

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.250246.

专题:面向6G的无线光通信

李晶,黄良博,邹炎升,等.大气环境中激光光束波前畸变测量与补偿研究[J].光通信研究,2026(2):250246.

Li J, Huang L B, Zhou Y S, et al. Measurement and Compensation of Laser Beam Wavefront Distortion in Atmospheric Environment[J]. Study on Optical Communications, 2026(2):250246.

大气环境中激光光束波前畸变测量与补偿研究

李晶¹,黄良博²,邹炎升²,戴洁雯²,戴潇潇²,刘陈²

(1. 中国电子科技集团公司第五十四研究所,石家庄 050081; 2. 华中科技大学 光学与电子信息学院,武汉 430074)

摘要:【目的】自由空间光通信(FSOC)具有高保密性和可靠性,然而,大气湍流会导致光束漂移、光强起伏和相位抖动,严重降低了通信质量。目前可以采用由图像传感元件采集的光强分布重构波前相位技术实现波前的实时校正。文章的目的是完成FSOC系统的波前畸变测量与补偿。【方法】文章采用理论与实验相结合的方法,基于模式法开展关键技术研究,推导了Zernike多项式表示的波前像差恢复算法,建立了无波前传感测量的数学理论模型。【结果】实验结果表明,在弱湍流条件下,补偿后接收端功率从-16.40提升至-9.11 dBm,误码率从0.012 25降至 10^{-7} ,信噪比由11.43提高至21.38 dB。【结论】研究证明,模式法能有效恢复波前相位和提升系统抗湍流能力,为FSOC系统提供了高精度的波前校正方案。该研究为无波前传感自适应光学(AO)系统提供了理论依据与实验验证,对提升空间激光通信质量具有重要意义。

关键词:自由空间光通信;自适应光学;大气湍流;模式法;波前测量

中图分类号:TN929

文献标志码:A

Measurement and Compensation of Laser Beam Wavefront Distortion in Atmospheric Environment

LI Jing¹, HUANG Liangbo², ZOU Yansheng², DAI Jiewen², DAI Xiaoxiao², LIU Chen²

(1. China Electronics Technology Group Corporation 54th Research Institute, Shijiazhuang 050081, China; 2. School of Optoelectronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: 【Objective】Free Space Optical Communication (FSOC) demonstrates high confidentiality and reliability. However, atmospheric turbulence can cause beam drift, light intensity fluctuations, and phase jitter, which seriously degrades the communication performance. At present, the wavefront phase reconstruction technology of the light intensity distribution collected by an imaging device can be used to realize the real-time correction of the wavefront. The purpose of this paper is to complete the wavefront distortion measurement and compensation of the FSOC system. 【Methods】In this paper, we adopt a combination of theory and experiment, and conduct key technology research based on mode method. The wavefront aberration restoration algorithm represented by Zernike polynomial is derived, and the mathematical theoretical model for wavefront-sensorless measurement is established. 【Results】The experimental results show that, under the condition of weak turbulence, the receiving power increases from -16.40 to -9.11 dBm after compensation. The bit error rate decreases from 0.012 25 to 10^{-7} , and the signal-to-noise ratio increases from 11.43 to 21.38 dB. 【Conclusion】The result proves that the mode method can effectively reconstruct the wavefront phase and improve the anti-turbulence ability of the system. It provides a high-precision wavefront correction scheme for the FSOC system. This study provides theoretical basis and experimental verification for wavefront sensing Adaptive Optics (AO) system, which is of great significance to improve the performance of space laser communication.

