

基于偏振模式融合的太阳子午线提取方法研究

苏杭 张肃 付强 战俊彤 李英超 王超 周俊

Research of solar meridian determination based on fused polarization patterns

SU Hang, ZHANG Su, FU Qiang, ZHAN Juntong, LI Yingchao, WANG Chao, ZHOU Jun

引用本文:

苏杭, 张肃, 付强, 战俊彤, 李英超, 王超, 周俊. 基于偏振模式融合的太阳子午线提取方法研究[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2026-0044

SU Hang, ZHANG Su, FU Qiang, ZHAN Juntong, LI Yingchao, WANG Chao, ZHOU Jun. Research of solar meridian determination based on fused polarization patterns[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2026-0044

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2026-0044>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向地物混杂背景的偏振光谱图像融合方法

Polarization spectral image fusion method for hybrid backgrounds of ground objects

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1098 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0185>

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>

仿生偏振光罗盘太阳位置检测方法

Detection method of solar position using a biomimetic polarized light compass

中国光学 (中英文). 2024, 17(3): 548 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0192>

基于偏振特征重构的海面耀光抑制方法研究

Sea surface glint suppression method based on polarization feature reconstruction

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1297 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0008>

基于偏振差分图像的海天线检测方法

Sea-sky-line detection method based on polarization difference images

中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 596 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0181>

强光背景下主动偏振成像方法

Active polarization imaging method under strong light background

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1075 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0151>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-12

基于偏振模式融合的太阳子午线提取方法研究

苏杭¹, 张肃^{2*}, 付强¹, 战俊彤¹, 李英超¹, 王超¹, 周俊¹
(1. 长春理工大学空间光电技术研究所, 长春 130022;
2. 桂林电子科技大学光电工程学院, 桂林 541000)

摘要:针对单一偏振模式提取太阳子午线噪声大、精度低的问题, 本文提出一种双偏振模式融合方法。该方法首先基于四分位距法对偏振场进行预处理, 随后结合线偏振度的镜像对称性与偏振角的反对称特性, 通过复数域变换及径向-角向分割分析, 融合全局与局部偏振特征。最后, 依据太阳运动规律和中性点约束进行时序滤波, 从而提升提取精度。在晴天、多云、雾天、沙尘等多种天气条件下的实验表明, 该方法相对于天文太阳方位基准的平均相对误差分别为 0.02、0.051、0.053 与 0.017, 优于单一特征方法。本研究不仅为自主系统提供偏振航向参考, 也为融合全局与局部偏振特征提供一种可扩展计算思路。

关键词: 偏振图像; 天空偏振模式; 太阳子午线; 导航

中图分类号: O436 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2026-0044 CSTR: 32171.14.CO.2026-0044

Research of solar meridian determination based on fused polarization patterns

SU Hang¹, ZHANG Su^{2*}, FU Qiang¹, ZHAN Juntong¹, LI Yingchao¹, WANG Chao¹, ZHOU Jun¹

(1. Institute of Space Photonics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. School of Optoelectronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, 541000, China)

* Corresponding author, E-mail: susiezhang21@126.com

Abstract: To address the issues of high noise and low accuracy in solar meridian extraction using a single polarization mode, this paper proposes a dual-polarization mode fusion method. First, the method preprocesses the polarization field using the interquartile range method. Then, by combining the mirror symmetry of the degree of linear polarization with the anti-symmetry of the angle of polarization and applying complex domain transformation along with radial-azimuthal segmentation analysis, the method fuses global and local polarization features. Finally, temporal filtering is applied based on solar motion law and the neutral point constraint, further improving extraction accuracy. Experimental evaluation under diverse conditions demonstrates that the complete pipeline achieves mean relative errors of 0.02 (sunny), 0.051 (cloudy), 0.053 (fog),

收稿日期: xxxx-xx-xx; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 吉林省科技发展计划项目 (No.20240101342JC); 国家自然科学基金项目 (No.62127813, No.62375027)

Jilin Provincial Scientific and Technological Development Plan Project (No. 20240101342JC); National Natural Science Foundation of China Project (Nos. 62127813, 62375027)

and 0.017 (dust) against the astronomical solar azimuth references, substantially outperforming single-feature methods. This study not only provides a polarization-based heading reference for autonomous systems, but also offers a scalable computational paradigm for integrating global and local polarization features.

Key words: polarization image; skylight polarization pattern; sun meridian; navigation

1 引言

人眼虽能感知光的明暗与色彩,却对偏振态天然“失明”,无法区分偏振光与非偏振光,更无从判定其振动方向^[1]。然而,自然界中众多生物却能感知并利用偏振光进行精确导航^[2]。例如,蝙蝠利用天空偏振模式校准磁体指南针^[3];沙漠蚂蚁借助偏振光罗盘定向导航^[4];幼年沙豹则依据天空偏振光梯度确定其空间取向^[5]。受这些生物机制的启发,偏振光导航作为一种以天空偏振太阳子午线为稳定天球参照的技术,已成为无人机、移动机器人等在全球定位系统失效环境下自主运行的重要解决方案^[6-7]。除导航外,太阳子午线还提供独立的方向线索,有助于无人飞行器校正陀螺仪漂移^[8-9]。此外,太阳子午线的准确识别对于大气遥感也至关重要,其对称性所反映的偏振模式对气溶胶浓度具有高度敏感性,为区分不同大气气溶胶光学特性提供了分析基础^[10]。因此,从天空偏振模式中提取太阳子午线不仅推动着大气光学技术的进步,亦在动物导航^[11]等跨学科领域展现出重要潜力。

非偏振太阳光经空气分子与气溶胶散射后,会在天空形成稳定的偏振分布。在 Rayleigh 单次散射机制的主导下,该分布表现为关于太阳-反太阳子午线呈镜面对称的鲜明特征。因此,即使太阳盘面被遮挡,利用此对称性亦可推断太阳的位置^[12-13]。2020年,刘变变等利用偏振角分布的 ∞ 型特征构建图像相似性模型,通过改进和声搜索法求解太阳位置。晴天条件下,太阳方位角与天顶角的平均误差分别小于 0.4° 和 0.5° ;阴天部分遮挡条件下小于 0.8° 和 0.9° ^[14]。2022年,华豆等结合中性点连线的最小二乘法拟合太阳子午线^[15]。然而,在高纬度地区或浓密云层条件下,中性点往往不可见,且多次散射效应易使其偏离理论位置,从而破坏该方法的稳定性基础,影响提取精度。为提升复杂环境下的适应性,黄玺铭等提出基于偏振图像的航向角估计方法:采用强度质心法提

取特征点旋转量,再反推偏振角计算与实测值的差值来构建代价函数,间接联合偏振模式反演太阳子午线。实验表明,在雾霾潮湿和城市遮挡场景下,航向角误差标准差分别为 $0.1^\circ \sim 0.24^\circ$ 和 $0.04^\circ \sim 0.09^\circ$ ^[16]。2023年,王珏等提出基于椭圆霍夫变换的中性点提取方法,采用 Hanny 模型从偏振图中识别中性点。在30%遮挡率的非理想天气条件下,太阳天顶角和方位角平均误差均小于 1° ,偏振罗盘在部分遮挡条件下的精度提升50%^[17]。但该算法对异常值敏感,复杂场景下的强边缘梯度可能被误判为有效信号,导致伪收敛。2024年,周钰聪等采用图像分割法提取太阳子午线:通过二值化掩膜获取有效信息,并基于 Rayleigh 模型解算太阳矢量。在树木、建筑物等遮挡场景下,航向角均方根误差小于 0.75° ^[18]。为进一步提升恶劣环境下的鲁棒性,2025年,申冲等提出一种集成偏振增强感知与深度学习的定位方法。该方法通过线偏振度阈值分析评估天空偏振状态,构建蜜蜂仿生偏振增强模型并采用卷积神经网络分割图像以识别有效天空区域。最终,结合自适应反对称环算法拟合偏振角图,提取太阳子午线方向。在复杂大气环境与局部遮挡条件下,平均航向误差分别为 0.41° 和 0.28° ^[19]。2026年,刘晓杰等针对夜间弱偏振与局部遮挡导致信息缺失问题,引入仿生模型对夜间图像进行去噪与增强,并提出基于比例-微分控制的太阳子午线拟合方法。实验结果表明,动态方位角均方根误差为 0.7° ,相比最小二乘法,方位精度分别提升97%和80%^[20]。

