

基于波前结构函数的扩展目标大气相干长度测量

张峻瑞 赵玉玲 杨乐强 刘杰 王文宇 李正炜 王建立 陈涛

Measurement of atmospheric coherence length for extended targets based on wavefront structure function

ZHANG Jun-rui, ZHAO Yu-ling, YANG Le-qiang, LIU Jie, WANG Wen-yu, LI Zheng-wei, WANG Jian-li, CHEN Tao

引用本文:

张峻瑞, 赵玉玲, 杨乐强, 刘杰, 王文宇, 李正炜, 王建立, 陈涛. 基于波前结构函数的扩展目标大气相干长度测量[J]. *中国光学*, 2026, 19(2): 337–346. doi: 10.37188/CO.2024–0215

ZHANG Jun-rui, ZHAO Yu-ling, YANG Le-qiang, LIU Jie, WANG Wen-yu, LI Zheng-wei, WANG Jian-li, CHEN Tao. Measurement of atmospheric coherence length for extended targets based on wavefront structure function[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(2): 337–346. doi: 10.37188/CO.2024–0215

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0215>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

大气湍流对高分辨率遥感卫星定位精度的影响分析

Effect of atmospheric turbulence on the tracking accuracy of high-resolution remote sensing satellites
中国光学 (中英文). 2023, 16(3): 550 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0196>

基于差分传递函数法的大口径平面镜检测

Detection of large aperture flat mirror based on the differential optics transfer function method
中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 992 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0122>

空间目标地基观测红外辐射特性研究

Infrared radiation characteristics of space target based on ground-based detector
中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1424 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0032>

扫频光学相干层析视网膜图像配准去噪算法

Speckle noise reduction in swept-source optical coherence tomography by retinal image registration
中国光学 (中英文). 2021, 14(2): 289 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0130>

扭曲拉盖尔—高斯关联光束对大气湍流传输影响的抑制

Suppression of the influence of atmospheric turbulence during the propagation of a twisted Laguerre-Gaussian correlated beam
中国光学 (中英文). 2021, 14(3): 704 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0138>

文章编号 2097-1842(2026)02-0337-10

基于波前结构函数的扩展目标大气相干长度测量

张峻瑞^{1,2}, 赵玉玲^{1,2,3}, 杨乐强^{1*}, 刘杰¹, 王文宇^{1,2}, 李正炜¹, 王建立¹, 陈涛¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 长光卫星技术股份有限公司, 吉林 长春 130102)

摘要: 为测量大气相干长度这一表征大气湍流对自由空间光通信链路性能影响的重要指标, 提出了一种将扩展目标作为信息源的新策略, 即结合波前结构函数法与扩展目标偏移量算法直接对大气相干长度进行估计。本文首先回顾了现有主流算法的原理及研究现状, 分析了现有算法对导星目标的依赖性及其在水平链路应用中的局限性。在此基础上, 提出一种将改进归一化互相关算法与波前结构函数法相结合的测量方案, 用于扩展目标场景估计大气相干长度。与传统测量方法相比, 该方法能够在水平链路基于扩展目标条件下有效开展测量, 同时显著减少了系统的复杂度和设备成本。为验证所提方法的有效性与测量精度, 本文设计开展了仿真与实验研究。结果表明, 该方法测得的相干长度值与差分像运动监测器法及波前相位方差法高度一致, 测量精度误差约为4%。这一结果证明了该方法在大气相干长度评估中的有效性, 可为提升自由空间激光通信的可靠性提供有效参考。

关键词: 自由空间光通信; 大气相干长度; 扩展目标; 波前结构函数法

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi:10.37188/CO.2024-0215 CSTR:32171.14.CO.2024-0215

Measurement of atmospheric coherence length for extended targets based on wavefront structure function

ZHANG Jun-rui^{1,2}, ZHAO Yu-ling^{1,2,3}, YANG Le-qiang^{1*}, LIU Jie¹, WANG Wen-yu^{1,2},
LI Zheng-wei¹, WANG Jian-li¹, CHEN Tao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun 130102, China)

* Corresponding author, E-mail: yanglq23@126.com

Abstract: To measure the atmospheric coherence length, an important parameter that characterizes the impact of atmospheric turbulence on the performance of free-space optical communication links, we propose a novel strategy for measuring atmospheric coherence length by taking extended targets as the information source, which integrates the wavefront structure function approach with the extended target offset algorithm to directly estimate the atmospheric coherence length. The paper first reviews the principles and current re-

收稿日期: 2024-11-26; 修订日期: 2024-12-12

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2021YFF0700704)

Supported by National Key R&D Program of China (No. 2021YFF0700704)

search status of mainstream algorithms, emphasizing the reliance of existing algorithms on guide star targets and their limitations in horizontal links. Subsequently, we propose a new measurement scheme that combines the improved normalized cross-correlation algorithm with the wavefront structure function method to estimate atmospheric coherence length under extended targets scenarios. In comparison to traditional measurement methods, our approach can realize coherence length measurement based on extended targets in horizontal links, thereby significantly reducing system complexity and equipment costs. To validate the effectiveness and measurement accuracy of the proposed method, both simulations and experiments were designed and conducted. The results demonstrate that the coherence length values measured by this method are highly consistent with those obtained using the DIMM method and the wavefront phase variance method, with a measurement accuracy error of approximately 4%. This indicates that the proposed method can effectively assess atmospheric coherence length, thereby providing a valuable reference for enhancing the reliability of free-space laser communication systems.