Key words: FSOC; AO; atmospheric turbulence; mode method; wavefront measurement

0 引言

随着星地通信距离的增加及信息化社会对通信容量需求的提升,自由空间光通信(Free Space Optical Communication, FSOC)因组网灵活、通信距离长和容量大等特点备受关注^[1-4]。FSOC以光波为载波,无须铺设光缆或申请频率许可,具有高保密性和可靠性^[5]。然而,大气湍流会导致光束漂移、光强起伏和相位抖动,严重降低了通信质量^[6-9]。自适

应光学(Adaptive Optics, AO)系统^[10]通过可变形镜面校正波前畸变,但传统系统依赖波前传感器(如夏克-哈特曼传感器^[11])和复杂硬件,限制了其在强湍流和弱光强场景的应用。近年来,无波前传感(Wavefront Sensor Less, WFSless)AO系统逐渐成为研究热点,其利用优化算法如随机并行梯度下降(Stochastic Parallel Gradient Descent, SPGD)算法^[12]和模式法^[13-17],通过图像传感器件如电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD),采集的光强分

收稿日期:2025-07-06; 修回日期:2025-07-12; 纸质出版日期:2026-04-10

作者简介:李晶(1981-),女,山东聊城人。高级工程师,博士,主要研究方向为航天测控及激光通信技术研究。

通信作者:李晶,高级工程师。E-mail:723683120@qq.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

布重构波前相位,实现实时校正。在优化算法选择方面,基于模型的模式法因收敛速度快和校正效果好成为 WFSless AO 系统的常用选择,而 SPGD 算法易陷入局部最优,遗传算法收敛速度慢^[18-20]。波前校正器方面,传统的变形镜制造成本高且驱动器数量有限,微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)变形镜则只能达到微米级别的形变,动态范围较小^[21-22],相较之下,硅基液晶(Liquid Crystal On Silicon, LCoS)拥有更高空间分辨率、更低驱动电压与更低成本,成为3者中的首选^[23-25]。

为突破传统 AO 技术瓶颈,本文建立了成像光斑强度分布与波前畸变相位的数学模型,通过构建 Zernike 模式的波前重建算法,直接利用接收光束的聚焦光斑图像实现波前畸变反演,同时采用空间光调制器完成波前畸变补偿,设计并研制了波前畸变测量与补偿一体化模块,大幅提升了湍流环境下接收信号光的光纤耦合效率,为提升星地激光通信的可靠性提供了理论与技术支撑。

1 基于模式法的波前测量算法

焦平面上图像二阶矩的归一化变化与波前像差的均方梯度(Mean Squared Gradient, MSG)成正比,其表达式为

$$\frac{\iint_{R^2} (I(u, v) - I_{00}(u, v))(u^2 + v^2) dudv}{\iint_{R^2} I(u, v) dudv} = \frac{1}{4\pi^2} \frac{\iint_{R^2} P^2(x, y) |\nabla \varphi(x, y)|^2 dx dy}{\iint_{R^2} P^2(x, y) dx dy}, \quad (1)$$

式中: $MSG = \frac{\iint_{R^2} P^2(x, y) |\nabla \varphi(x, y)|^2 dx dy}{\iint_{R^2} P^2(x, y) dx dy}$; R 为焦

平面上光强的积分区域; ∇ 为拉普拉斯算符; $I(u, v)$ 为焦平面图像的光强分布; $I_{00}(u, v)$ 为无像差图像的光强分布; $P(x, y)$ 为光瞳函数; $\varphi(x, y)$ 为入射光瞳面的相位分布; (x, y) 为光瞳入射面坐标; (u, v) 为成像面角坐标。将归一化二阶矩定义为扩展源掩模探测器信号(Masked Detector Signal for Extended Sources, MDSE),其表达式可简化为

$$MDSE - MDSE_{00} = c_0 MSG, \quad (2)$$

式中: $MDSE_{00}$ 对应于无像差图像; $c_0 = 1/(4\pi^2)$;

$$MDSE = \frac{\iint_{R^2} I(u, v)(u^2 + v^2) dudv}{\iint_{R^2} I(u, v) dudv}, \quad MDSE_{00} =$$

$$\frac{\iint_{R^2} I_{00}(u, v)(u^2 + v^2) dudv}{\iint_{R^2} I(u, v) dudv}。波前相位 $\varphi(x, y)$ 可分$$

解为 N 项 Zernike 多项式的组合,其表达式为

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=1}^N t_n Z_n(x, y) = T_N Z_N, \quad (3)$$