针对现有方法抗异常值能力弱、依赖中性点的问题,本文提出一种基于偏振模式融合的太阳子午线提取框架。首先,采用线偏振度(DOLP)引导的四分位距(IQR)统计方法剔除异常值。随后,基于DOLP镜面对称特性及中性点约束并结合偏振角(AOLP)反对称跳变线检测,通过置信度加权的自适应融合整合双路径结果,并经时间滤波处理以抑制瞬态干扰。该方法融合DOLP的

全局镜面对称与 *AOLP* 的局部反对称特征, 结合太阳运动的物理规律进行时序滤波, 直接利用物理对称性、先分治降噪再动态加权融合, 从而实现对太阳子午线的鲁棒提取。

2 基于偏振双特征模式解算太阳子午线

本文提出的太阳子午线偏振融合算法流程如图 1 所示, 包含基于 *IQR* 的预处理及三个计算阶段。首先, 拍摄 4 张不同方向角度的偏振图像 (0° 、 45° 、 90° 和 135°), 并采用 *IQR* 统计对输入数据进行预处理。随后依次执行: 镜面对称提取线偏振度模式、反对称提取偏振角模式, 以及基于时序滤波的偏振模式融合算法。

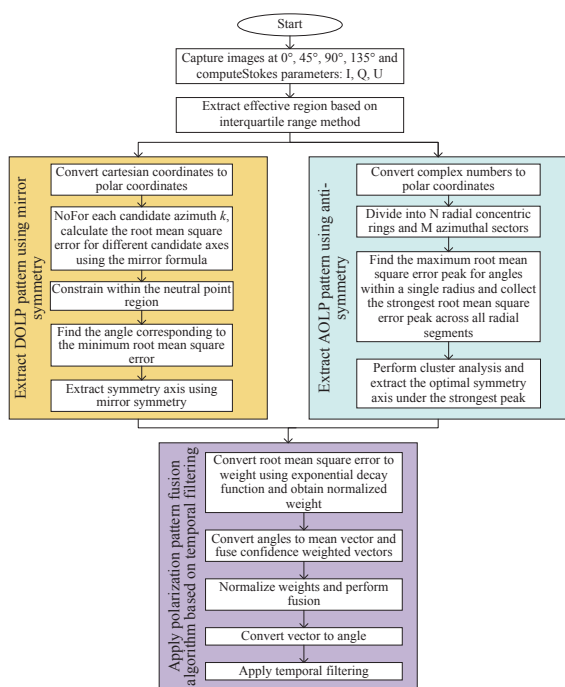


图 1 太阳子午线偏振融合算法流程图

Fig. 1 Flowchart of sun meridian polarization fusion algorithm

2.1 基于四分位距法的有效区域提取

在分别对 *DOLP* 和 *AOLP* 进行镜面对称和反对称分析之前, 采用 *IQR* 方法进行数据预处理以排除异常值。*IQR* 定义为第三四分位数 A_3 和第一四分位数 A_1 之间的差值 ($IQR=A_3-A_1$ ^[21]), 用以统计数据的离散度。基于 *IQR*, 异常值的判定阈值设定如下: 上界= $A_3+1.5 \times IQR$, 下界= $A_1-1.5 \times IQR$ 。任何超出此范围的数据点均视为异常值并

从后续分析中排除。经过此移除过程后, 确定 *DOLP* 值的有效范围下限 $\leq DOLP_{valid} \leq$ 上限。随后, 使用 *DOLP* 归一化公式对剩余数据进行归一化:

$$DOLP_{norm} = \frac{DOLP - \min(DOLP_{valid})}{\max(DOLP_{valid}) - \min(DOLP_{valid})}, \quad (1)$$

其中, *DOLP* 表示每个像素的原始线偏振度值, $\max(DOLP_{valid})$ 和 $\min(DOLP_{valid})$ 是预处理后整幅图像中线偏振度的最大值和最小值, 而 *DOLP_{norm}* 则是经过归一化处理后每个像素的最终值。

2.2 镜面对称提取线偏振度模式

在 Rayleigh 散射主导的大气条件下, 天空中的 *DOLP* 分布呈现出关于太阳子午平面的近似镜面对称性。该物理特征为偏振图像反演太阳方位角提供可行途径。依据此原理, 本研究采用镜面对称性度量方法识别该对称轴。原始偏振数据需经过预处理(如第 2.1 节所述), 以便后续分析。首先采用基于偏振特性的 *IQR* 分析, 识别并剔除统计异常值及物理上不合理的观测数据。预处理前后的对比结果如图 2 所示: 其中图 2(a) 为原始 RGB 图像, 图 2(b) 为异常值去除后的 *DOLP* 图像, 异常剔除区域以白色掩膜表示。

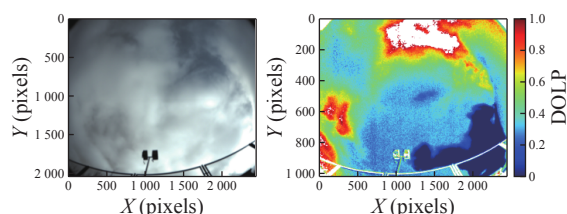


图 2 原始 RGB 图像与异常值去除后的 *DOLP* 图像对比
Fig. 2 Comparison of original RGB image and *DOLP* image after outlier removal

为反映大气偏振模式固有的径向结构, 将预处理的 *DOLP* 数据从笛卡尔坐标系 (x, y) 转换为极坐标系 (r, θ) , 其中 $\theta \in [0, 2\pi]$ 表示方位角, $r \in [0, 1]$ 表示距图像中心的归一化径向距离。在该极坐标系下, 通过搜索确定最优对称轴。对于任一候选方位角 $k \in [0, \pi]$, 将其视为假设的太阳子午线方向。依据镜面对称原理, 原始图像中方位角 θ 处像素的理论镜面点方位角可通过公式 $\theta' = 2 \times k - \theta$ 计算得出。进而, 通过计算原始 *DOLP* 分布与其镜像反射之间的 MSE_{mirror} , 可定量评价该候选方位角 k 的对称性质量, 其数值越低, 说明

图像围绕该轴的镜面对称程度越高。

$$MSE_{mirror} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (DOLP(r, \theta) - DOLP(r, \theta'))^2, \quad (2)$$

其中, n 为有效像素的数量, $DOLP(r, \theta)$ 表示极坐标 (r, θ) 处的 $DOLP$ 值, (r, θ') 是对应的镜面位置。

镜面对称法虽能直接利用观测数据, 但易受信号噪声、云层遮挡及视场范围限制等因素干扰, 从而增加太阳子午线方位角估计的不确定性。为减弱此类影响, 本文引入大气偏振模式固有中性点作为额外约束。具体而言, 算法将最优对称轴的搜索范围限制在大气中性点邻近区域实现该约束。在该区域内, 由于 Rayleigh 散射特有的中性点角度依赖性, $DOLP$ 取得极小值。结合数据预处理、坐标变换与物理约束, 从线偏振度模式中提取太阳子午线。

