 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0106

大气气溶胶消光后向散射比反演方法研究
Retrieval methods for extinction-to-backscatter ratio of atmospheric aerosols
中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1305 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0135

基于AsP/MoS_2异质结的偏振光电探测器
A polarization-sensitive photodetector based on a AsP/MoS_2 heterojunction
中国光学（中英文）. 2021, 14(1): 135 https://doi.org/10.37188/CO.2020-0189

文章编号　2097-1842(2024)03-0548-12

仿生偏振光罗盘太阳位置检测方法

杨江涛[1,2*], 王明凯[1,2], 刘思拓[1,2], 梁　磊[1,2], 刘　志[1,2], 郭　越[1,2]
（1. 太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024;
2. 太原科技大学 先进控制与装备智能化山西省重点实验室, 山西 太原 030024）

摘要: 针对偏振光导航对天空中特征点精确位置信息的需求, 提出一种基于全天域偏振模式成像系统对太阳位置进行精确检测的方法。与传统的基于光斑的太阳位置检测方法相比, 该方法利用大气中固有的偏振信息完成对太阳位置的精确测量, 具有检测方法简单、精度高且适用范围广等特点。搭建的光学采集系统由三个微小型的大视场摄像头模组和偏振片构成, 使得结构更加紧凑, 体积更小, 高度更低。从原理出发, 仿真分析太阳位置求解算法, 采用搭建的光学采集系统对本算法在 3 种天气(晴天、遮挡、气溶胶)环境下进行验证。结果显示: 当天气晴朗时, 在同一天不同时刻, 测量的太阳高度角和方位角的精度分别为 0.024°和 0.03°; 当太阳被高层建筑物遮挡时, 太阳的高度角和方位角的测量精度分别为 0.08°和 0.05°; 当太阳被树木的枝叶遮挡时, 太阳的高度角和方位角的测量精度分别为 0.3°和 0.1°。研究发现当气溶胶的浓度超过一定量时就会破坏偏振光的 Rayleigh 分布模式, 进而会影响太阳位置的检测精度。实验结果表明, 这种新型的检测方法不仅能够满足偏振光导航对太阳位置精确信息的需求, 还能为喜欢探索宇宙奥秘的爱好者提供一种新的探索思路。

关　键　词: 大气光学; 大气偏振模式; 太阳空间位置; 光学 CCD
中图分类号: P401;Q241.2　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2023-0192

收稿日期: 2023-12-22; **修订日期:** 2024-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61905172); 山西省基础研究计划面上项目(No. 202303021211169); 太原科技大学研究生教育改革研究项目(No. JG2022009); 山西省科技创新人才团队(No. 202304051001035); 太原科技大学研究生创新项目(No. SY2022018); 山西省科研实践创新类项目(No. 2023KY649)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61905172); Shanxi Province Basic Research Program General Project (No. 2023030211169); Research Project on Graduate Education Reform at Taiyuan University of Science and Technology (No. JG2022009); Shanxi Provincial Science and Technology Innovation Talent Team (No. 202304051001035); Graduate Innovation Program of Taiyuan University of Science and Technology (No. SY2022018); Scientific Research Practice Innovation Project of Shanxi Province (No. 2023KY649)

Detection method of solar position using a biomimetic polarized light compass

YANG Jiang-tao[1,2 *], WANG Ming-kai[1,2], LIU Si-tuo[1,2], LIANG Lei[1,2], LIU Zhi[1,2], GUO Yue[1,2]

（1. *School of Electronics Information Engineering*, *Taiyuan University of Science & Technology*, *Taiyuan* 030024, *China*;

2. *Shanxi Key Laboratory of Advanced Control and Equipment Intelligence*, *Taiyuan University of Science & Technology*, *Taiyuan* 030024, *China*）

∗ *Corresponding author*, *E-mail*: *yangjiangtao*6567@*tyust.edu.cn*

Abstract: Aiming at the requirement of polarized light navigation for accurate position information of feature points in the sky, an accurate detection method for the solar position of imaging system based on all sky polarization mode is proposed. Compared with the traditional detection method of the solar position based on spot, we use the inherent polarization information in the atmosphere to complete the accurate measurement of the solar position, which has the characteristics of simple, high accuracy and wide application range. The optical acquisition system consists of three micro large-field-of-view camera modules and polarizers, which makes the structure more compact, smaller and lower in height. Starting from the principle, the algorithm of solving the solar position is simulated first, and then the algorithm is verified in three weather environments (sunny, occluded, and aerosol) using the optical acquisition system. It can be seen that when the weather is clear, the sun is detected at different times of the same day, and the accuracy of the measured sun's altitude and azimuth are 0.024° and 0.03° respectively; when the sun is blocked by high-rise buildings, the accuracy of the measured sun's altitude and azimuth are 0.08° and 0.05°; when the sun is blocked by the branches and leaves of trees, the accuracy of the measured sun's altitude and azimuth are 0.3° and 0.1° respectively. Only when the aerosol concentration exceeds a certain amount will the Rayleigh distribution mode of polarized light be destroyed, which will affect the detection accuracy of solar position. The experimental results show that this new detection method can not only meet the needs of polarized light navigation for the solar position, but also provide a new way of exploration for fans who like to explore the mysteries of the universe.

Key words: atmospheric optics; atmospheric polarization mode; solar position; optical CCD

1　引　言

太阳作为天空中最显著的一个特征点，通过一定的方法和手段解算出太阳在一天中精确的空间位置逐渐成为偏振光导航领域中的热门研究方向。传统的太阳位置解算方法主要有利用天文历求解太阳位置和通过视觉检测太阳光斑[1-3]两大类，包括：纬度定位跟踪法、太阳光强跟踪法，五点法跟踪等[4-5]。第一类方法求解太阳位置的前提是有较高精度的时间信息，这种方法的局限性在于只能定时定点地采集太阳的信息，一旦发生地理位置或时间改变时，解算得到的太阳位置信息与实际的太阳位置将会出现较大的偏差。此外，太阳时角受地理位置的限制，需要重复校准导致其在导航领域应用的效率降低。另一类方法虽然摆脱了时间和位置的限制，但是视觉法对太阳光斑信息质量要求比较严格，需对大量的无序数据进行处理从而将理想光斑与其他信息区分开，因此必须经过多次的滤波处理，这样不但会破坏

原始信息，还比较繁琐。目前亟需突破这两类太阳空间位置获取方法的局限性，以适应当今导航的快速发展。

受到大气粒子散射和地表的返照吸收作用，太阳光穿过大气层照射到地球表面时会形成大气偏振模式[6-7]。大气偏振模式含有丰富的偏振信息，这些信息具有固定的属性，可为偏振光导航提供非常重要且稳固的参考信息[8-10]。因此，越来越多的国内外专家学者投身于对大气偏振模式的研究[11-12]。2003 年，国外的 Lambrinos D 教授成功研制了 Sahabot 偏振导航机器人，他通过对大气偏振模式的信息解算，成功获取到机器人的方位角，首次验证了利用大气偏振模式进行定向的可行性[13]。在国内也相继涌现出一批研究大气偏振模式的学者[14-20]，大连理工大学的褚金奎团队通过制作的偏振光传感器率先成功实现了精度为 0.2°机器人导航[15-17]；合肥工业大学高隽团队前期通过挖掘大气偏振模式的分布连续性，获取了全天域的大气偏振模式[18-20]，为后期偏振光导航在国内的发展奠定了一定的基础。