Key words: free-space optical communication; atmospheric coherence length; extended target; wavefront structure function method

1 引言

自由空间光通信 (Free-Space Optical Communication, FSOC) 通常使用窄光谱调制激光束作为载波信号, 实现两个固定节点之间的高速、安全无线数据传输。与无线电波等传统传输方式相比, 光束不受小区域干扰也无需频率协调, 不易受其他通信网络或电子设备产生的电磁干扰^[1-4]。然而, 在 FSOC 链路中, 激光束会部分或者完全穿过大气层, 大气湍流引发大气折射率随机波动, 进而导致波前相位畸变^[5], 限制了 FSOC 在星地激光通信领域的发展。

1965 年, Fried 提出了大气相干长度 r_0 (亦称 Fried 参数) 这一概念, 并将其作为描述光束在大气传播中保持相干性的特征尺度^[6]。大气相干长度反映了湍流强度, 并可表征波前相位和振幅的波动幅度。对于 FSOC 系统而言, 准确测量 r_0 可以有效评估链路通信质量, 为通信抗干扰系统设计提供重要依据。

现阶段测量大气相干长度的方法主要包括差分像运动监测器 (Differential Image Motion Monitor, DIMM) 方法、夏克哈特曼像运动监测器 (Shack-Hartmann Image Motion Monitor, SHIMM) 方法、波前结构函数法以及波前相位方差法^[7-8]。DIMM 方法通过计算两子孔径光斑到达角起伏方差来计算 r_0 。实质上是计算分离像质心相对位置

抖动量的时域统计方差, 因此可以有效避免非大气因素 (如望远镜跟踪、振动、光学质量和温度效应等) 所造成的误差影响^[9-11]。SHIMM 方法通过夏克哈特曼波前探测器 (Shack-Hartmann Wavefront Sensor, SHWFS) 透镜阵列代替 DIMM 中标准双孔光圈掩模以提高信噪比^[12-13]。波前结构函数法则依赖于 SHWFS 重构的波前相位差计算波前结构函数, 对比理论值求取 r_0 的最小二乘估计值^[14-15]。而波前相位方差法通过波前传感器获取波前 Zernike 系数, 再通过计算一段时间的 Zernike 系数方差以估计 r_0 ^[8, 16]。

近年来, 研究人员对这些方法进行了系列优化与迭代。例如使用三孔径、四孔径 DIMM 进行湍流测量^[17-19]; 使用相邻帧之间的图像运动相关性或加权函数形式补偿短曝光湍流效应与不同湍流高度变化^[20]; 或结合多孔径闪烁传感器 (Multi-Aperture Scintillation Sensor, MASS)、闪烁检测与测距 (SCIDAR) 以及斜率检测和测距 (SLODAR) 等装置在不同大气与环境条件下进行多层湍流的研究^[13, 19, 21-24]。尽管上述研究通过结合具有不同探测原理的传感装置或增强时空采样来提高大气相干长度的测量精度, 但大多数研究仍集中在点源场景中垂直通信链路中的应用, 对于扩展场景中远程分析地表层水平湍流特性的研究则相对不足。尽管可以通过大气湍流廓线雷达发射聚焦光束 (如瑞利信标) 来标定 r_0 ^[25-26], 但系统复杂、成本高, 且由于散射效率低, 在高层大气或远距离近

地面大气中难以精确反映湍流强度。此外, 在水平通信链路中设置合适的信标也对测量过程提出挑战。

与单一的点源目标相比, 扩展目标易于获取, 且可以选取高对比度目标来提高探测信噪比, 有效提高了光学系统对相位波动的敏感度。因此, 本文提出了一种新策略, 将波前结构函数法与 SHWFS 扩展目标偏移量算法相结合, 利用扩展目标作为直接探测的信息源来计算大气相干长度。这种方法不再依赖于传统方法中的激光导星信标装置, 从而有效降低了系统复杂度和设备成本。本文首先描述了现阶段大气相干长度测量的原理与方法, 重点介绍 DIMM 方法、波前相位方差法及波前结构函数法。而后通过可靠的湍流模拟方法和高可重复性的湍流相位板, 仿真验证并设计搭建测量系统进行实验验证。通过与应用点源目标质心算法的 DIMM 法和波前相位方差法的对比, 验证本文方法的有效性及其测量精度。最后总结与讨论本文的研究工作及算法性能, 对算法后续改进方向做出展望。

2 大气相干长度测量算法及原理

2.1 差分像运动监测器方法

Stock 和 Keller 在 1960 年提出了通过 DIMM 测量大气相干长度的方法。DIMM 由观测望远镜和双孔光圈掩模组成, 并连接一块 CCD 进行成像。DIMM 通过测量入射畸变波前在望远镜入瞳面的子孔径到达角起伏的相对方差来求取 r_0 , 体现在 CCD 上即为两星象位置的随机抖动, 如图 1 (彩图见期刊电子版) 所示。按照两个正交方向分别计算抖动量方差, 相对于两子孔径中心的连线, 一个为径向, 另一个为横向。差分像间径向与横向连线的到达角相对方差 σ^2 与 r_0 的关系如下式:

$$\sigma_r^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.0986d^{-1/3}] \quad (1)$$

$$\sigma_t^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}] \quad (2)$$

式中 D 为望远镜子孔径直径, d 为子孔径间距, λ 为波长, σ_r^2 和 σ_t^2 分别表示平行和垂直于子孔径连线方向上的图像抖动量方差。基于泰勒湍流冻结假设与 Kolmogorov 湍流统计理论, r_0 在统计上与方向无关, 将两式合并可得 r_0 的计算公式:

$$r_0 = \left[\frac{2\lambda^2(0.358D^{-1/3} - 0.242d^{-1/3})}{(\sigma_r^2 + \sigma_t^2)} \right]^{3/5} \quad (3)$$

实际测量中, 一般通过两子孔径图像质心相对位置方差来求取到达角方差, σ_r^2 与 σ_t^2 满足:

$$V = (\sigma_r^2 + \sigma_t^2)f^2 \quad (4)$$

式中 V 为相对位置方差, 将式 (4) 代入式 (3), 可得:

$$r_0 = \left[\frac{2\lambda^2 f^2 (0.358D^{-1/3} - 0.242d^{-1/3})}{V} \right]^{3/5} \quad (5)$$