2.3 反对称提取偏振角模式

根据 2.1 节中剔除的异常区域, 将对应掩模应用于 $AOLP$ 场, 以确保 $DOLP$ 与 $AOLP$ 在空间覆盖上的一致性。由于偏振角存在 180° 的周期性跳变, 直接进行算术运算会产生偏差, 因此需将 $AOLP$ 数据转换至复数域处理。具体来说, 构建复数表示 $P = Q + iU$ 。根据欧拉公式 $e^{i\phi_c} = \cos \phi_c + i \sin \phi_c$, 可得 $P = |P|e^{i2\phi_c}$, 从而将偏振角映射到复平面中的矢量。对于图像中任意像素 (x, y) , 其相对于图像中心坐标 (x_c, y_c) 方向: $dx = x - x_c, dy = y - y_c$ 。像素相对于天顶的方位矢量可通过复数 $z = dx + idy$ 进行描述。复函数 (\arg) 在分析奇异性与分支切割时具有重要作用^[22]。本文复函数用来实现二维的旋转变换和描述坐标系中的偏振角模式转换。将像素连接到图像中心的线与参考方向 (x 轴) 之间的方位角参数表示为:

$$\arg(z) = \arg(dx + idy) = \theta \quad (3)$$

为在子午线坐标系下建立 $AOLP$ 的解析表达式, 将变量 z 取平方, 得到:

$$z^2 = (dx + idy)^2 = r^2 e^{i2\theta}, \quad (4)$$

其中, $r = \sqrt{dx^2 + dy^2}$ 。构建的表达式:

$$\frac{P}{z^2} = \frac{|P|e^{i2\phi_c}}{r^2 e^{i2\theta}} = \frac{|P|}{r^2} e^{i(2\phi_c - 2\theta)} = \frac{|P|}{r^2} e^{i2\phi}, \quad (5)$$

进而得到子午坐标系中的偏振角 ϕ :

$$\phi = 0.5 \arg\left(\frac{Q + iU}{(dx + idy)^2}\right) \quad (6)$$

通过 IQR 预处理 (见第 2.1 所示) 和复数域变换获得的偏振角图案以笛卡尔坐标系形式展示在图 3。

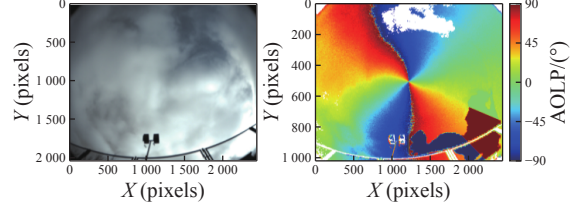


图 3 原始 RGB 图像与异常值去除后的 $AOLP$ 图像对比
Fig. 3 Comparison of original RGB image and $AOLP$ image after outlier removal

其中, 图 3(a) 为原始 RGB 图像, 图 3(b) 为异常值剔除后的 $AOLP$ 分布图, 图中白色区域表示被剔除的异常值。

随后, 将图像从笛卡尔坐标 (x, y) 转换至以图像天顶为中心的极坐标 (r, θ) , 以便分析偏振角沿径向与方位角方向的变化。进而, 在此极坐标系下通过离散化检测偏振角反对称性。具体而言, 在最小与最大半径之间进行线性插值, 将径向维度划分为 N 个同心环形段:

$$r_i = r_{\min} + \frac{i}{N} (r_{\max} - r_{\min}), i = 0, 1, \dots, N \quad (7)$$

同时, 方位维度被划分为 M 个均匀的角扇区:

$$\theta_j = \frac{2\pi j}{M}, j = 0, 1, \dots, M \quad (8)$$

通过离散化处理构建极坐标网格, 其中每个网格单元 i, j 对应于一个由径向距离 $[r_i, r_{i+1}]$ 和方位角界定 $[\theta_j, \theta_{j+1}]$ 的环形扇区。在该坐标系下, 每个径向段 i 和角扇区 j 中的偏振角不连续强度, 可通过计算其连续 $AOLP$ 变化的 MSE 来量化。公式 (9) 通过处理每个环形扇区内偏振角 $\phi_{i,j}$ 测量的有序序列实现计算。

$$\Theta_{ij} = \{\phi_{i,j,1}, \phi_{i,j,2}, \dots, \phi_{i,j,K_{i,j}}\} \quad (9)$$

其中, $K_{i,j}$ 表示该扇区中有效测量的数量, $\phi_{i,j,K_{i,j}}$ 为子午坐标系下环形扇区内有效测量的偏振角。不连续性分析通过计算相邻偏振角测量值之间的差值 $\Delta\phi_{i,j,k}$ 的统计特性来完成, 具体表达式为:

$$\Delta\phi_{i,j,k} = \phi_{i,j,k+1} - \phi_{i,j,k}, k = 1, 2, \dots, K_{i,j} - 1 \quad (10)$$

为消除偏振方向 180° 周期性带来的相位混叠, 通过公式(11)对角度进行环绕变换得到环形扇区内的偏振角 $\Delta\phi_{i,j,k}^{wrapped}$:

$$\Delta\phi_{i,j,k}^{wrapped} = \begin{cases} \Delta\phi_{i,j,k} - \pi, & \text{if } \Delta\phi_{i,j,k} > \pi/2 \\ \Delta\phi_{i,j,k} + \pi, & \text{if } \Delta\phi_{i,j,k} < -\pi/2 \\ \Delta\phi_{i,j,k}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

随后, 通过公式(12)量化每个角度扇区内的偏振角不连续强度:

$$MSE_{jump} = \frac{1}{K_{i,j} - 1} \left(\sum_{k=1}^{K_{i,j}-1} \Delta\phi_{i,j,k}^{wrapped} \right)^2 \quad (12)$$

MSE_{jump} 的值越大表示偏振角明显转变的区域, 对应于与太阳子午线相关的特征跳跃线。对于每个径向段 i , 识别出最大不连续强度的方位角扇区:

$$j_i^* = \arg \max MSE_{jump} \quad (13)$$

相应的最强峰值扇区的中心方位角 θ_i 及基于不连续强度的置信权重 m_i 如下:

$$\theta_i = f_{i,j_i^*} + \frac{\pi}{M}, m_i = MSE_{i,j_i^*} \quad (14)$$

其中, MSE_{i,j_i^*} 为不连续强度的均方误差。由此, 从所有径向段中得到一组候选反对称方向及其对应的置信权重。随后, 为获得一个连贯的全局估计, 采用聚类分析将这些候选值进行整合:

$$C_l = \{\phi_i | \min(|\phi_i - \mu_l|, 2\pi - |\phi_i - \mu_l|) < \delta_{cluster}\} \quad (15)$$

在每个簇 C_l 内, 使用 MSE 值作为置信度权重计算加权平均角度 θ_l :

$$\theta_l = \frac{\sum_{\phi \in C_l} m_i \phi_i}{\sum_{\phi \in C_l} m_i} \quad (16)$$

通过识别平均置信度最高的簇进而选择最优跳跃线方向:

$$l^* = \arg \max \left(\frac{\sum_{\phi \in C_l} m_i}{|C_l|} \right) \quad (17)$$

最终的跳线估计值由下式给出:

$$\theta_{jump} = \theta_{l^*} \quad (18)$$

该方法将极坐标离散化与局部角度变化分析相结合, 以检测与太阳子午线相关的偏振跳跃线。

2.4 基于时序滤波的偏振模式融合算法

通过基于时间平滑的加权矢量平均方法, 利用指数衰减函数将镜面对称和反对称这两种方法对应的 MSE 值转换为权重:

$$w = \exp\left(-\alpha \frac{MSE}{MSE_{max}}\right) \quad (19)$$

其中, 参数 α 控制衰减速率。归一化后的权重 w_{mirror}^{norm} 和 w_{jump}^{norm} 分别用于量化对称性估计与反对称估计的相对置信度。为处理偏振方向固有的 180° 对称性, 两种估计角度均通过二倍角公式转换为向量表示:

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta \\ \sin 2\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (20)$$

通过加权组合对向量进行融合, 其表达式为:

$$\mathbf{v}_{fused} = w_{mirror}^{norm} \mathbf{v}_{mirror} + w_{jump}^{norm} \mathbf{v}_{jump} \quad (21)$$

最终的融合角度, 由融合后的向量反解得到:

$$\theta_{fused} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{v_{fused,y}}{v_{fused,x}}\right) \quad (22)$$

在天空偏振导航中, 太阳方位本身遵循连续且规律的物理运动轨迹。然而, 基于单帧图像分析得到的方向估计值易受短时突变的干扰, 此类干扰可能源于瞬时云层遮挡、传感器噪声或图像处理伪影, 通常表现为违背太阳轨迹固有物理连续性的异常值。为抑制方向角序列中的短期跳变, 采用基于圆形差分的自适应指数平滑技术进行时序滤波。该方法通过融合当前观测值与历史估计值实现轨迹平滑, 其平滑公式如下:

$$\theta_{filtered}^{(t)} = \theta_{filtered}^{(t-1)} + \beta_{eff} (\theta_{fused}^{(t)} - \theta_{filtered}^{(t-1)}) \quad (23)$$

其中, $\theta_{filtered}^{(t)}$, $\theta_{filtered}^{(t-1)}$ 为时间 t 和 $t-1$ 的平滑估计值, β_{eff} 为自适应平滑因子, $\theta_{fused}^{(t)}$ 为时间 t 的原始测量值。为实现 $\theta_{filtered}^{(t)}$ 的自适应调整, 基于 $DOLP$ 镜面对称性检测与 $AOLP$ 反对称性检测的 MSE 直接计算得出当前帧的融合权重。其中, $DOLP$ 的 MSE 越小, 镜面对称性越好, 估计越可靠; 而 $AOLP$ 的 MSE 越大, 反对称性越显著。随后, 通过指数衰减函数(公式 19)将这两种 MSE 动态转换为权重: $DOLP$ 的权重随其 MSE 减小而增大,

$AOLP$ 的权重随其 MSE 增大而增大。该自适应机制使得融合权重能够根据每一帧的实际图像质量动态调整, 无需人工设定固定参数。

3 基于微偏振阵列的大气偏振模式外场测试方法

为验证方法的可行性与准确性, 本文在多种天气条件下开展一系列实实验证。试验使用的全天空偏振信息获取装置如图 4 所示。

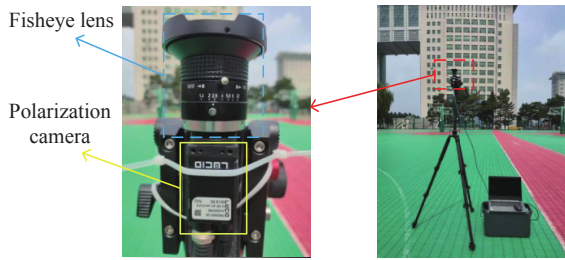


图 4 全天空偏振模式获取装置

Fig. 4 All-sky polarization pattern acquisition device

该装置由搭载微偏振阵列的偏振相机与鱼镜头构成。微偏振阵列集成于传感器上, 无需机械运动部件即可瞬时完成偏振信息测量。如图 5 (a) 所示, 该阵列采用 2×2 超像素架构。每个超像素包含四个覆盖微偏振片的像素, 其方向分别为 0° 、 45° 、 90° 和 135° (图 5(b) 所示)。该相机在单次曝光中同步获取全视场的线偏振信息, 避免了顺序偏振测量的时间伪影, 从而快速捕捉动态天气条件下的偏振图像。

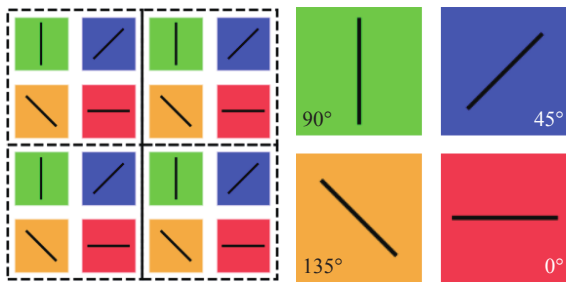


图 5 2×2 超像素微偏振器阵列示意图

Fig. 5 Schematic of the 2×2 superpixels micro-polarizer array

相机的原始测量值是每个像素的强度值 (I_0 , I_{90} , I_{45} , I_{135})。这些强度与线性斯托克斯参数直接相关。对于每个超像素, 斯托克斯向量 (I, Q, U) 通过以下关系计算:

$$S = \begin{cases} I = (I_0 + I_{90} + I_{45} + I_{135})/2 \\ Q = I_0 - I_{90} \\ U = I_{45} - I_{135} \end{cases} \quad (24)$$

随后, $DOLP$ 和 $AOLP$ 可根据斯托克斯参数推导如下:

$$DOLP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (25)$$

$$AOLP = \theta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{U}{Q}\right) \quad (26)$$

采集装置主要由偏振相机和鱼镜头组成, 其具体参数总结于表 1。

表 1 采集装置的具体参数

Tab. 1 Specific parameters of the acquisition device

		Model	TRI050S-QC
Polarization camera	Sensor	Sony IMX250MYR	
	Pixel size / $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$	3.45(H) \times 3.45(V)	
	Resolution / px	2448 \times 2048	
		Model	CA3580B
Fisheye lens	Field of view / $^\circ$	152	
	Focal length / mm	3.5	

采集装置安装完成后, 在长春理工大学等地开展数据收集, 进而捕捉多种天气条件下的全天空偏振模式, 外场测试条件详见表 2。

表 2 外场测试条件总结

Tab. 2 Summary of field measurement conditions

Date(year/month/day)	Latitude and longitude($^\circ\text{N}/^\circ\text{E}$)	Weather
2024/10/30	43.835 6/125.323 1	dust
2025/9/2	43.828 1/125.307 8	fog
2025/9/3	43.828 1/125.307 8	cloudy
2025/9/10	35.768 6/120.030 3	sunny