通过查阅相关文献，在现有研究成果的基础上，本文提出了一种基于全天域偏振模式成像系统对太阳位置进行精确检测的方法。通过建立的大气偏振模型，利用 Rayleigh 理论对偏振角与太阳构成的球面三角形进行反解与多次迭代求得太阳的空间位置信息，然后利用搭建的光学采集系统在各种天气环境下对本算法进行了验证。

2 大气偏振信息测量方法

本文搭建的测试系统主要包括微小型光学 CCD、型号为 RP-L220 的鱼眼镜头（由 entaniya 公司生产）、3 个检偏方向分别为 0°，45°，90°的偏振片（可获取不同方向的偏振光强度）、上位机等。系统示意图如图 1 所示，CCD 采集的偏振信息通过上位机处理后可得到 3 个方向的敏感矢量。搭建测试系统时，为了保证图像采集的实时性，采用同步控制模块对 3 个 CCD 进行控制。校准鱼眼镜头，确保光圈和曝光参数一致，以避免视场差异带来的误差。须对 3 个方向的偏振片进行标定以避免人工转动带来的误差。

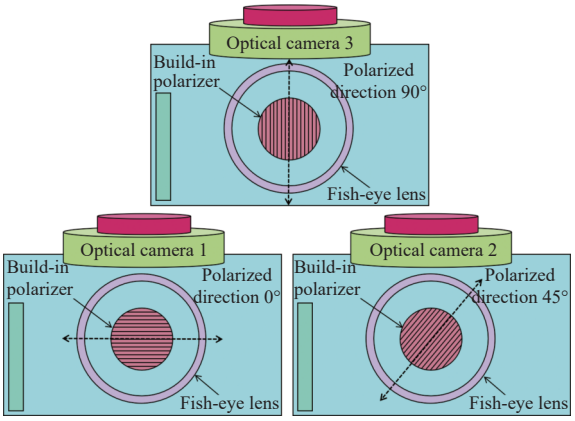


图 1 三通道偏振成像系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the three-channel polarization imaging system

测试系统搭建时，由于装配误差等因素的存在，使得鱼眼镜头的光轴同光学 CCD 的中心并不重合，而是存在一定的偏差，因此需要对测试系统的成像中心点进行标定。权衡考虑实验平台搭建的便捷性和标定精度要求，本文采用激光中心标定法进行标定。具体方法为：利用激光器作为点光源，将鱼眼镜头安装在转台上，同时在激光器前方安放一个带有小孔的遮光板，标定平台示意图如图 2 所示。

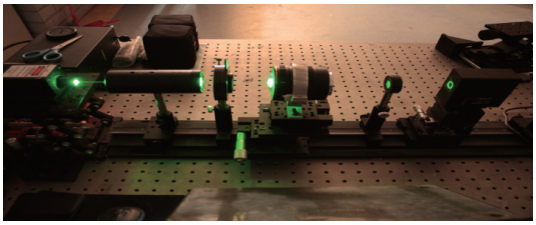


图 2 标定系统图

Fig. 2 Calibration system

激光通过遮光板的小孔进入鱼眼镜头，进而在光学 CCD 上成像。当入射光线与镜头的光轴不在同一条直线时，会有部分光线在镜头的表面发生反射，从而在遮光板上形成反射光斑。通过调整镜头的角度和位置，使反射光斑同挡板的开孔重合，此时光学 CCD 采集到的图像中的亮点即为鱼眼镜头的成像中心。

大气偏振测量中，任意一束光波均可采用 Stokes 矢量描述，即 $[I, Q, U, V]$，其中 I 代表部分偏振光的总光强，Q 和 U 分别代表 0°和 45°方向的线偏振光分量，V 表示圆偏振光，除了研究散射光偏振特性外，通常 V 忽略不计。

通过 3 个不同方向的偏振片采集到的不同光强分别表示为I_1, I_2, I_3, 则偏振度 DOP 可通过式(1)计算:

$$DOP = \frac{\sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_1 + I_3 - 2I_2)^2}}{I_1 + I_3} \quad . \qquad (1)$$

通过解算的 DOP 便可得到大气偏振度在整个天空中的分布。

3　方　法

3.1　太阳位置求解方法

建立的大气偏振模式模型如图 3 所示, 其中圆点代表观测者的位置, P 点和 $\boldsymbol{S}$ 点分别表示被观测点和太阳位置, h和h_s分别表示被观测点和太阳的高度角。α和α_s分别表示被观测点和太阳方位角。

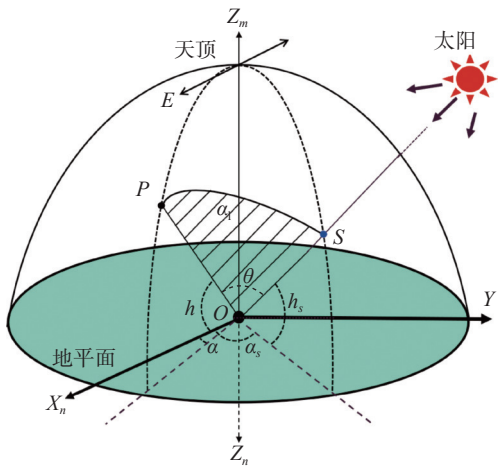


图 3　坐标示意图

Fig. 3　Coordinate diagram

当太阳光通过 Rayleigh 散射后到达观测者的眼睛, P 点的偏振度$P(\theta)$可通过公式(2)进行解算:

$$P(\theta) = \frac{1-\cos^2\theta}{1+\cos^2\theta} P_{\max} \quad , \qquad (2)$$

式中$P_{\max}$表示最大偏振度。

观察由 Z、P、S 三点构成的球面三角形, 根据球面余弦定理可得式(3):

$$\cos\theta = \sin h \sin h_s + \cos h_s \cos h_s \cos(\alpha_s - \alpha). \qquad (3)$$

将式(2)和式(3)联立后进行解算, 可得出散射光的偏振度$P = DOP(h_s, \alpha_s, h, \alpha)$。

将被测点偏振 $\boldsymbol{E}$ 矢量方向同所在子午线的夹角定义为偏振角。根据 Rayleigh 散射定律, 点 P 处的 $\boldsymbol{E}$ 矢量为:

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{v}\cos\gamma + \boldsymbol{h}\sin\gamma \quad , \qquad (4)$$

其中, $\boldsymbol{v} = (-\cos h\cos\alpha, -\cos h\sin\alpha, \sin h)$, $\boldsymbol{h} = (-\sin\alpha, \cos\alpha, 0)$。当太阳的空间位置为$(h_s, \alpha_s)$时, 偏振角$\gamma$为:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\sin h\cos h_s - \cos h\sin h_s\cos(\alpha_s - \alpha)}{\sin(\alpha_s - \alpha)\sin h_s}\right). \qquad (5)$$

将偏振角和偏振度用瑞利模型分别表示为$\gamma = AOP(\boldsymbol{S}, h, \alpha)$和$P = DOP(\boldsymbol{S}, h, \alpha)$, 其中 $\boldsymbol{S}$ 表示太阳矢量, 为$S = (h_s, \alpha_s)^{\mathrm{T}}$。将被测点的方位信息和偏振信息代入偏振度公式可得式(6)和式(7), 如下:

$$P_i = DOP(\boldsymbol{S}, h_i, a_i), i = 1, 2, \cdots, n \quad , \qquad (6)$$

$$\gamma_i = AOP(\boldsymbol{S}, h_i, a_i), i = 1, 2, \cdots, n \quad , \qquad (7)$$