式中: Z_n 和 t_n 分别为第 n 阶 Zernike 模式的表达式和系数, Z_N 和 T_N 为分别由 Z_n 和 t_n 组成的矩阵。当在波前像差上施加幅度为 α 的 M 种不同 Zernike 模式的扰动时,可得:

$$[MSG_1 - MSG_0, \dots, MSG_M - MSG_0]^T = 2\alpha K_{MN} T_N + \alpha^2 K_M, \quad (4)$$

$K_{MN}(m, n) =$

$$\frac{\iint_{R^2} P^2(x, y) \left[\frac{\partial Z_m}{\partial x} \frac{\partial Z_n}{\partial x} + \frac{\partial Z_m}{\partial y} \frac{\partial Z_n}{\partial y} \right] dx dy}{\iint_{R^2} P^2(x, y) dx dy}, \quad (5)$$

式中: MSG_m 为施加第 m 项 Zernike 扰动后的 MSG; MSG_0 为无扰动状态下的 MSG; K_M 为由 K_{MN} 矩阵左上角 $M \times M$ 个对角元素构成的向量。且有:

$$S = [MDSE_1 - MDSE_0, \dots, MDSE_M - MDSE_0]^T, \quad (6)$$

式中: $MDSE_m$ 为引入第 m 项 Zernike 扰动后的 MDSE, $m \in [0, M]$; $MDSE_0$ 为无扰动状态下的 MDSE。将式(2)与式(4)代入式(6)进行联立,最终可得波前的 Zernike 系数矩阵 T_N 为

$$T_N = K_{MN}^{-1} \left(\frac{S}{2\alpha c_0} - \frac{\alpha K_M}{2} \right)。 \quad (7)$$

2 系统搭建与实验验证

2.1 湍流补偿实验系统

首先搭建湍流补偿实验光路,实验系统如图 1 所示,分为 4 个部分:发射端、湍流模拟装置、波前相位测量与补偿一体化单元和接收端,通过湍流相位片模拟大气湍流造成的波前相位畸变,利用 LCoS 和 CCD 对波前畸变相位进行测量,最后在 LCoS 上加载畸变补偿相位, LCoS 在试验中承担了测量和补偿两种任务,实现了测补一体化。在发射端, 1550 nm 的激光光源经扩束后经过湍流相位片,波前相位发生畸变,然后到达接收端,接收端的偏转镜用于调节光束入射 LCoS 的角度,使光束能够垂直入射 LCoS,由于 LCoS 是偏振相关器件,因此需要利用偏振片调节光束的偏振态,分束器 1 为 1:1 的分束器,使得 LCoS 反射回来的光能够进入分束器 2,分束器 2 为 1:9 的分束器,90% 的光耦合进光纤,