4 结果与分析

4.1 典型天气下不同子午线提取方法结果与分析

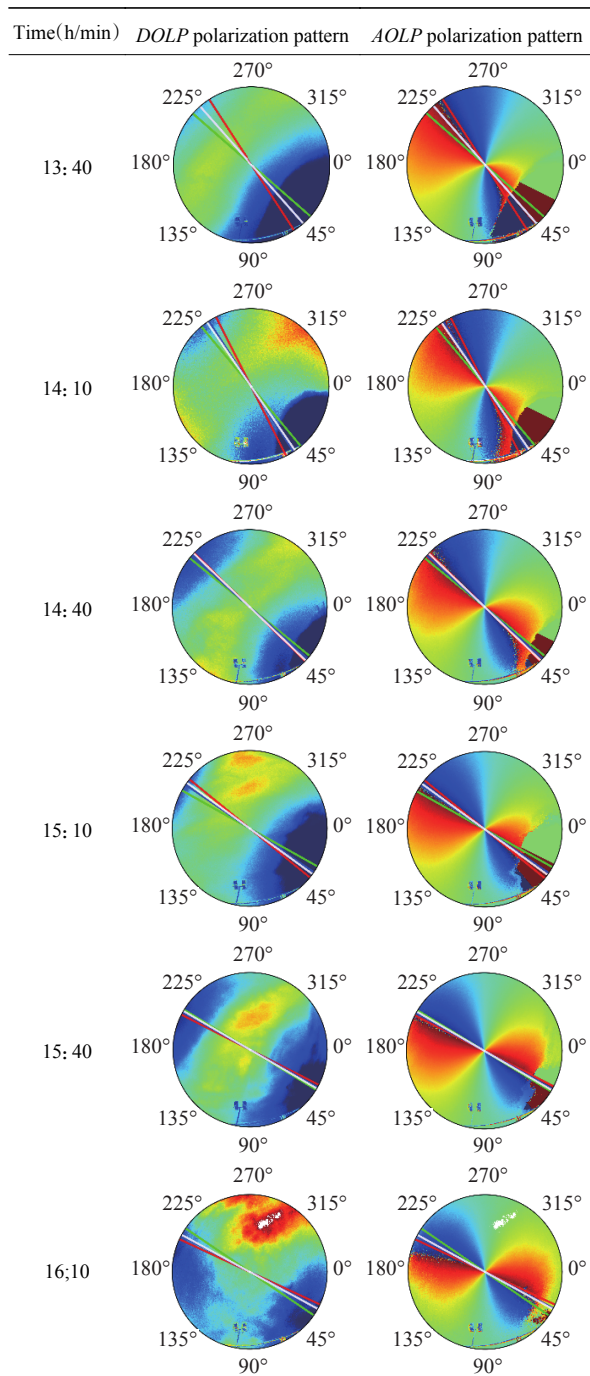
4.1.1 不同子午线提取方法结果

采用图 4 所示装置, 在表 2 所列地点分别采集了雾天、多云、晴天各连续 3 天不同时刻的样

本, 以及沙尘天气 2 天的样本。由于观测位置固定, 太阳子午线日变化较小(约 $1^\circ/\text{天}$), 因此各天气条件下的提取结果差异不大。受篇幅限制, 本文仅展示每种天气各 1 天的数据提取结果。表 3 至表 6 以极坐标形式展示了四种天气下不同方法提取的偏振模式空间分布: 绿色线基于 *DOLP*, 红色线基于 *AOLP*, 蓝色线为二者直接融合, 白色线为融合后滤波的结果。

表 3 沙尘天气下的偏振模式图案

Tab. 3 Polarization pattern under dust weather



续表 3

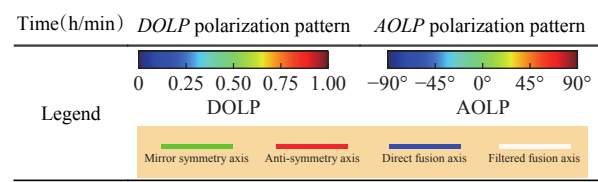
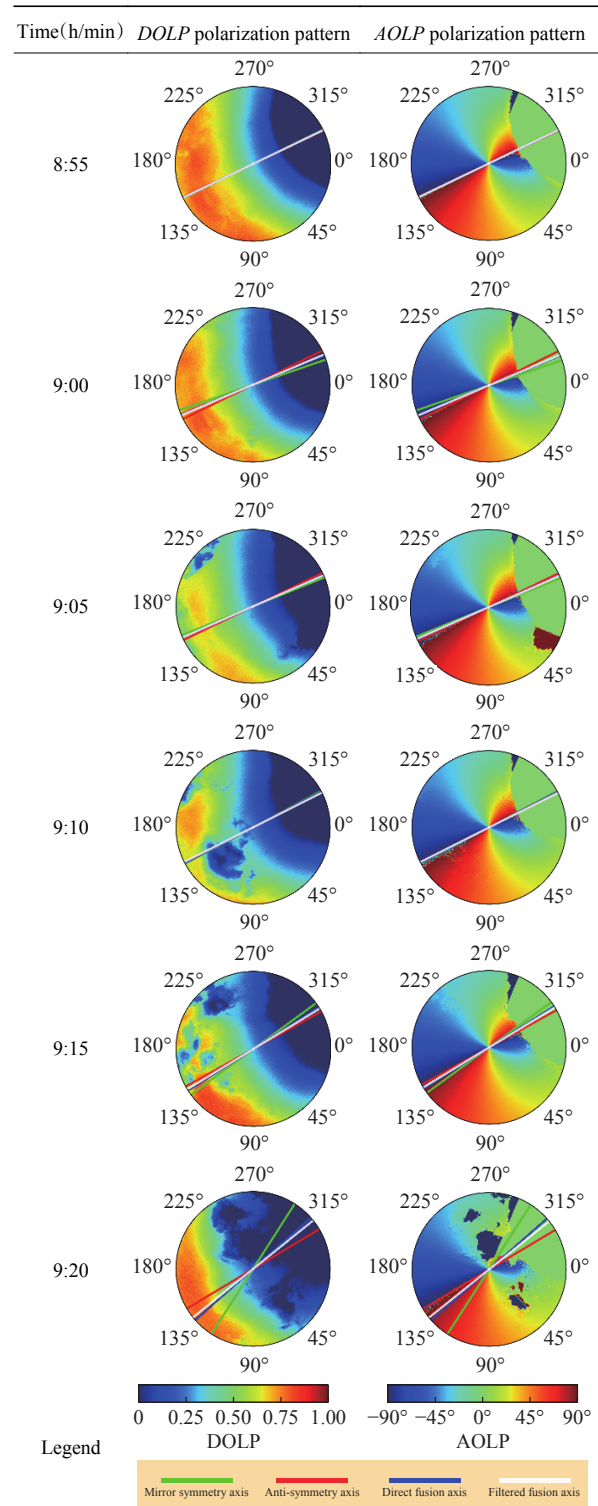


表 4 雾天下的偏振模式图案

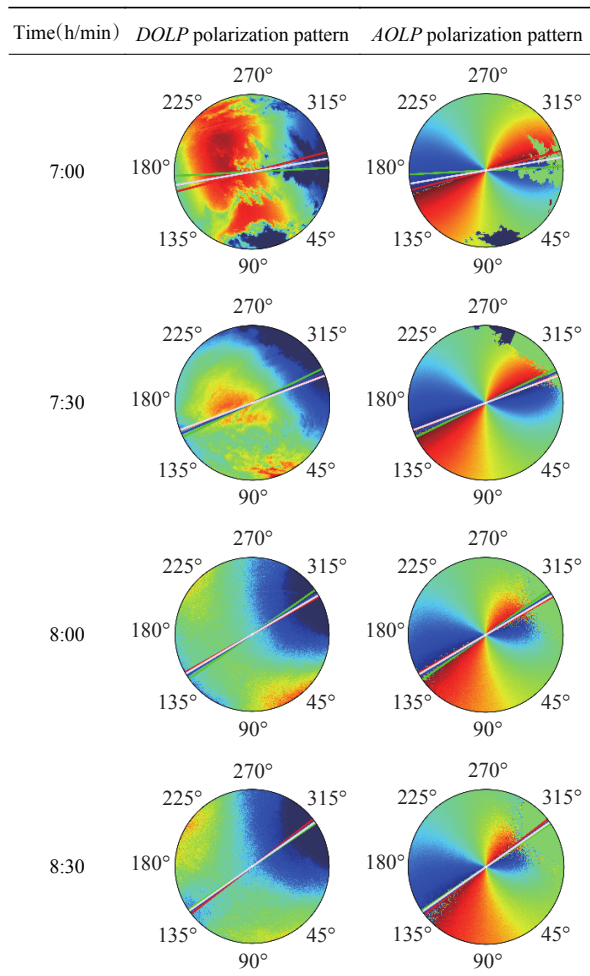
Tab. 4 Polarization pattern under fog weather