其中太阳矢量 $\boldsymbol{S}$ 包含两个未知数。由于测量的信息点远大于 2, 因此上述方程组为无法直接求解的超定方程组, 本文采用数值方法对超定方程组进行求解。下面以式(6)为例, 采用最小二乘原理对式(6)构造评价函数:

$$f(S) = \sum_{i=1}^{n} [DOP(\boldsymbol{S}, h_i, a_i) - P_i]^2 = \frac{1}{2}\|\boldsymbol{F}(\boldsymbol{S})\|_2^2, \qquad (8)$$

其中, $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{S}) = [f_1(\boldsymbol{S}) f_2(\boldsymbol{S}) \cdots f_n(\boldsymbol{S})]^{\mathrm{T}}$, 通过高斯-牛顿法对上式进行求解, 形成的迭代公式如下:

$$\left(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{S}_k)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}(\boldsymbol{S}_k)\right)\Delta\boldsymbol{S}_k = -\boldsymbol{J}(\boldsymbol{S}_k)\boldsymbol{F}(\boldsymbol{S}_k) \quad , \qquad (9)$$

$$\boldsymbol{S}_{k+1} = \boldsymbol{S}_k + \Delta\boldsymbol{S}_k \quad , \qquad (10)$$

其中, $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{S}_k)$为$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{S}_k)$的雅克比矩阵, 即

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{S}_K) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\boldsymbol{S}_k)}{\partial \boldsymbol{S}_k(1)} & \frac{\partial f_2(\boldsymbol{S}_k)}{\partial \boldsymbol{S}_k(1)} & \cdots & \frac{\partial f_n(\boldsymbol{S}_k)}{\partial \boldsymbol{S}_k(1)} \\ \frac{\partial f_1(\boldsymbol{S}_k)}{\partial \boldsymbol{S}_k(2)} & \frac{\partial f_2(\boldsymbol{S}_k)}{\partial \boldsymbol{S}_k(2)} & \cdots & \frac{\partial f_n(\boldsymbol{S}_k)}{\partial \boldsymbol{S}_k(2)} \end{bmatrix} . \qquad (11)$$

多次迭代的具体过程为:

太阳位置的多次迭代算法

计算太阳的空间位置: $\boldsymbol{S}=(h_s,\alpha_s)$

当 $k=0$时

选取初始值 $\boldsymbol{S}_0$

选择迭代终止条件 $\varepsilon>0$, 且为一个很小的常数

确定最大迭代次数

计算雅可比矩阵:

使用公式(11)计算雅克比矩阵 $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{S}_k)$

将$\Delta(\boldsymbol{S}_k)$代入式(9)中的雅克比矩阵$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{S}_k)$

$\boldsymbol{g}_k=\boldsymbol{J}(\boldsymbol{S}_k)\boldsymbol{F}(\boldsymbol{S}_k),\boldsymbol{S}_{k+1}=\boldsymbol{S}_k+\Delta\boldsymbol{S}_k$

如果 $\|\boldsymbol{g}_k\|<\varepsilon$, 或者 $k>n$, 迭代停止

输出 $\boldsymbol{S}_k$

结束

通过式(10)计算 $\boldsymbol{S}_{k+1}$

迭代继续

如果 $\|\boldsymbol{g}_k\|\geqslant\varepsilon$, 或者 $k\leqslant n$

令$k=k+1$

计算雅克比矩阵

...

直到 $\|\boldsymbol{g}_k\|<\varepsilon$, $k>n$, 然后计算 $\boldsymbol{S}_k$

结束

计算 h_s, α_s

算法的具体流程图如图 4 所示。通过以上步骤即可由测量的偏振角计算出太阳的空间位置 $\boldsymbol{S}=(h_s,a_s)$。

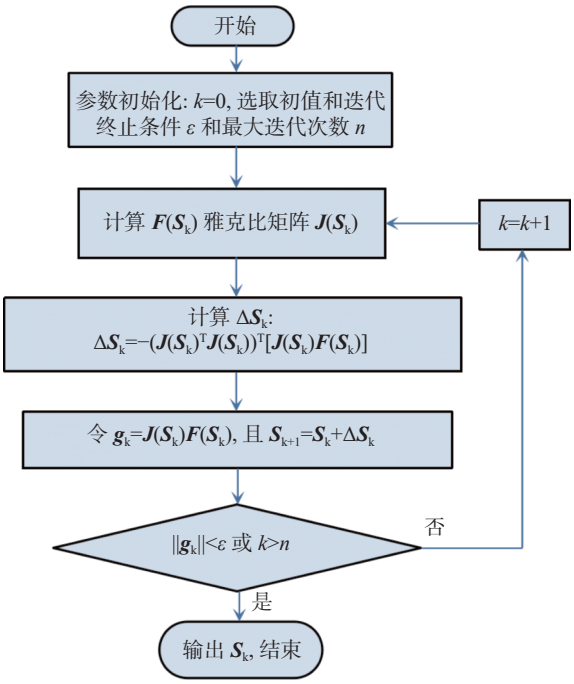


图 4 太阳矢量敏感算法流程图

Fig. 4 Flowchart of sun vector sensitivity algorithm

3.2 姿态角计算方法

以参考系的原点作为观测点，X 轴、Y 轴、Z 轴分别指向正南、正西、天顶。载体的初始状态与导航坐标重合，所有轴向转动方向都为逆时针方向。转动方向如图 5 所示。

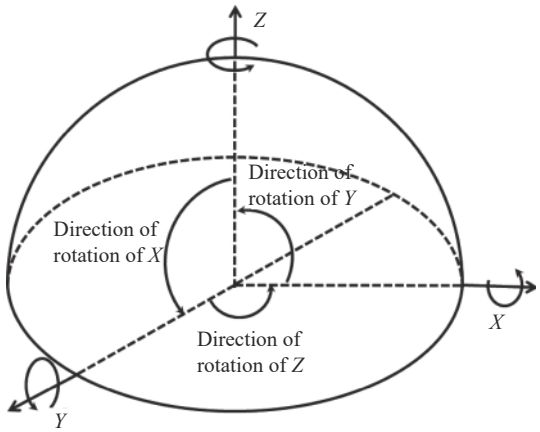


图 5 转动方向示意图

Fig. 5 Schematic diagram of rotation direction

在刚体运动学理论中，每次的转动都会产生一个转动矩阵。如果让两个坐标系重合，载体需分别绕 Z、X、Y 轴旋转，转角分别称为航向角、俯仰角、横滚角。本文分别用 H、P、R 表示航向角、俯仰角和滚转角。某一坐标变换如果是通过几次变换实现的，那么此变换的转动矩阵等于每次变换的转动矩阵的乘积，但转动矩阵相乘的次序与变换的次序相反。

在利用欧拉角描述的姿态矩阵中，本文的载体姿态将依照 YXZ 顺序转动生成。首先对整个大地导航坐标系进行基准变换，改变太阳位置在坐标系中的初始基准。如图 6 所示，旋转导航坐标系即可使太阳位置矢量在 XY 的投影点与 Y 轴重合。