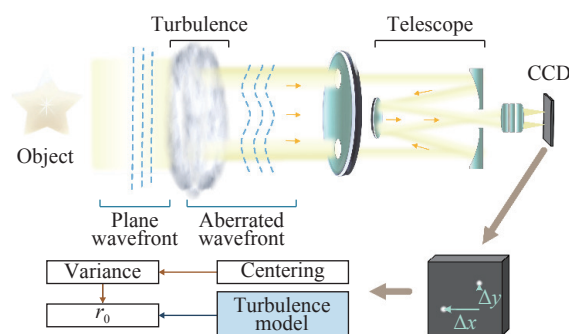


图 1 DIMM 测量大气相干长度原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of atmospheric coherence length measurement with DIMM

2.2 波前相位方差法

SHWFS 是现阶段自适应光学中应用最为广泛的波前探测器, 能够实现入射波前的有效探测并获取 Zernike 系数进行波前复原。在此基础上, Fried 给出了满足 Kolmogorov 湍流统计理论的各阶 Zernike 系数方差表, 如表 1 所示。

表 1 符合 Kolmogorov 理论的畸变波前各阶 Zernike 系数方差

Tab. 1 Variance of Zernike coefficients for each orders of distorted wavefront conforming to Kolmogorov theory

阶数	方差(rad ²)	阶数	方差(rad ²)
1	0.4479(D/r ₀) ^{5/3}	6	0.0061(D/r ₀) ^{5/3}
2	0.4480(D/r ₀) ^{5/3}	7	0.0062(D/r ₀) ^{5/3}
3	0.0230(D/r ₀) ^{5/3}	8	0.0062(D/r ₀) ^{5/3}
4	0.0230(D/r ₀) ^{5/3}	9	0.0062(D/r ₀) ^{5/3}
5	0.0232(D/r ₀) ^{5/3}	10	0.0024(D/r ₀) ^{5/3}

通过波前相位方差法计算大气相干长度的步骤如下: 首先通过 SHWFS 测量波前斜率并进行波前复原, 得到入射波前展开的各阶 Zernike 多项

式系数,而后计算时域统计的系数方差,并代入对应项公式,即可完成相干长度估计。

2.3 波前结构函数法

波前相位结构函数是畸变波前在光瞳面的空域一维统计特征,其定义为光瞳面上两不同空间间隔下矢量 x_1 和 x_2 波前相位差平方的统计均值,即:

$$D(r) = \langle [\varphi(x_1) - \varphi(x_2)]^2 \rangle, \quad (6)$$

式中 $r=x_1-x_2$, ϕ 为对应位置的相位, $\langle \rangle$ 表示时域统计平均值。由 Kolmogorov 湍流统计理论给出的湍流空间相关性与距离的关系, Fried 推导出波前相位结构函数公式:

$$D(r) = 6.88 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{5/3}, \quad (7)$$

式中, r_0 即为目标观测仰角处的大气相干长度。计算 r_0 首先需要通过 SHWFS 测得目标畸变波前的各阶 Zernike 系数,而后通过波前复原算法进行复原波前,减去系统初始像差得到相位值。选取不同位置参考点的波前相位差进行时域统计,得到波前结构函数测量值,通过式 (7) 求得理论波前结构函数,对比求得 r_0 的最小二乘估计值。本文选用波前结构函数法的原因在于该方法相较于前两种方法能够显著提高波前空间统计特性,从而获取更为丰富的波前信息。同时,由于该方法能够有效分析波前相位波动的统计特性,并不局限于 Kolmogorov 理论,因此也可以用于非 Kolmogorov 湍流的相干长度的计算。

2.4 扩展目标偏移量算法

根据前文所述,通过 DIMM 进行 r_0 测量首要的是获取 CCD 上两分离像偏移抖动量的方差;而波前相位方差法和波前结构函数法同样需要使用 SHWFS 获取子孔径图像的偏移量来求取入射波前斜率,从而获取 Zernike 系数以求取系数方差或重构相位差的时域统计。显然,目前大气相干长度测量算法中第一步即为计算 DIMM 和 SHWFS 中子孔径光斑或图像的偏移量。目前应用最广泛的扩展目标子孔径偏移量算法是归一化互相关函数,其将参考图像与待测图像的互相关值作为相似性测度。在标准归一化互相关函数的基础上,本文应用了陈亮等提出的结合边缘算法的改进归一化互相关(Improved Normalized Cross-

Correlation, I-NCC)算法^[27]。先通过 Canny 算子提取图像边缘掩模(边缘提取算法详见文献[28]),而后将互相关函数的平方作为新的度量函数,以减少灰度值差异较大的子孔径图像应用传统互相关函数时出现局部最值,如式(8)所示:

$$C^2(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [I_s(x, y) - \bar{I}_{u,v}]^2 [t(x-u, y-v) - \bar{t}]^2}{\sum_{x,y} [I_s(x, y) - \bar{I}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [t(x-u, y-v) - \bar{t}]^2}, \quad (8)$$

式中 I_s 为待测图像, \bar{t} 为模板图像的均值, $\bar{I}_{u,v}$ 为模板范围内 $I_s(x,y)$ 的均值。度量函数 $C^2(u,v)$ 最大值对应的 (u,v) 即为两图像偏移量。由式(8)求得 SHWFS 子孔径图像偏移量后,应用模式法重构波前相位,进而通过式(6)计算波前结构函数的测量值,并最终求得相干长度值。

3 算法仿真与分析

为验证算法可行性,本文分别设计了湍流相位屏和 SHWFS 的仿真实验。仿真湍流相位屏旨在有效生成不同强度的相位扰动以模拟特定相干长度的湍流环境,并能为计算值与理论值的误差提供直接的对比基础。仿真 SHWFS 是为了验证其对畸变波前的复原效果和可靠性,并能系统地评估不同相干长度条件下 SHWFS 获取湍流波前信息及相位重构能力,为扩展场景波前结构函数法提供有效的计算基础和可行性验证。

3.1 湍流屏仿真

本文采用的湍流屏仿真方法是由 M Charnotskii 提出的均匀波矢量稀疏谱(Sparse spectrum with Uniform wave vectors, SU)算法^[29],可以生成具有有限相位方差的无偏相位屏样本。