10% 的光经聚焦透镜后入射 CCD。

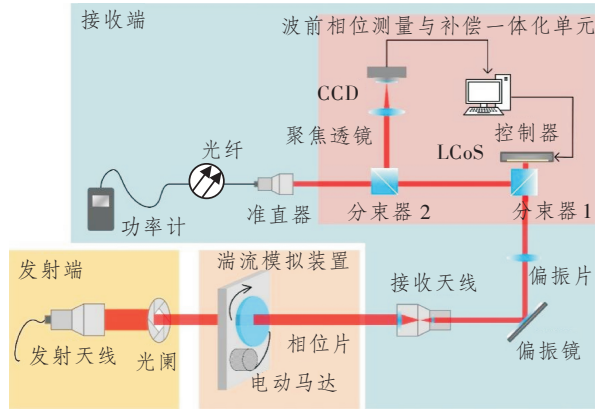


图 1 实验光路图

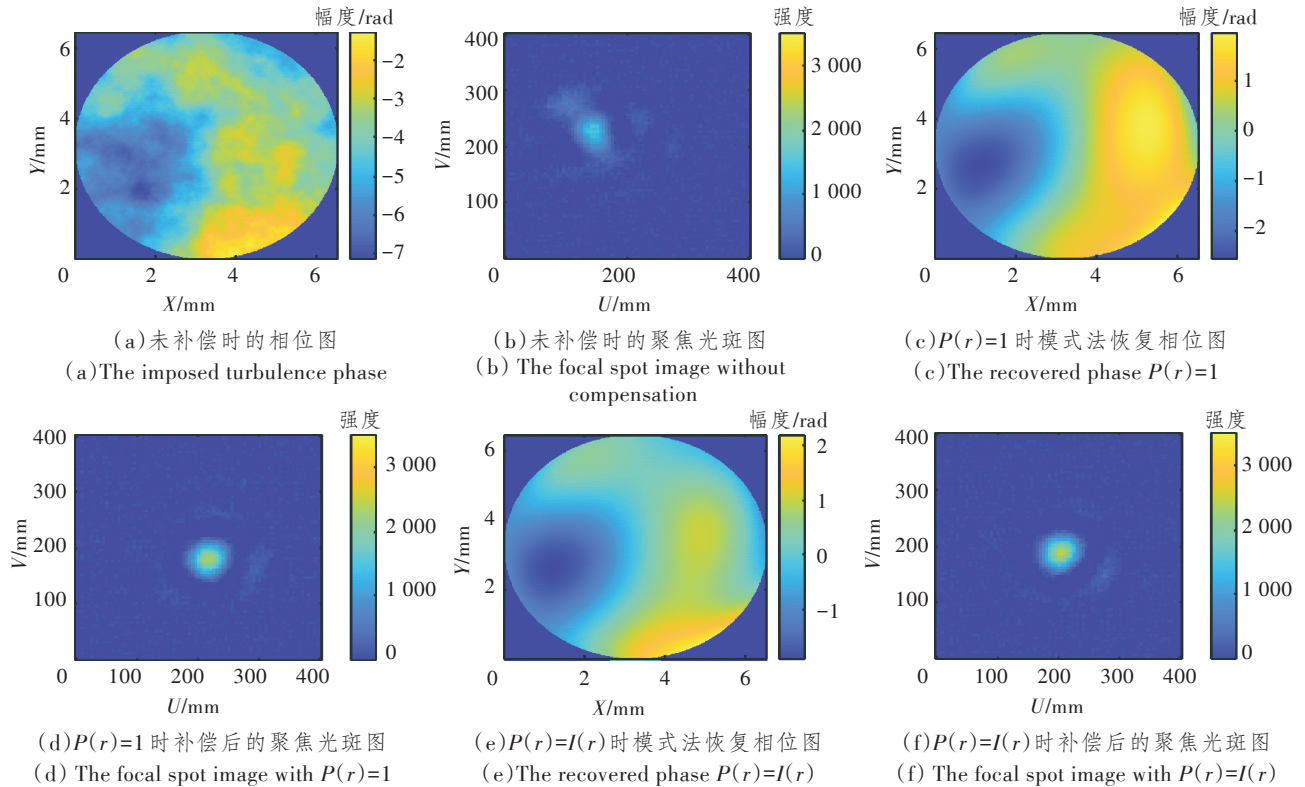
Figure 1 Experimental optical setup diagram

2.2 利用 LCoS 模拟湍流的波前畸变补偿实验结果

图 2(a)、图 2(c)和图 2(e)分别为未补偿及

光瞳函数 $P(r)=1$ 和 $I(r)$ 时利用模式法在 LCoS 上加载恢复的湍流相位图,图 2(b)、图 2(d)和图 2(f)分别为上述 3 种情况下的 CCD 光斑图,其中, $I(r)$ 为高斯光的光强分布。

由图可知,恢复出的相位图和湍流相位图类似,且补偿后光斑能量更加集中,光强峰值远远大于未补偿情况下的光强峰值,从光斑位置来看,补偿前光斑的中心位置偏离理想光斑中心位置较远,补偿后光斑中心基本位于理想值附近,说明模式法对光斑的位置也有较好的补偿效果。另外, $P(r)=1$ 和 $I(r)$ 两种情况下恢复出的相位图有较大的差别, $P(r)=I(r)$ 时光斑峰值更强,说明在光源为高斯光的情况下, $P(r)$ 的值也应为高斯分布,若将其视为常数会对恢复效果产生影响。