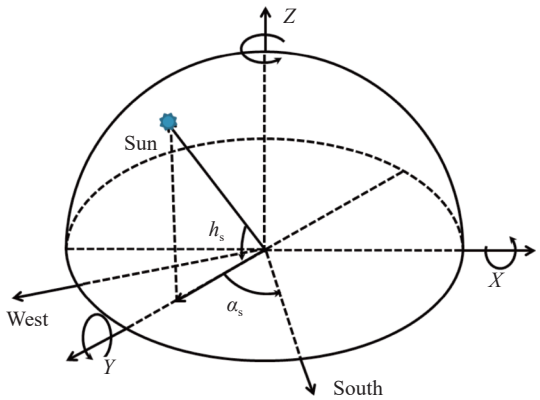


图 6 基准变换示意图

Fig. 6 Schematic diagram of benchmark transformation

完成初始基准变换后, 设太阳位置矢量为 $\boldsymbol{S}=[x\ \ y\ \ z]$, 姿态变换后的太阳位置矢量 $\boldsymbol{S}_A=[x_A\ \ y_A\ \ z_A]$, 即 $\boldsymbol{S}_A=\boldsymbol{R}_Z\boldsymbol{R}_X\boldsymbol{R}_Y\cdot S$, $\boldsymbol{R}_Z$、$\boldsymbol{R}_X$、$\boldsymbol{R}_Y$ 分别表示太阳矢量航向角、俯仰角和横滚角的转动矩阵。因为通过 YXZ 的转动方式, 即航向角旋转为最后一次旋转, 所以在发生航向变化时, 可以先将载体绕 Z 轴旋转 $-H$ 角, 即 $\boldsymbol{S}'_A=\boldsymbol{R}_Z^{-1}\boldsymbol{R}_Z\boldsymbol{R}_X\boldsymbol{R}_Y\cdot\boldsymbol{S}$, 简化为 $\boldsymbol{S}'_A=E\boldsymbol{R}_X\boldsymbol{R}_Y\cdot\boldsymbol{S}$, 坐标基准仍然处于图 6 所示的情况, 这样就避免了航向角变化对算法的影响。

如果航向无变化, 天球顶点可表示为 $\boldsymbol{V}=[0\ \ 0\ \ 1]$, 假设对载体天球顶点进行 ZYX 转动, 由于天球顶点坐标具有特殊性, 绕 Z 轴旋转将被锁死, 即天球顶点只进行了 X、Y 转动, 即天球顶点姿态变动后的坐标可由式 $\boldsymbol{V}_A=\boldsymbol{R}_{VX}\boldsymbol{R}_{VY}\boldsymbol{R}_{VZ}\cdot\boldsymbol{V}$ 表示, 其中 $\boldsymbol{R}_{VX}$、$\boldsymbol{R}_{VY}$、$\boldsymbol{R}_{VZ}$ 分别表示天球顶点矢量航向角、俯仰角和横滚角的转动矩阵。由于绕 X 轴转动时, 天球顶点的 XY 投影面与太阳矢量同样位于 Y 轴, 而且太阳矢量也可以通过天球顶点转过 $\pi/2-\alpha_s$ 得到, 所以天球顶点就可以通过转动 $P'=(\pi/2-h_s)+P$ 与太阳发生第二次转动后重合, 而第三次旋转即绕 X 轴转动时天球顶点与太阳矢量已经重合。这样, 就可以将太阳矢量的转动转换成天球顶点的转动。从而根据转动理论, 天球顶点的转动可由式(12)、式(13)表示:

$$\boldsymbol{V}_A=\boldsymbol{R}_{VX}\boldsymbol{R}_{VY}\boldsymbol{R}_{VZ}\cdot\boldsymbol{V}\quad,\tag{12}$$

$$\boldsymbol{R}_{XYZ}=\begin{bmatrix}\cos R\cos H+\sin R\sin P'\sin H & -\cos R\sin H+\sin P'\sin R\cos H & -\cos P'\sin R\\ \cos P'\sin H & \cos P'\cos H & \sin P'\\ \cos R\cos H-\sin R\sin P'\sin H & -\sin R\sin H-\sin P'\cos R\cos H & \cos P'\cos R\end{bmatrix}.\tag{13}$$

设 $\boldsymbol{V}_A=\begin{bmatrix}C_x & C_y & C_z\end{bmatrix}$, 则可得出式(14):

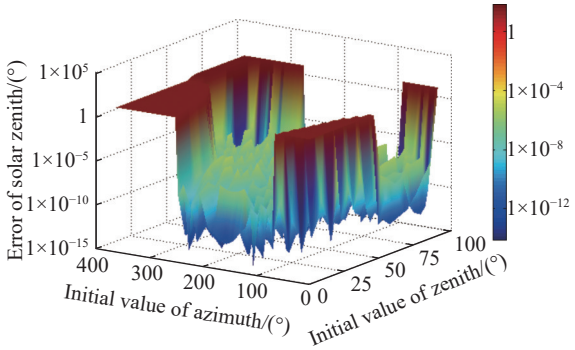
$$C_y=\sin P'-\frac{C_x}{C_z}=\frac{-\cos P'\sin R}{\cos P'\cos R}=\arctan R.\tag{14}$$

至此可求得横滚角 R 和天球顶点俯仰角 P', P 可通过 $P'=(\pi/2-h_s)+P$ 解得。

4　实　验

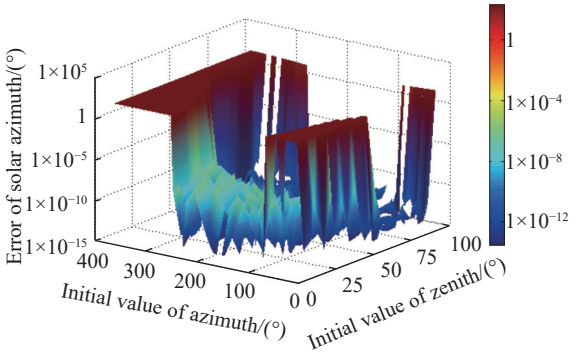
4.1　太阳位置求解算法仿真

由于迭代过程中需要给定 $\boldsymbol{S}$ 的初值 $\boldsymbol{S}_0(h_{s_0},\alpha_{s_0})$ 作为迭代出发点, 由于高斯-牛顿法忽略了 $\boldsymbol{F}(\boldsymbol{S})$ 二次模型的二阶信息项, 因此算法成功与否将依赖于二阶信息项在模型中的重要性。实际上仅当初始点 $\boldsymbol{S}_0$ 接近最小二乘模型的局部极小点, 即初始点接近测量时刻当地的太阳位置, 或者二阶信息项较小的情况下, 高斯-牛顿法是有效的。在实际应用中, 太阳的实际位置是未知量, 因此, 在优化过程中有必要对不同的初值在其定义域内进行搜索, 以确定可以得到有效优化解的迭代初值。迭代初值对算法的解算精度的影响如图 7 (彩图见期刊电子版)所示。图 7(a) 、图 7(b) 为利用偏振度分布信息得到的太阳高度角、方位角结果, 图 7(c) 、图 7(d) 为利用偏振角分布信息得到的太阳高度角、方位角结果。从结果看, 首先在各自的收敛区间内偏振角和偏振度算法的精度都非常高, 太阳高度角和太阳方位角误差均小于 10^{-6}; 其次, 对比两种不同模型, 利用偏振度信息解算太阳矢量比利用偏振角信息解算收敛区域更大, 这意味着算法对迭代初值的选择相对宽松, 而只有在太阳方位角初值非常接近理论值时, 利用偏振角信息才能收敛。但是在实际的大气环境中, 偏振角的分布比偏振度更加稳定。因此本文对偏振角信息可能涉及的问题进行了分析, 发现这是太阳子午线附近不连续的偏振角所致。随后分别分析了太阳矢量与偏振角、偏振度评价函数的关系, 如图 8 所示。从图 8 可以明显的看出偏振角信息评价函数在分布过程中的极小值点不明确, 且函数梯度的变化也不连续, 这不利于算法收敛。