设置模拟的湍流屏参数如下:望远镜孔径 $D=1$ m,分别设置 r_0 为 0.1, 0.3, 0.5 和 0.7 m,在 1024×1024 的网格上生成波前相位图,如图 2(a)(彩图见期刊电子版)所示。可以观察到,当 $r_0 = 0.1$ m 时相位图波前起伏剧烈,这代表相位差异较大,并呈现出随机性和复杂性。随着 r_0 值的增大,相位分布逐渐趋于平滑,这表示湍流强度减小,尤其是当 $r_0 = 0.7$ m 时,波前相位的变化幅度明显下降,显示出更为平缓的相位分布。图 2(b)(彩图见期

刊电子版)展示了同一束光束经过不同强度湍流相位屏后的远场衍射图案。从结果可以观察到, 在 $r_0 = 0.1 \text{ m}$ 时衍射图案表现出较为模糊的光斑, 光强分布均匀度较低, 且光斑中心的强度并不突出, 湍流作用影响显著。当 $r_0 = 0.7 \text{ m}$ 时, 光斑对比度高且聚焦清晰。整个过程显示随 r_0 的增加, 湍流对光束的影响逐渐减弱, 光束的传播特性得到了明显改善。

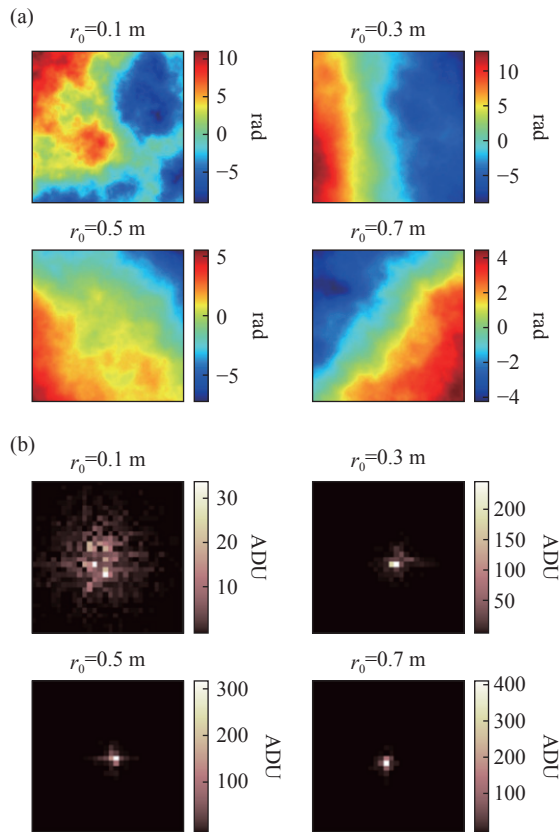


图 2 模拟湍流屏实验结果。(a) 不同 r_0 下 SU 算法生成的湍流相位屏; (b) 不同强度湍流相位屏对应的远场衍射图案

Fig. 2 Experimental results of the simulated turbulence screens. (a) Turbulence phase screens generated by the SU algorithm under different r_0 ; (b) far-field diffraction patterns corresponding to the phase screens with different turbulence intensities

图 3(a)(彩图见期刊电子版)展示了使用 SU 算法生成的 2000 帧独立湍流相位样本($r_0=0.3 \text{ m}$)的结构函数平均值与 Kolmogorov 理论期望值, 以及两者均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)。结果显示, 在不同相干长度下平均结构函数的模拟值与理论值高度吻合, 验证了 SU 算法在湍流模拟方面的有效性。值得注意的是, 在

图 3(a)中, 仿真数据的曲线平滑, 尽管 RMSE 呈现上升趋势, 但是整体误差仍保持在较低水平, 这表明 SU 算法在多个样本间表现出良好的可重复性和稳定性。

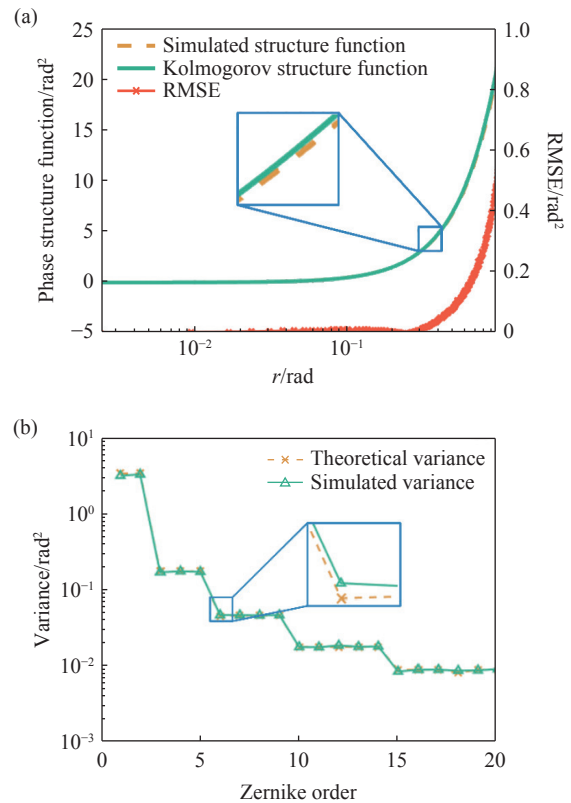


图 3 仿真湍流屏精确度验证。(a) 湍流相位屏平均结构函数与理论期望值(左)以及两者 RMSE(右); (b) 前 20 阶 Zernike 系数方差统计分布的时域统计值与理论值

Fig. 3 Accuracy validation of simulated turbulence screens. (a) The average structure function of the turbulent phase screen compared to the theoretical expected value (left), as well as the RMSE between them (right); (b) the temporal statistical values and theoretical values of variances distribution of the first 20 orders of Zernike coefficients