该可视化结果揭示了两种偏振线索的互补特性。对于雾天(表 3)和沙尘(表 4)等低能见度天气环境,低能见度主要降低 *DOLP* 数值大小,但并未破坏其空间镜面对称结构;仅当出现非均匀遮挡或多峰散射时,该对称性才被破坏。*Mie* 散射占优时,*Rayleigh* 散射模型并不严格适用,多重散射效应会弱化 *DOLP* 的镜面对称结构,但其宏观模式仍能提供全局一致性的标量信息。同时,*AOLP* 的矢量反对称性其偏振模式会偏离理想的 8 字形分布,导致直接提取的太阳子午线从直线变为弯曲的径向轮廓。可见,两种对称性在 *Mie* 散射下均会退化,但并未完全消失。为抑制由此引起的估计值局部跳变,本文采用四分位距方法剔除离群值,并结合基于太阳运动连续性的时序滤波进行平滑处理。此外,利用 *DOLP* 模式校正 *AOLP* 中因对称轴弯曲而产生的偏差,实现两者的性能互补。

表 5 多云天气下的偏振模式图案

Tab. 5 Polarization pattern under cloudy weather



续表 5

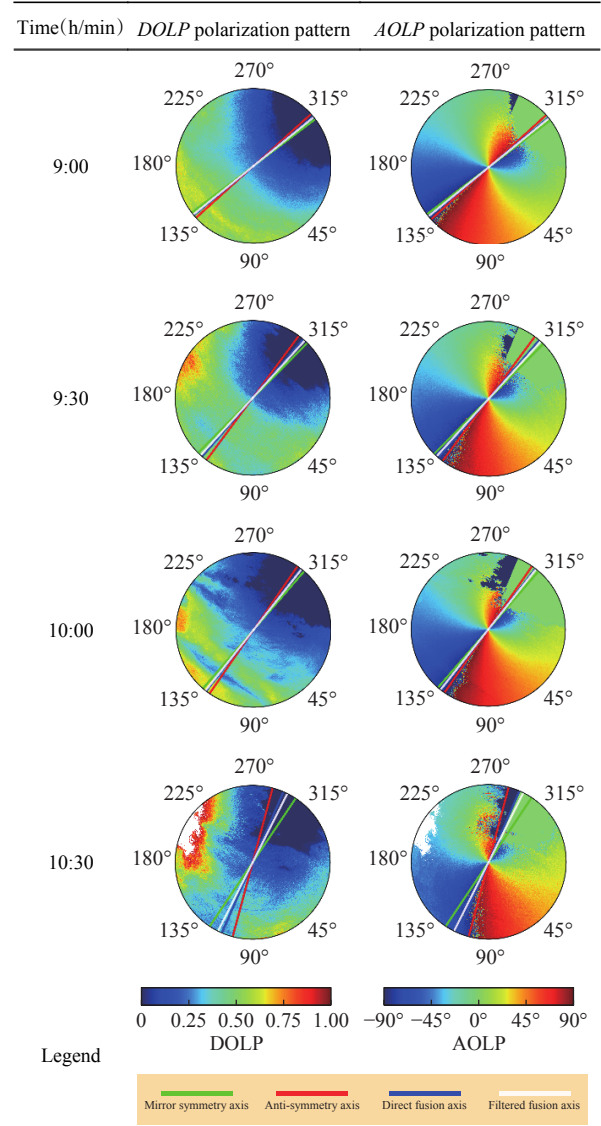
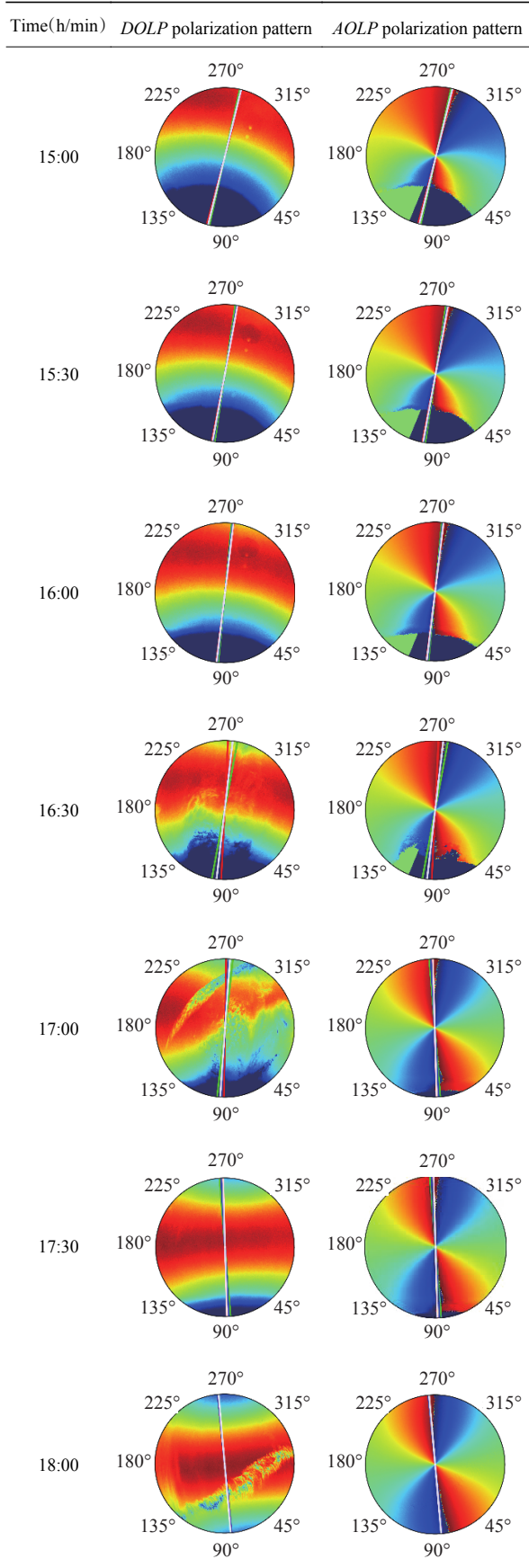


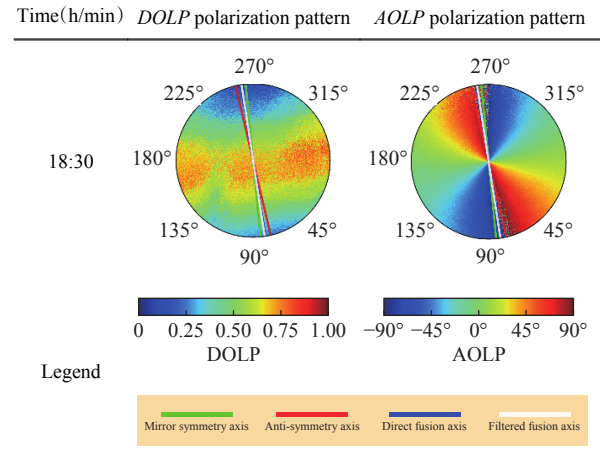
表 5 和表 6 进一步表明,融合 *DOLP* 镜面对称与 *AOLP* 反对称这两个独立的物理特征,并辅以时序滤波处理,能够有效提升太阳子午线估计的稳定性与精度。其融合的依据在于:二者源于同一大气散射过程,共同约束太阳子午线位置,但约束方式相互独立,且对大气扰动的响应特性不同——*DOLP* 主要受气溶胶浓度等全局参数影响,表现为整体数值衰减,但其镜面对称轴的空间位置相对稳定;*AOLP* 则表现为局部噪点增加,但其反对称轴的指向在统计意义上仍保持一定稳定性。基于这一互补的退化模式,本文利用 *DOLP* 的全局约束抑制局部噪声干扰,同时借助 *AOLP* 的反对称特性弥补 *DOLP* 的全局弱化问题,并通过均方误差动态评估与指数加权实现两种特征的融合,从而实现全局与局部偏振信息的有效协同。