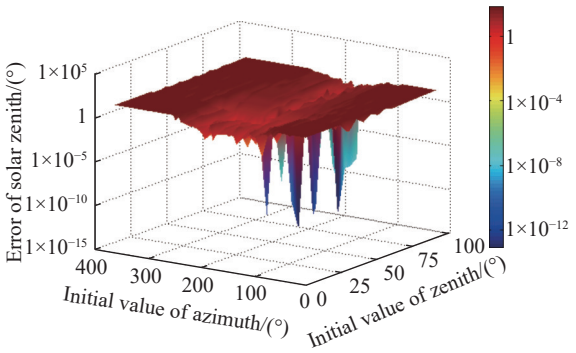


(a) 基于 DOP 的太阳高度角误差分布

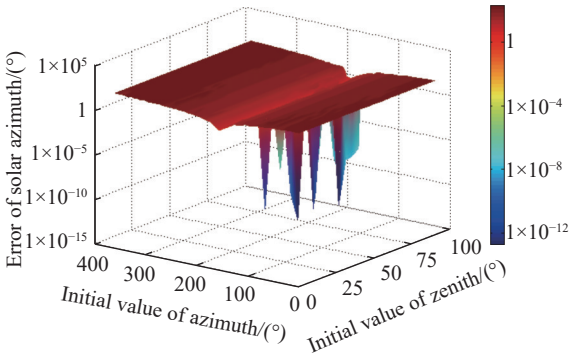
(a) The error distribution of solar altitude angle based on DOP



(b) 基于 DOP 的太阳方位角误差分布
(b) The error distribution of solar azimuth angle based on DOP



(c) 基于 AOP 的太阳高度误差分布
(c) The error distribution of solar altitude based on AOP



(d) 基于 AOP 的太阳方位角误差分布
(d) The error distribution of solar azimuth based on AOP

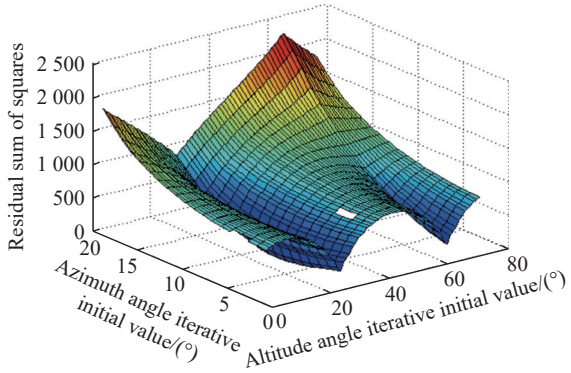
图 7　优化初值对算法影响

Fig. 7　The effect of iterative initial value on the algorithm

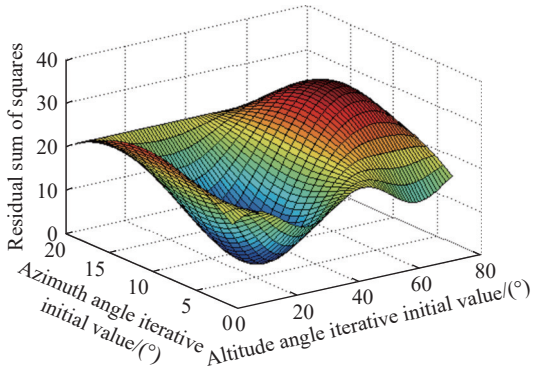
从偏振角关于太阳子午线的对称性入手，本文选取偏振角函数的绝对值作为评价函数：

$$f(S)=\sum_{i=1}^{n}[|\mathrm{AOP}(S,h_i,a_i)|-|P_i|]^2 \quad . \qquad (15)$$

改进的偏振角评价函数分布图如图 9 所示，可见，函数的梯度变化在理论值附近连续，这有助于函数的优化求解。同样对不同迭代初值下的优化结果进行仿真（迭代初值的仿真范围：太阳高度角为 0° ~ 60°，方位角为 10° ~ 200°）。从图 10 的仿真结果可知，除远离理论值的边缘区域，在大部分迭代初值仿真区域内，太阳高度角和太阳方位角均能达到很高的精度水平，误差小于 10^{-10}。这说明算法自身误差较低，可忽略不计，同时改进后评价函数的收敛区间得到了极大扩展。



(a) 偏振角
(a) AOP



(b) 偏振度
(b) DOP

图 8　评价函数分布

Fig. 8　The distribution of evaluate function

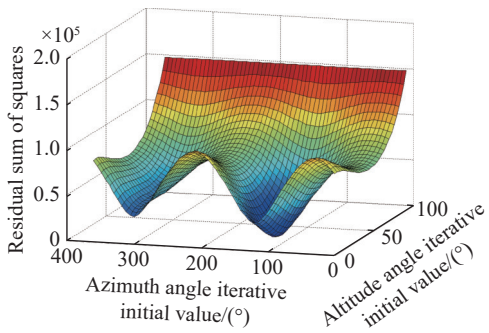
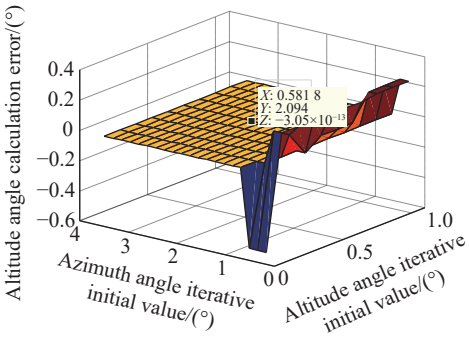


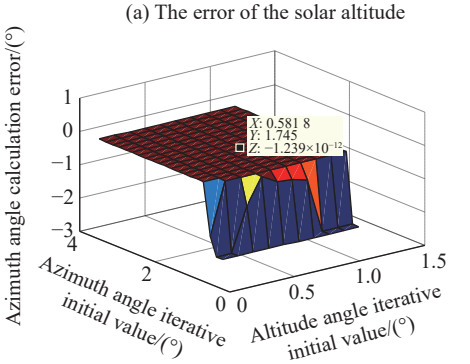
图 9　改进的偏振角评价函数分布图

Fig. 9　The distribution of improved AOP evaluation function



(a) 太阳高度角误差

(a) The error of the solar altitude



(b) 太阳方位角误差

(b) The error of the solar azimuth

图 10　改进评价函数后算法仿真结果

Fig. 10　Simulation results of improved AOP evaluation function

4.2　太阳位置测量实验

由三通道偏振成像设备、水平平台及上位机搭建的测量系统如图 11 所示。

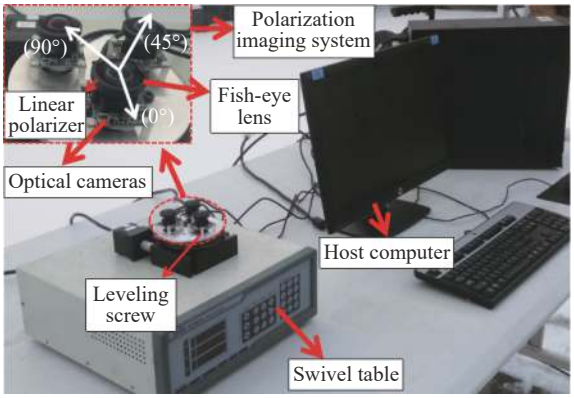


图 11　大气偏振模式测量系统

Fig. 11　The full sky polarization measurement system

为了降低雾霾及其他大颗粒粉尘对实验结果的影响, 实验地点为一座海拔较高的山顶(东经 118.443°, 北纬 38.015°), 采集数据时天气晴朗, 天空具有非常高的可见度, 以确保当天天空的偏振模式与 Rayleigh 模型的一致性。测量时间为上午 8 时至下午 17 时, 每间隔一个小时采集一次数据。一天中不同时刻太阳位置的 DOP 和 AOP 分布如图 12(彩图见期刊电子版)所示, 其中 12(a)、12(b)、12(c) 分别表示原始图像、DOP 分布图和 AOP 分布图。