为进一步验证湍流模拟的准确性, 通过仿真 SHWFS 探测经过湍流屏后的畸变波前, 计算各阶 Zernike 系数并进行相关验证。SHWFS 仿真算法将在下一节进行详细描述。图 3(b)(彩图见期刊电子版)展示了前 20 阶 Zernike 系数方差的时域统计结果, 并与表 1 中湍流相位方差的理论值进行了比较。图中各阶 Zernike 系数的方差变化趋势反映了湍流对波前畸变影响的逐阶递减特性。低阶的 Zernike 系数(如倾斜和离焦项)方差

相对较高,代表着较大比例的低频波前畸变特征,说明大气湍流的主要影响体现在这部分。当阶数增加至高阶时,模拟值迅速下降但仍与理论值重合,这表明高频波前畸变已被有效地捕捉并重构,符合 Kolmogorov 谱的理论预期。仿真结果证明了湍流仿真算法的可行性与准确度。

3.2 夏克-哈特曼传感器仿真

本节将讨论夏克-哈特曼传感器仿真方法的实现及其相关结果。将通过 SU 方法生成的随机样本作为微透镜阵列前的入射畸变波前,使微透镜成像为畸变的光斑图像阵列,即为点源目标的成像。如图 4(彩图见期刊电子版)所示,选取 USAF1951 分辨率板中大小适中、特征明显的部分图像与此阵列进行卷积,以生成扩展目标 SHWFS 图像阵列。SHWFS 仿真参数设置如下:微透镜阵列采用 11×11 的排列,其中有效子孔径数量为 97 个。每个微透镜的焦距为 30 mm,微透镜间距为 $600 \mu\text{m}$ 。单个子孔径的像素数为 60×60 。入射光波长为 632.8 nm ,仿真采样数为 1024×1024 。入射 SHWFS 的波前尺寸为 6.6 mm ,由望远镜口径($D=1 \text{ m}$)缩束而得。

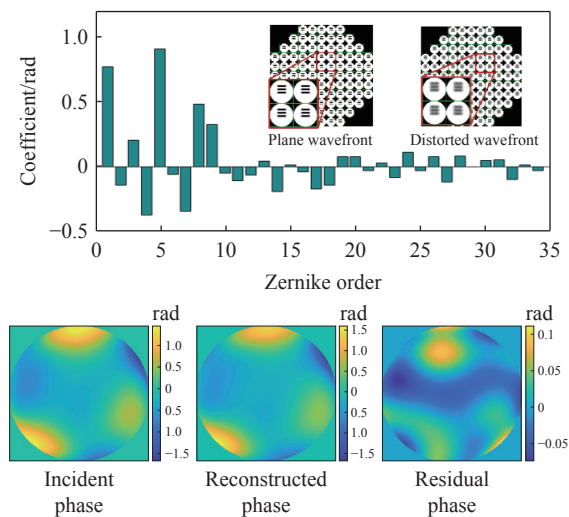


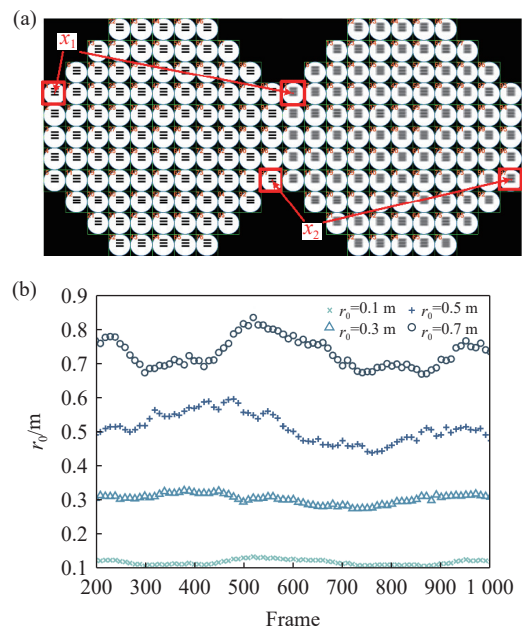
图 4 仿真 SHWFS 波前探测结果

Fig. 4 The wavefront detection results of the simulated SHWFS

选取随机生成的一帧相位屏样本作为预设输入畸变波前,采用 I-NCC 算法对入射斜率进行计算,并采用 Zernike 模式法进行波前重构。如图 4 所示。可见,SHWFS 能够较为精准地探测入射波前的各阶 Zernike 系数,重构残差 PV 值约为 0.15 rad ,证明了扩展目标偏移量算法和传感器仿

真的可行性与有效性。

现有研究表明,对湍流相位屏生成的相干长度 r_0 进行时域统计分析至少需要 200 幅畸变波前的观测数据^[30]。为深入探讨相干长度随时间变化的特性,预先生成了 4 个不同 r_0 值(0.1 m 、 0.3 m 、 0.5 m 和 0.7 m)的 4 组(1000 帧)相位数据,随后采用 SHWFS 对这 4 组相位进行波前复原。如图 5(a)(彩图见期刊电子版)所示,通过 97 个有效子孔径中的第 1 个和第 97 个子孔径中心位置距离作为 r 的最大值,计算波前结构函数,以估计 r_0 。图 5(b)(彩图见期刊电子版)展示了由每 200 帧相位数据滑窗绘制的 r_0 值随帧数增加的起伏曲线,其中第 201 帧的 r_0 数据源于第 2 至 201 帧波前结构函数计算的 r_0 均值。分析结果表明,利用波前结构函数法获得的 r_0 值与理论预期相符合,显示出良好的测量精度。此外,还针对信噪比对测量精度的影响展开了相关探索。如图 5(c)所示,当在子孔径图像中引入标准差 $\sigma < 0.2$ 的高斯噪声后,测得 r_0 值未见显著变化。但当标准差 σ 增加至 0.3 及以上时,观察到子孔径图像特征丢失严重,测量误差显著提高,测得 r_0 值不再可信。这一现象表明,低信噪比在扩展场景下应用波前相位差法时具有显著的干扰效应,限制了算法的测量精度。此外,将仿真参数调整至激光通信的常用波长 $\lambda=1550 \text{ nm}$,并进行了重复验证。结果表明,测得 r_0 曲线相较于 $\lambda=632.8 \text{ nm}$ 时未见显著波动差异,这在一定程度上验证了本文算法的鲁棒性。