表 6 晴天下的偏振模式图案

Tab. 6 Polarization pattern under sunny weather



续表 6

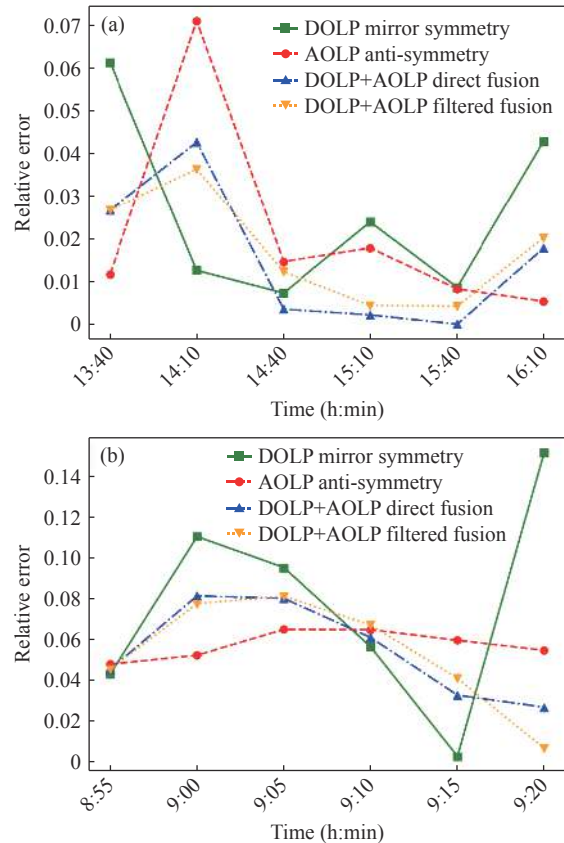


4.1.2 不同子午线提取方法结果的定量分析

为定量评估不同天气下算法的性能,对以下四种方法进行了比较和消融分析(见图 6):基于 DOLP 的镜面对称法、基于 AOLP 的反对称法、DOLP+AOLP 直接融合法,以及 DOLP+AOLP 融合后滤波法。

图 6 中的相对误差 $\delta(t)$ 定义为各方法所得方位角 $\theta_{method}(t)$ 与天文基准方位角 $\theta_{astronomy}(t)$ 之间的偏差:

$$\delta(t) = \left| \frac{\theta_{method}(t) - \theta_{astronomy}(t)}{\theta_{astronomy}(t)} \right|, \quad (27)$$



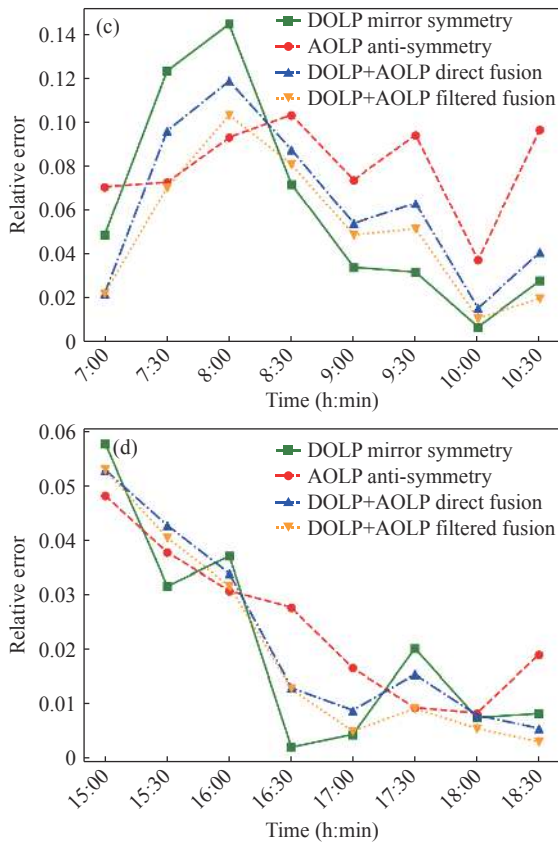


图6 不同天气条件下的 *DOLP* 镜面对称、*AOLP* 反对称、*DOLP+AOLP* 直接融合及 *DOLP+AOLP* 融合后滤波的相对误差比较

Fig. 6 Relative error comparison of *DOLP* mirror symmetry, *AOLP* anti-symmetry, *DOLP+AOLP* direct fusion, and *DOLP+AOLP* filtered fusion under different weather conditions

其中,天文基准太阳方位角依据地球模型^[23]计算。该模型基于国际地球参考框架(ICRF3),其输出仅依赖于观测点的地理经纬度与时刻,而与沙尘、雾、多云、晴天等天气条件无关。具体计算步骤如下:首先根据观测时刻的积日计算太阳赤纬和时差,进而结合观测点经度将北京时间转换为地方真太阳时以获取太阳时角;随后,基于观测点纬度、太阳赤纬和太阳时角,采用球面天文学中标准公式计算太阳方位角。

如图6(a),在沙尘条件下,本文融合后滤波法取得了最低的平均相对误差(0.0175),其误差波动范围也最为集中(0.0044–0.0364)。相比之下,两种基线方法的误差范围明显更宽,反映出更高的波动性。

如图6(b)所示,在雾天条件下,融合后滤波法不仅在整体上保持了最低的平均相对误差,还

有效解决了镜面对称性弱化的问题。尤其在9:20时刻,基于*DOLP*的镜面对称法出现了显著误差(相对误差为0.1516),这源于该时刻*DOLP*偏振图样的全局对称性发生偏移(见表4中9:20的*DOLP*)。同时,基于*AOLP*的反对称法也产生较大误差(相对误差为0.0549),其原因是*AOLP*偏振图样中的“8”字形局部缺失,导致提取结果不准确(见表4中9:20的*AOLP*)。相比之下,直接融合法在9:20的相对误差为0.027,而进一步结合了太阳运动规律的时序滤波后,融合后滤波法的相对误差降低至0.007。

如图6(c)所示,在多云条件下,早晨7:00至8:00期间,云层干扰导致基于*DOLP*的镜面对称法提取精度出现轻微波动。但随后(8:00至10:30),*DOLP*法精度的提升有效校正了*AOLP*反对称法在局部噪声下的估计偏差。直接融合法的相对误差趋势与*DOLP*法基本一致,但数值显著降低。进一步引入时序滤波后,融合后滤波法的相对误差相较于直接融合法又得到明显抑制。

如图6(d),在晴天条件下,各方法初始误差水平接近,而融合后滤波法的相对误差随时间呈整体下降趋势,表明其在稳定光照环境下具备自我校正的性能。

为进一步定量分析图6中各方法的平均相对误差,统计结果如表7所示。

表7 不同天气条件下各算法的平均相对误差

Tab. 7 Mean relative errors of each algorithm under different weather conditions

Method Weather	<i>DOLP</i> mirror symmetry	<i>AOLP</i> anti- symmetry	<i>DOLP+AOLP</i> direct fusion	<i>DOLP+AOLP</i> filtered fusion
Dust	0.026	0.021	0.016	0.017
Fog	0.076	0.057	0.055	0.053
Cloudy	0.061	0.080	0.062	0.051
Sunny	0.021	0.025	0.023	0.020

在四种典型天气下,融合后滤波法的平均相对误差均低于单一*DOLP*镜面对称法及*AOLP*反对称法。针对非理想天气下镜面对称法可靠性下降的问题,即当偏振度数值过低导致其可靠性下降时,该方法通过公式(19)的指数衰减函数自适应调整权重,自动降低不可靠的*DOLP*权重,转而更多依赖*AOLP*信息。