太阳空间位置的理论数据与实测数据如表 1 所示, 其中太阳的理论位置通过结合太阳历与国家授时中心时间得出。太阳空间位置解算的实验数据分布如图 13 所示, 太阳实际位置与理论位置的对比结果如图 13(a)所示, 误差绝对值的分布如图 13(b)所示。通过本文算法解算得到的太阳位置精度可达 10^{-2} 度。综合分析, 方位角和高度角的误差大小为 0.03°和 0.024°左右, 而且误差分布很均匀, 有一定的实用价值。

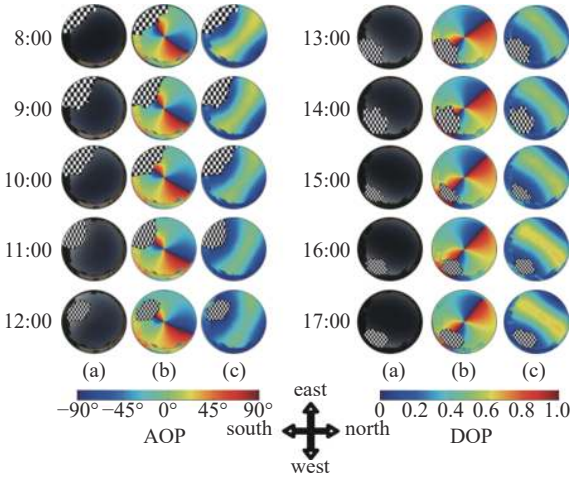


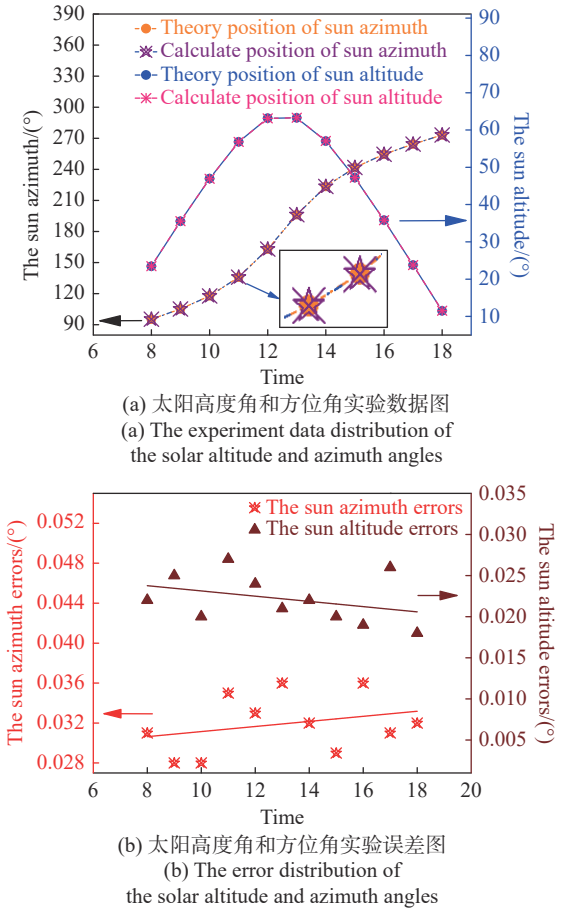
图 12　不同时间太阳位置的 DOP 和 AOP 分布

Fig. 12　The distributions of DOP and AOP of the solar position at different times

表 1　实验数据表

Tab. 1　Experiment data list

时间	太阳的理论位置		基于改进的偏振角模型计算的太阳位置		误差	
	α_s	h_s	α_s	h_s	α_s	h_s
8:00	95.333	23.450	95.365	23.472	0.031	0.022
9:00	105.216	35.529	105.189	35.554	−0.028	0.025
10:00	117.819	46.959	117.791	46.939	−0.028	−0.020
11:00	135.892	56.827	135.857	56.800	−0.035	−0.027
12:00	162.984	63.167	163.018	63.143	0.033	−0.024
13:00	196.214	63.255	196.178	63.276	−0.036	0.021
14:00	223.550	57.040	223.519	57.063	−0.032	0.022
15:00	241.809	47.232	241.838	47.212	0.029	−0.020
16:00	254.509	35.826	254.545	35.807	0.036	−0.019
17:00	264.438	23.757	264.469	23.783	0.031	0.026
18:00	273.160	11.486	273.192	11.504	0.032	0.018



(a) 太阳高度角和方位角实验数据图
(a) The experiment data distribution of the solar altitude and azimuth angles

(b) 太阳高度角和方位角实验误差图
(b) The error distribution of the solar altitude and azimuth angles

图 13　晴朗天气下的实验数据分析图

Fig. 13　Experimental data in clear weather

本文建筑物遮挡环境实验在有高楼的马路上进行(东经 113.443°, 北纬 33.015°), 采集数据时天气晴朗, 天空具有非常高的可见度。建筑物遮挡环境下的实验结果如图 14(a)(彩图见期刊电子版)所示, 天空受建筑物遮挡, 仅有狭长的窗口区域可用, 对太阳位置解算的影响主要体现在子午线有很大部分被建筑物遮住, 但是由于子午线是跨度等于 180°的直线, 因此余下的部分仍然可以提供足够精度的子午线方向信息。

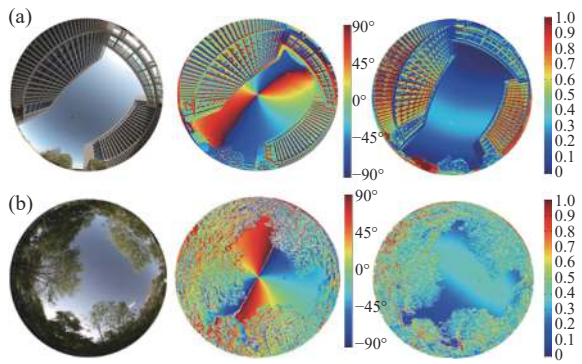
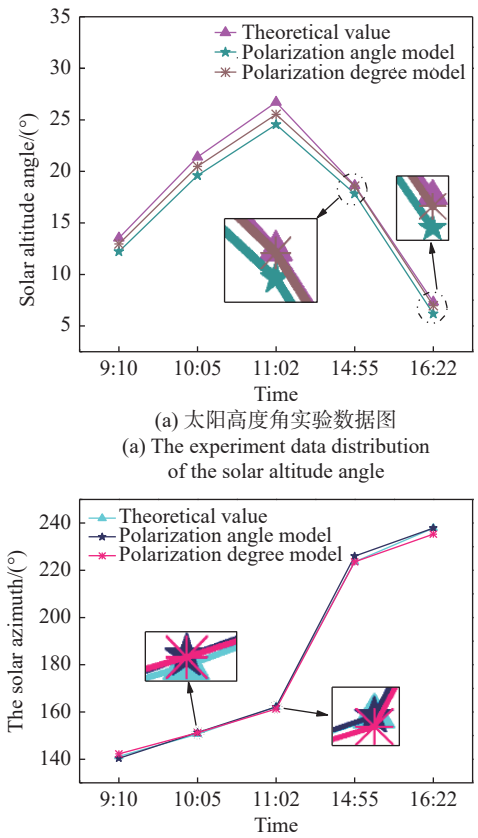