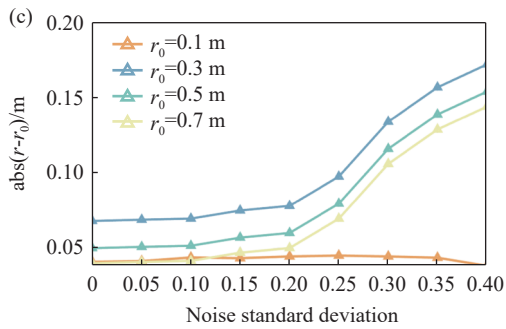


图 5 相干长度仿真结果。(a) 加入湍流前后的 SHWFS 子孔径阵列图像 (x_1 和 x_2 为用于计算的子孔径); (b) 不同湍流条件下, 每 200 帧波前结构函数测得的 r_0 曲线; (c) 加入不同标准差的高斯噪声后的 r_0 曲线

Fig. 5 Coherence length simulation results. (a) Sub-aperture array images of the SHWFS before and after the introduction of turbulence (x_1 and x_2 represent the sub-apertures used for calculation); (b) curves of r_0 measured from the wavefront structure functions every 200 frames under different turbulence conditions; (c) r_0 curve with added Gaussian noise of different standard deviations

4 测量实验与结果

为验证采用 I-NCC 算法的波前结构函数法测量相干长度的有效性, 设计并进行了一系列实验, 实验光路系统如图 6(彩图见期刊电子版)所示。光路中光源模块采用具有高稳定性的氦-氛

激光器 (波长 $\lambda = 633 \text{ nm}$) 以生成点源目标, 用于与扩展目标测量结果进行对比。同时, 通过覆盖可见光波段的 LED 光源透射过分辨率板 (USAF 1951) 以生成扩展目标。光束整形模块包含多个光学元件, 其中包括直径为 50.8 mm 、焦距分别为 100 mm 、 200 mm 、 300 mm 和 400 mm 的透镜系统。这些透镜组合成的扩束系统可以实现不同比例的缩放倍率, 包括 $1:4$ 、 $1:2$ 、 $3:4$ 以及 $1:1$ 。由于湍流相位屏的相干长度不变, 实验中利用孔径光阑变换湍流相位屏的通光口径来改变 D/r_0 值, 同时通过不同倍率透镜组合来保证 SHWFS 的入瞳光束尺寸不变。此外, 采用了 Lexitek 公司定制的相干长度为 0.3 mm ($\lambda=633 \text{ nm}$) 的湍流相位板, 其相位分布满足 Kolmogorov 湍流理论。扩束系统能够等比例扩展光束尺寸, 同时保持由湍流引起的相位波动不变, 这意味着扩束不会引入或改变波相差。光路通过设置孔径光阑和视场光阑来保证进入 SHWFS 的有效光瞳尺寸不大于 4 mm 。这样的设置可使在湍流屏通光孔径变化时波前测量能够保持可靠和一致。SHWFS 的实验参数设置如下: 光电探测器型号为 EoSens 1.1CXP2, 微透镜阵列呈正方形结构, 包含 89 个有效子孔径。单个子孔径的像素数为 28×28 , 总像素数为 308×308 。微透镜阵列的间距为 $383.6 \mu\text{m}$, 有效光瞳尺寸为 4 mm , 每个微透镜的焦距为 16.255 mm 。

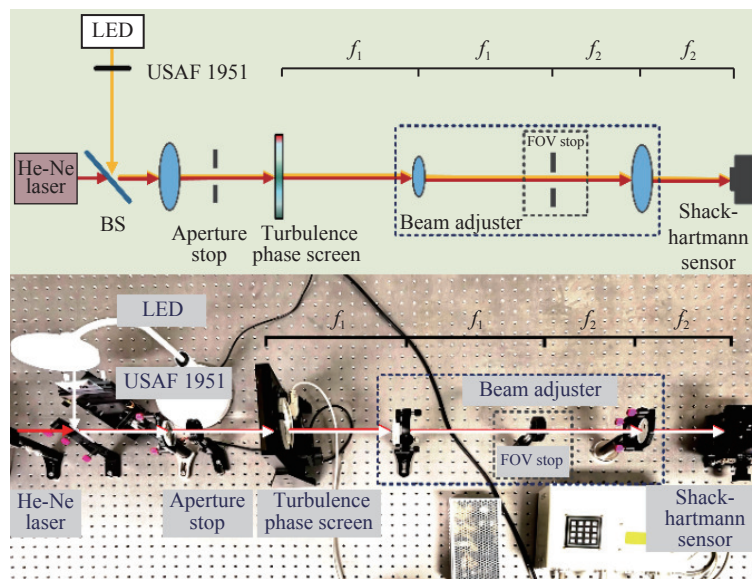


图 6 实验光路设计图及实际光路图

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental optical path and the actual optical path

为确保在点源和扩展场景下获得可靠的实验数据,激光器光束与 LED 光束通过分束器及准直透镜后进入湍流相位屏,并经扩束系统传输至 SHWFS。如图 5 所示,实验采用同光轴分时段测量的方式,合理设置湍流相位屏与 SHWFS 及光束整形系统之间的距离,以保证其处于共轭位置,从而确保点源场景与扩展场景测量结果之间的一致性和可比性。

在引入湍流相位屏之前,首先对光学系统整体进行校准,以确保激光和 LED 光能够通过分束器透射或反射至同轴位置。通过人为引入离焦相位,点源质心法和扩展源互相关算法结合 Zernike 模式法的复原结果显示离焦项 Zernike 系数误差低于 5%。校准结果表明,系统在此环境下具备高精度测量能力,为后续实验提供了可靠的参考基准。