DOLP+*AOLP* 直接融合法能够抑制 *DOLP* 镜面对称和 *AOLP* 反对称处理中的异常值, 使结果更趋于真实太阳子午线方向, 而在此融合基础上, 结合时序滤波能够在一定程度上抑制融合结果的随机波动, 除沙尘天气误差微增 0.001 外, 其余三种天气下的误差均进一步降低, 表明时序滤波具有可重复的增量效益。沙尘天气下的微小误差增加与环境扰动有关, 但不影响滤波方法在多数天气条件下的有效性。

4.2 典型子午线提取方法结果比对

本文采集的典型天气偏振图像数据集, 涵盖了沙尘、雾天、多云及晴天四种天气条件。基于上述实际采集的偏振图像作为统一输入数据, 再此基础上应用文献 [13][14][16] 中的太阳子午线提取方法与本文采用方法进行对比, 各方法在四种天气条件下的平均相对误差, 见表 8 所示。所有方法均采用完全相同的输入数据, 即同一组图像在相同天气、采集时间及光照条件下的原始偏振信息。

如表 8 所示, 本文融合后滤波法在沙尘(0.017)、多云(0.051)和晴天(0.020)条件下均实现了最低的平均相对误差。这些结果表明, 与现有方法相比, 该方法在多种大气场景下均能提供更低的误差率。

参考文献:

- [1] CHIPMAN R A, LAM W S T, YOUNG G. *Polarized Light and Optical Systems* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- [2] HENSGEN R, ZITRELL F, PFEIFFER K, et al.. Performance of polarization-sensitive neurons of the locust central complex at different degrees of polarization[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2022, 208(3): 387-403.
- [3] GREIF S, BORISSOV I, YOVEL Y, et al.. A functional role of the sky's polarization pattern for orientation in the greater mouse-eared bat[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4488.
- [4] LEBHARDT F, RONACHER B. Transfer of directional information between the polarization compass and the sun compass in desert ants[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2015, 201(6): 599-608.
- [5] UGOLINI A, YAMAHAMA Y, HARIYAMA T, et al.. The use of the skylight polarization gradient in young sandhopper's orientation[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 17438.
- [6] DUPEYROUX J, DIPERI J, BOYRON M, et al.. A bio-inspired celestial compass applied to an ant-inspired robot for autonomous navigation[C]. *2017 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*, IEEE, 2017: 1-6.
- [7] SERRES J R, LAPRAY P J, VIOLLET S, et al.. Passive polarized vision for autonomous vehicles: a review[J]. *Sensors*, 2024, 24(11): 3312.
- [8] SHABAYEK A E R, DEMONCEAUX C, MOREL O, et al.. Vision based UAV attitude estimation: progress and insights[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, 65(1-4): 295-308.
- [9] ZHAO D H, LIU Y Z, WU X D, et al.. Attitude-Induced error modeling and compensation with GRU networks for the polarization compass during UAV orientation[J]. *Measurement*, 2022, 190: 110734.
- [10] LI SH, DAI C M, CHENG J M, et al.. Advanced simulation and measurement of skylight polarization patterns across distinct aerosol type environments[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 967: 178768.

表 8 不同方法提取太阳子午线的平均相对误差

Tab. 8 Mean relative errors of solar meridian extraction by different methods

Literatures Weather	[13] Improved Harmony search	[14] Least Square	[16] Ellipse Hough Transform	This paper
Dust	0.024	0.150	0.035	0.017
Fog	0.085	0.207	0.043	0.053
Cloudy	0.206	0.154	0.094	0.051
Sunny	0.052	0.089	0.024	0.020

5 结 论

本文提出一种融合 *DOLP* 镜像对称性与 *AOLP* 反对称不连续性以提取太阳子午线的计算框架。该双路径分析方法结合自适应时序滤波机制, 在沙尘天、雾天、多云及晴天等多种气象条件下均通过实验验证。结果表明, 相较于单一偏振线索方法, 融合后滤波法能够降低方位估计误差, 在变化环境中展现出作为航向参考的实际应用潜力。本研究证实了互补偏振线索融合的可行性, 所采用的全局与局部特征相结合的数学框架, 可进一步拓展至大气光学及自主导航等领域。后续将在不同观测地点以及不同典型天气下开展重复性实验, 以进一步验证本文方法的有效性。

- [11] BECK M, ALTHAUS V, PEGEL U, *et al.*. Neurons sensitive to non-celestial polarized light in the brain of the desert locust[J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2023, 209(6): 907-928.
- [12] MA T, HU X P, ZHANG L L, *et al.*. An evaluation of skylight polarization patterns for navigation[J]. *Sensors*, 2015, 15(3): 5895-5913.
- [13] 杨江涛, 王明凯, 刘思拓, 等. 仿生偏振光罗盘太阳位置检测方法[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(3): 548-559.
YANG J T, WANG M K, LIU S T, *et al.*. Detection method of solar position using a biomimetic polarized light compass[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(3): 548-559. (in Chinese).
- [14] LIU B B, FAN ZH G, WANG X Q. Solar position acquisition method for polarized light navigation based on ∞ characteristic model of polarized skylight pattern[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 56720-56729.
- [15] 华豆, 范之国, 金海红, 等. 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[J]. *光学学报*, 2022, 42(22): 2211003.
HUA D, FAN ZH G, JIN H H, *et al.*. Influence of initial orientation of polarizer in imaging system on measurement accuracy of atmospheric polarization pattern and correction method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(22): 2211003. (in Chinese).
- [16] 黄玺铭, 胡摇, 郝群, 等. 一种基于视觉信息与偏振天光信息融合的航向角提取方法[J]. *光学技术*, 2022, 48(5): 554-561.
HUANG X M, HU Y, HAO Q, *et al.*. A heading angle extraction method based on fusion of visual information and polarized skylight information[J]. *Optical Technique*, 2022, 48(5): 554-561. (in Chinese).
- [17] WANG J, HU P W, QIAN J Q, *et al.*. Confocal ellipse Hough transform for polarization compass in the nonideal atmosphere[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 5010108.
- [18] 周钰聪, 叶超, 林子涵, 等. 复杂场景下偏振导航自适应图像分割算法[J]. *光学学报*, 2024, 44(19): 1910002.
ZHOU Y C, YE CH, LIN Z H, *et al.*. Self-adaptive image segmentation algorithm for polarization navigation under complex scenes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(19): 1910002. (in Chinese).
- [19] SHEN CH, WU Y CH, QIAN G Y, *et al.*. Intelligent bionic polarization orientation method using biological neuron model for harsh conditions[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2025, 47(2): 789-806.
- [20] LIU X J, LIU J, HU P W, *et al.*. A highly robust bionic polarization orientation method for night applications[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2026, 39(1): 103749.
- [21] MIRZAKHANI H. *Interpretable machine learning-based algorithms for cardiac anomaly detection*[D]. Turin: Politecnico di Torino, 2024.
- [22] 钟玉泉. 复变函数论[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2004.
ZHONG Y Q. *Theory of Functions of A Complex Variable*[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2004. (in Chinese)(查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译, 请确认).
- [23] CHARLOT P, JACOBS C S, GORDON D, *et al.*. The third realization of the International Celestial Reference Frame by very long baseline interferometry[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 644: A159.

作者简介:



苏杭 (1999—), 女, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事大气偏振散射方面的研究。E-mail: Suhangcust@outlook.com



张肃 (1985—), 女, 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2014 年于长春理工大学获得光学工程博士学位, 主要从事大气光学、偏振传输方面的研究。E-mail: susiezhang21@126.com