图 14　遮挡情况下太阳位置解算

Fig. 14　The solar position calculation under occlusion

建筑物遮挡下解算的太阳高度角和方位角如图 15 所示。太阳高度角的解算误差在 0.08°左右, 偏振角解算误差相对略大; 而太阳方位角误差在 0.05°左右, 精度较高。太阳高度角精度下降的原因可能是太阳光在大气中发生了多次散射, 导致中性点由太阳位置向天顶方向移动。



(a) 太阳高度角实验数据图
(a) The experiment data distribution of the solar altitude angle

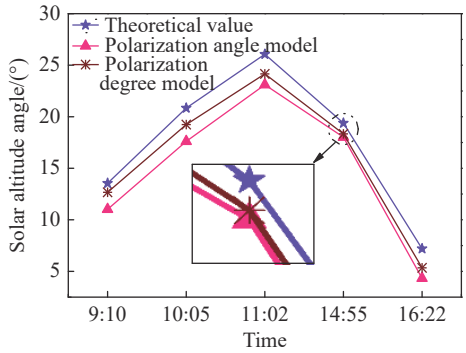
(b) 太阳方位角实验数据图
(b) The experiment data distribution of the solar azimuth angle

图 15　建筑物遮挡实验数据分析图

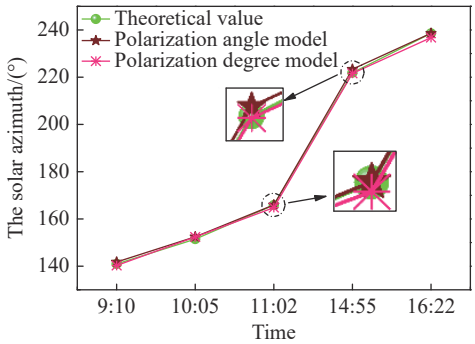
Fig. 15　Experimental data in clear weather in the presence of buildings

本文对树木遮挡环境下的实验在一处有茂密树林的公园内进行(东经 107.443°, 北纬 31.015°), 采集数据时天气晴朗, 天空具有非常高的可见度。在树木遮挡环境下的实验结果如图 14(b)(彩图见期刊电子版)所示。彩色图片显示天空被茂密的枝叶遮挡面积超过 80%, 但是从偏振角和偏振度的分布图像结果看, 天空偏振光分布受枝叶遮挡影响远低于预期, 只有粗大的树干部分遮挡对偏振模式产生了显著影响, 其他情况下偏振模式几乎不受影响, 在最大偏振度区域附近这种现象尤其明显, 这对利用偏振图像进行导航是有

利的。树木遮挡下解算的太阳高度角和方位角如图 16 所示, 太阳高度角的解算误差在 0.3°左右, 偏振角解算误差相对略大; 而太阳方位角误差在 0.1°左右, 精度比较高。精度相对晴朗无遮挡和晴朗建筑物遮挡环境下精度虽然有轻微下降, 但是依旧稳定。



(a) 太阳高度角实验数据图
(a) The experiment data distribution of the solar altitude angle



(b) 太阳方位角实验数据图
(b) The experiment data distribution of the solar azimuth angle

图 16　树木遮挡实验数据分析图

Fig. 16　Experimental data in clear weather in the presence of trees

4.3　气溶胶对太阳位置解算的影响

晴朗天气下, 大气中会包含少许的气溶胶, 当大气气溶胶在一定范围内时会使偏振光增强, 但是如果气溶胶的浓度超过一定阈值后(如多云、雾霾、沙尘等天气)会破坏偏振光的 Rayleigh 分布模式。本次研究的气溶胶(主要是 PM2.5(Particulate Matter 2.5))浓度是从当地环境保护监测部获取。环境保护部门采用的是物理法、化学法相结合的检测方式, 采集密度以及遥感设备都具有很高的可靠性。大气气溶胶环境下的实验结果如图 17 和图 18(彩图见期刊电子版)所示。从图 17~图 18 可以看出, 由于气溶胶的存在, 使得散射次数大量增加, 从而使各方向振动强度趋于均匀, 产生消偏现象。当气溶胶的浓度为 20~110 mg/m^3 时, 解算的太阳高度角和方位角误差范围为 1.5°~3.7°, 从图 18(a) 可以看出, 气溶胶环境下解算的太阳高度角误差相对拟合曲线比较发散, 而解算的太阳方位角误差相对拟合曲线比较收敛。当气溶胶的浓度为 20~560 mg/m^3 时, 解算的太阳高度角和方位角误差范围为 1.5°~6.6°, 从图 18(b) 可以看出, 气溶胶环境下解算的太阳高度角误差同样比较发散, 而解算的太阳方位角误差同样比较收敛。由上述实验结果可得: 气溶胶浓度的增强会导致偏振角数据产生一定程度的失真, 进而会影响太阳位置的检测精度, 从而也就限制了偏振光在具体应用中的导航精度, 后续可通过神经网络算法实现偏振信息的重构来弱化或消除气溶胶对太阳位置解算及偏振光导航的影响。

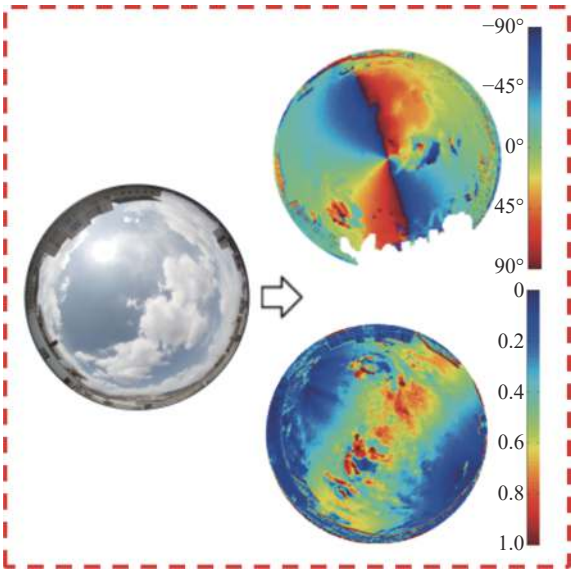
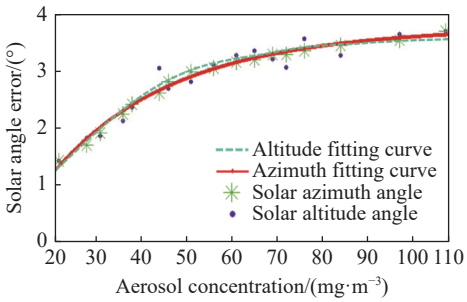
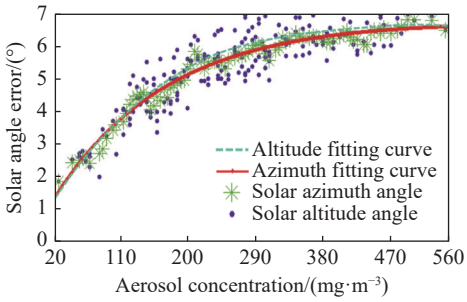