在基于点源的 r_0 测量过程中,预设 SHWFS 的有效光瞳尺寸为 4 mm。激光光束通过湍流相位屏后,经过预设扩束比例的扩束系统,并通过孔径光阑及视场光阑,确保进入探测器的光束始终充满有效子孔径,探测器实时监测波前斜率的变化并计算相应的 r_0 值。随后,在保持其他实验条件不变的情况下,将目标切换为扩展目标并重复上述测量步骤。预设湍流相位屏的通光孔径分别为 1 mm、2 mm、3 mm 和 4 mm,最终在点源和扩展场景下各累计测量了 12 组 5000 帧数据。以每 200 帧输入波前的波前结构函数的平均值计算一个 r_0 值并进行滑窗绘制,得到了 r_0 的统计曲线。

图 7(彩图见期刊电子版)展示了在不同光瞳尺寸下,点源和扩展场景的实验测量结果。由图 7 可知,测量结果相对稳定,质心法和 I-NCC 算法与波前结构函数法结合均能实现较高精度的相干长度测量。值得注意的是,随着湍流相位屏有效通光孔径的增大,扩展场景下的子孔径图像逐渐弥散暗弱,形状也变得不固定,此时测得结果波动起伏明显增大,这表明入射光光强和模板选择的位置大小与测量精度密切相关。由此可以合理推断,当光源稳定性较差或过强的湍流导致 SHWFS 入瞳光束不稳定时,通过此方法测得的结果精度将会降低。因此对这些因素的定量分析及其鲁棒性优化将成为今后研究的重要方向。

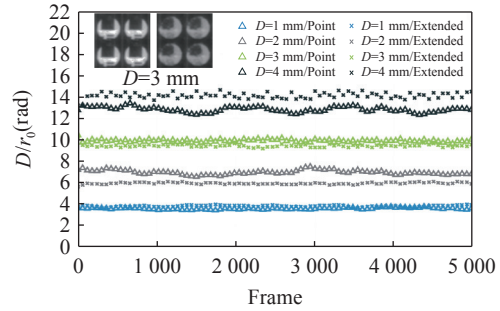


图 7 不同尺寸下点源场景和扩展场景测得 D/r_0 值
Fig. 7 Measured D/r_0 values for point source and extended scenes under different pitches

在有效通光孔径 $D = 2$ mm 的实验条件下,采用波前结构函数法对湍流相位屏的相干长度进行测量,并将结果与 DIMM 法及波前相位方差法进行对比。图 8(彩图见期刊电子版)展示了通过每 200 组系数方差计算的 r_0 。显然,在 5000 帧样本的测量中, DIMM 法、波前相位方差法与波前结构函数法所获得的 r_0 值在整个测量过程中均显示出良好的稳定性。具体而言,应用质心法的 DIMM 法(黄色曲线)测得的 12 组 r_0 均值为 0.314 6 mm,波前相位方差法(蓝色曲线)测得的均值为 0.312 5 mm,两者较实际值误差均小于 5%,而扩展目标场景下应用 I-NCC 算法的波前结构函数法(黑色曲线)测得均值为 0.312 2 mm,误差约为 4%。这进一步证明了应用 I-NCC 算法的波前结构函数法测量相干长度的可行性与可靠精度。

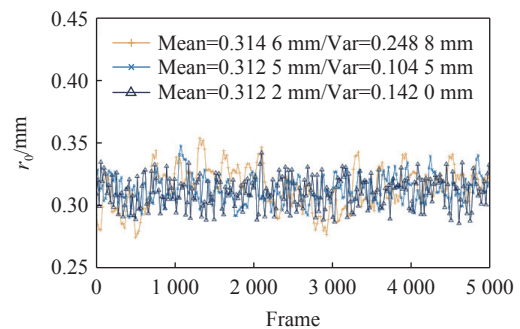


图 8 三种方法测得相干长度结果对比
Fig. 8 Comparison of coherence length results measured by three methods

图中各曲线均表现出较小的波动幅度,表明在整个测量过程中,应用质心法的 DIMM 法和波前相位方差法以及应用 I-NCC 的波前结构函数法测量结果较为平稳且高度一致。扩展场景下本文方法的方差为 0.1420,进一步证明了该方法在湍流影响下的优秀性能。

5 结 论

本文针对基于扩展目标场景的大气相干长度测量方法进行研究,通过将 SHWFS 的扩展目标偏移量算法和波前结构函数法相结合来测量大气相干长度。与传统的激光信标方法相比,本文方法减少了在扩展场景中湍流强度估计对激光信标设备的依赖,从而显著降低了设备成本和测量系统的复杂度。通过对现阶段主流测量方法原理的

阐述,展示了波前结构函数法如何通过复原入射波前并求取两不同位置相位差来测得 r_0 。在此基础上,采用 I-NCC 算法实现了以扩展目标本身作为信息源测量大气相干长度的方案。仿真分析与实验结果表明,该方法能够有效测量大气相干长度,测得 r_0 值与理论值误差约为 4%,证明了算法的可靠性和准确性。未来研究应更深入剖析影响测量精度的因素,如光源的稳定性与互相关模板选取等,以期进一步提升测量可靠性,这对于有效评估 FSOC 网络链路可靠性具有一定意义。

参考文献:

- [1] GUIOMAR F P, FERNANDES M A, NASCIMENTO J L, *et al.*. Coherent free-space optical communications: opportunities and challenges[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(10): 3173-3186.
- [2] 刘恒瑞. 自由空间光通信系统中的信道预测技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2024.
LIU H R. *Channel prediction techniques in free-space optical communication systems*[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024. (in Chinese).
- [3] JAHID A, ALSHARIF M H, HALL T J. A contemporary survey on free space optical communication: Potentials, technical challenges, recent advances and research direction[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2022, 200: 103311.
- [4] 陈丹, 陈昊雅, 王明军, 等. 非理想信道下自由空间光通信自适应星座几何整形[J]. *光学学报*, 2025, 45(3): 0306004.
CHEN D, CHEN H Y, WANG M J, *et al.*. Adaptive constellation geometry shaping for free space optical communication in non-ideal channels[J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(3): 0306004. (in Chinese).
- [5] 朱嘉康, 安其昌, 杨飞. 大口径望远镜镜面视宁度检测方法综述[J]. *红外与激光工程*, 2023, 52(2): 20220488.
ZHU J K, AN Q CH, YANG F. Review on the measurement methods of mirror seeing of large-aperture telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(2): 20220488. (in Chinese).
- [6] FRIED D L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1965, 55(11): 1427-1435.
- [7] LI M, ZHANG P X, HAN J W. Methods of atmospheric coherence length measurement[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(6): 2980.
- [8] GRIFFITHS R, BARDOU L, BUTTERLEY T, *et al.*. A comparison of next-generation turbulence profiling instruments at Paranal[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, 529(1): 320-330.
- [9] SABIL M, HABIB A, BENKHALDOUN Z. Interferential seeing monitor, a seeing monitor for atmospheric turbulence studies: calibration with the differential image motion monitor[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 500(2): 1884-1888.
- [10] TILLAYEV Y, AZIMOV A, EHGAMBERDIEV S, *et al.*. Astronomical seeing and meteorological parameters at maidanak observatory[J]. *Atmosphere*, 2023, 14(2): 199.
- [11] SUBRAMANIAN S K, RENGASWAMY S, DESHMUKH P G, *et al.*. Daytime turbulence strength profile measurement at Kodaikanal observatory[J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2024, 10(3): 039004.
- [12] JACKSON O, VAN KOOTEN M A M, PERERA S, *et al.*. SHIMM as an atmospheric profiler on the nickel telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12680: 126801V.
- [13] PERERA S, WILSON R W, BUTTERLEY T, *et al.*. SHIMM: a versatile seeing monitor for astronomy[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2023, 520(4): 5475-5486.
- [14] ANDRADE P P, GARCIA P J V, CORREIA C M, *et al.*. Estimation of atmospheric turbulence parameters from Shack-Hartmann wavefront sensor measurements[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019,

- 483(1): 1192-1201.
- [15] SAUVAGE C, ROBERT C, MUGNIER L M, *et al.*. Near ground horizontal high resolution C_n^2 profiling from shack-Hartmann slope and scintillation data[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(34): 10499-10519.
- [16] HE Y, BAO M D, CHEN Y W, *et al.*. Accuracy characterization of Shack-Hartmann sensor with residual error removal in spherical wavefront calibration[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2023, 4(4): 36.
- [17] ARISTIDI E, ZIAD A, CHABÉ J, *et al.*. A generalized differential image motion monitor[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 486(1): 915-925.
- [18] DIBAE B, SHOMALI R, KHALILZADEH J, *et al.*. 4-aperture differential image motion monitor as a new approach for estimating atmospheric turbulence parameters[J]. *Journal of Modern Optics*, 2019, 66(7): 753-763.
- [19] 王子跃, 任德清. 差分像运动视宁度优化监测法[J]. *天文研究与技术*, 2019, 16(1): 114-122.
WANG Z Y, REN D Q. Improved to differential image motion monitor[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2019, 16(1): 114-122. (in Chinese).
- [20] KORNILOV V, SAFONOV B. Wave propagation effect on differential image motion monitor measurements[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 488(1): 1273-1281.
- [21] 毛红敏, 丁致雅, 杨燕燕, 等. 大气湍流对高分辨率遥感卫星的成像影响研究[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(1): 167-177.
MAO H M, DING Z Y, YANG Y Y, *et al.*. Effect of atmospheric turbulence on imaging quality of high-resolution remote sensing satellites[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 167-177. (in Chinese).
- [22] KORNILOV V, SAFONOV B. Differential image motion in the short-exposure regime[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 418(3): 1878-1888.
- [23] MACATANGAY R, RATTANASOON S, BUTTERLEY T, *et al.*. Seeing and turbulence profile simulations over complex terrain at the Thai national observatory using a chemistry-coupled regional forecasting model[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, 530(2): 1414-1423.
- [24] 赵文栋, 杨飞, 安其昌. 面向大口径地基望远镜视宁度检测方法综述[J]. *激光与红外*, 2023, 53(9): 1299-1308.
ZHAO W D, YANG F, AN Q CH. Review on the inspection methods of visibility for large aperture ground based telescope[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(9): 1299-1308. (in Chinese).
- [25] ZURASKI S M, BEECHER E, MCCRAE J E, *et al.*. Turbulence profiling using pupil plane wavefront data derived Fried parameter values for a dynamically ranged rayleigh beacon[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(8): 081807.
- [26] 仇陈祥. 应用于船载平台的湍流廓线激光雷达研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
QIU CH X. *Development of Lidar System for Monitoring Turbulent Profiles on Shipborne Platform*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023. (in Chinese).
- [27] 陈亮, 周孟哲, 陈禾. 一种结合边缘区域和互相关的图像配准方法[J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(3): 320-325.
CHEN L, ZHOU M ZH, CHEN H. A method for image registration combined by edge region and cross correlation[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(3): 320-325. (in Chinese).
- [28] CANNY J. A computational approach to edge detection[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, PAMI-8(6): 679-698.
- [29] CHARNOTSKII M. Four methods for generation of turbulent phase screens: comparison[J]. *Physics Engineering*, 2019.
- [30] 陈浩, 宣丽, 胡立发, 等. 大气相干长度的稳定测量[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 911-918.
CHEN H, XUAN L, HU L F, *et al.*. Steady measurement of atmospheric turbulence coherence length[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 911-918. (in Chinese).

作者简介:



张峻瑞(1998—), 男, 山东青岛人, 博士研究生, 2020年于山东大学获得工学学士学位, 现就读于中国科学院大学, 主要从事自适应光学方向的研究。E-mail: junrui_zhang@126.com



杨乐强(1994—), 男, 吉林白山人, 博士, 副研究员, 2015年于中国科学技术大学获得学士学位, 2020年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事自适应光学波前处理技术方面的研究。E-mail: yanglq23@126.com