图 17　气溶胶天气下太阳位置解算

Fig. 17　Calculation of position of the sun in aerosol weather



(a) 定量浓度气溶胶对太阳高度角和方位角的解算误差
(a) Calculation error of quantitative concentration aerosol to solar zenith and azimuth angles



(b) 高浓度气溶胶对太阳高度角和方位角的解算误差
(b) Calculation error of high concentration aerosol to solar zenith and azimuth angles

图 18 气溶胶天气下的实验数据分析图

Fig. 18 Experimental data analysis chart under aerosol weather

造成太阳信息解算误差的原因可能包含以下几个方面：(1)偏振相机受视场角、焦距的影响无法获取完整的全天域大气偏振信息，从而对太阳的位置造成一定的影响；(2)偏振光罗盘的安装误差也可能会影响到太阳位置信息的精确获取；(3)偏振光罗盘的图像噪声与电路噪声也会对太阳位置的精确获取产生一定的影响；(4)气溶胶也会产生消偏现象，导致部分偏振度会有所降低。因此，后续将会针对造成太阳信息解算误差的原因进行分析，以削弱甚至消除它们对太阳位置造成的影响。

5 结 论

本文以解决偏振光导航对天空中特征点精确位置信息的需求为目的，在 Rayleigh 模型的基础上对大气偏振模型进行分析并提出了一种基于全天域偏振模式的成像系统，对太阳位置进行精确检测。采用搭建的三通道偏振测量系统对三种环境下的全天太阳位置进行测量，并与理论的太阳位置进行对比。实验结果表明：晴朗天气环境下，测量的太阳高度角和方位角的精度分别为 0.024°和 0.03°；有建筑物遮挡的环境下，测量的太阳高度角和方位角的精度分别为 0.08°和 0.05°；存在树木遮挡的情况下，测量的太阳高度角和方位角的精度分别为 0.3°和 0.1°，完全能够满足偏振光在导航领域对太阳位置的需求。恶劣天气下气溶胶浓度的增强会导致偏振角数据产生一定程度的失真，进而影响到太阳位置的检测精度，也就限制了偏振光在具体应用中的导航精度。

参考文献：

[1] WANG X H, WANG J P, ZHANG CH W. Research of an omniberaing sun locating method with fisheye picture based on transform domain algorithm[C]. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing in Signal Processing and Pattern Recognition*, Springer, 2006: 1169-1174.

[2] 刘鹏, 吴瑞梅, 杨普香, 等. 基于计算机视觉技术的茶叶品质随机森林感官评价方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(1): 193-198.
LIU P, WU R M, YANG P X, *et al*.. Study of sensory quality evaluation of tea using computer vision technology and forest random method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(1): 193-198. (in Chinese).

[3] ZHANG W J, CAO Y, ZHANG X ZH, *et al*.. Angle of sky light polarization derived from digital images of the sky under various conditions[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 587-595.

[4] LU H, ZHAO K CH, WANG X CH, *et al*.. Real-time imaging orientation determination system to verify imaging polarization navigation algorithm[J]. *Sensors*, 2016, 16(2): 144.

[5] 杨菁华. 基于无人机机载异类传感器的高超声速目标定位关键技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
YANG J H. *Research on key technology of hypersonic target location based on airborne heterogeneous sensors of UAV*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese).

[6] 杨江涛, 王健安, 王银, 等. 基于大气偏振模式的三维姿态角解算方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 221107.
YANG J T, WANG J A, WANG Y, *et al*.. Calculation method of three-dimensional attitude angle based on atmospheric polarization pattern[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(22): 221107. (in Chinese).

[7] 顾敬桥, 李高杰, 胡鹏伟, 等. 基于大气多次散射的波浪水下偏振模式研究[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(6): 1324-1332.
GU J Q, LI G J, HU P W, *et al*.. The polarization mode of underwater waves based on atmospheric multiple scattering[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1324-1332. (in Chinese).

[8] 杨江涛, 王健安, 王银, 等. 基于柔性材料的亚波长金属光栅偏振器的关键技术研究[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 1113004.
YANG J T, WANG J A, WANG Y, *et al*.. Sub-wavelength metal-grating polarizer fabricated on a flexible substrate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1113004. (in Chinese).

[9] YANG J T, WANG J A, WANG Y, *et al*.. Algorithm design and experimental verification of a heading measurement system based on polarized light/inertial combination[J]. *Optics Communications*, 2021, 478: 126402.

[10] TANG J, ZHANG N, LI D L, *et al*.. Novel robust skylight compass method based on full-sky polarization imaging under harsh conditions[J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15834-15844.

[11] ZHAO H J, XING J, GU X F, *et al*.. Polarization imaging in atmospheric environment based on polarized reflectance retrieval[J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(1): 012601.

[12] 张卫国. 海面太阳耀光背景下的偏振探测技术[J]. 中国光学, 2018, 11(2): 231-236.
ZHANG W G. Application of polarization detection technology under the background of sun flare on sea surface[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 231-236. (in Chinese).

[13] LAMBRINOS D. Navigation in desert ants: the robotic solution[J]. *Robotica*, 2003, 21(4): 407-426.

[14] YANG J T, XU X Y, CHEN X, *et al*.. Polarized light compass-aided inertial navigation under discontinuous observations environment[J]. *Optics Express*, 2022, 30(11): 19665-19683.

[15] 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.
WANG W, CHU J K, CUI Y, *et al*.. Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(5): 0513001. (in Chinese).

[16] 褚金奎, 陈文静, 王洪青, 等. 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): 2419-2426.
CHU J K, CHEN W J, WANG H Q, *et al*.. Mobile robot navigation tests with polarization sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2419-2426. (in Chinese).

[17] 褚金奎, 张然, 王志文, 等. 仿生偏振光导航传感器研究进展[J]. 科学通报, 2016, 61(23): 2568-2577.
CHU J K, ZHANG R, WANG ZH W, *et al*.. Progress on bio-inspired polarized skylight navigation sensor[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(23): 2568-2577. (in Chinese).

[18] 李逸博, 高隽, 王昕, 等. 独立通道偏振罗盘信息检测方法及传感器设计[J]. 光电工程, 2015, 42(7): 12-18.
LI Y B, GAO J, WANG X, *et al*.. Independent channel measurement method of polarization compass information and the design of sensor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, 42(7): 12-18. (in Chinese).

[19] 甘鑫, 高欣健, 钟彬彬, 等. 基于有限样本的大气偏振模式生成方法[J]. 光电工程, 2021, 48(5): 200331.
GAN X, GAO X J, ZHONG B B, *et al*.. A few-shot learning based generative method for atmospheric polarization modelling[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(5): 200331. (in Chinese).

[20] 范之国, 陈曼丽, 王波, 等. 基于大气偏振模式的三维姿态信息获取[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(6): 1248-1256.
FAN ZH G, CHEN M L, WANG B, *et al*.. Three-dimensional attitude information obtained by the skylight polarization pattern[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1248-1256. (in Chinese).

作者简介：

杨江涛(1988—), 男, 山西运城人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2015 年、2018 年于中北大学分别获得硕士、博士学位, 主要从事仿生导航及信息系统方面的研究。E-mail: yangjiangtao6567@tyust.edu.cn