注: X 和 Y 为光学系统入瞳面,即 LCoS 平面的坐标轴; U 和 V 为焦平面,即 CCD 平面坐标轴。

图 2 3 种情况下的相位图和对应该光斑图

Figure 2 Phase maps and corresponding spot diagrams under three conditions

表 1 所示为 5 种情况下的相位标准差、相位峰谷值、环围能量比、斯特列尔比 (Strehl Ratio, SR) 和接收功率,其中,相位标准差定义为整个相位图的标准差;相位峰谷值为整个相位图中最大相位与最小相位的差值;环围能量比的积分半径为光强下降到 $1/e^2$ 时的光斑半径;SR 定义为实际光学系统(有像

差)所成的像与理想光学系统(无像差)理想高斯像点之间的光强度之比。由表可知, $P(r)=I(r)$ 时补偿效果最好,接收功率从 -16.40 提升到了 -9.11 dBm,共补偿了 7.29 dB,距离理想情况下的 -7.91 dBm 还剩 1.2 dB 未补偿,另外 4 个评价指标也有不同程度的提升,相位标准差减小了 58% ,峰谷值降低了

55%, 环围能量比降低了 48%, SR 从 0.450 3 提升到了 0.712 1。

表 1 5 种情况下的评价指标

Table 1 Evaluation metrics under five different conditions

评价标准	无湍流		补偿后	
	未补偿	补偿后	$P(r)=1$	$P(r)=I(r)$
相位标准差/rad	0	1.212 5	0.674 6	0.500 6
相位峰谷值/rad	0	5.876 4	3.808 4	2.660 8
环围能量比	1.000 0	2.232 4	1.307 4	1.163 1
SR	1.000 0	0.450 3	0.673 1	0.712 1
接收功率/dBm	-7.91	-16.40	-10.06	-9.11

不同算法下的 SR 补偿情况如表 2 所示, Cao 等人利用传统的 SPGD 算法将 SR 由 0.006 1 提升到了 0.305 9^[18]; Li 等人利用改进的自适应增益随机并行梯度下降(Adaptive Gain Stochastic Parallel Gradient Descent, AGSPGD)算法在弱湍流的情况下, 将 SR 由 0.450 0 提升到了 0.640 0^[19], 效果劣于模式法。以上结果说明, 模式法可以补偿大部分波前像差, 最终提高光纤接收端的功率。

表 2 不同算法下的 SR 补偿情况

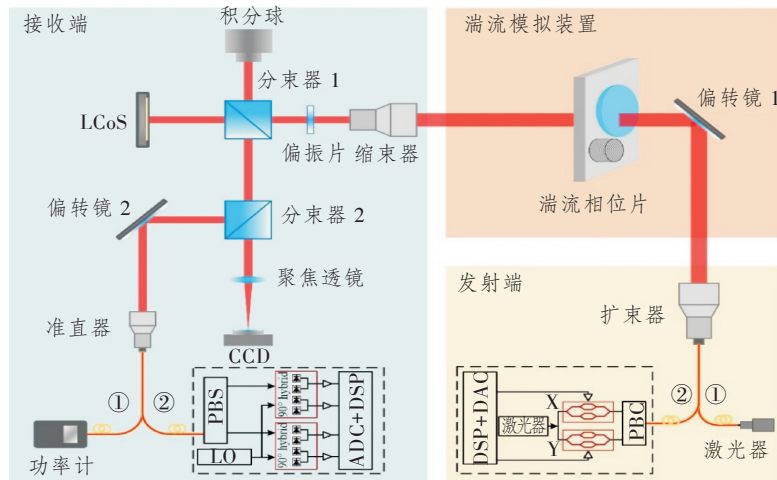
Table 2 SR compensation under different algorithms

评价标准	SPGD 算法		AGSPGD 算法		模式法	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
SR	0.006 1	0.305 9	0.450 0	0.640 0	0.450 3	0.712 1

2.3 相干光通信实验结果及结果分析

2.3.1 相干通信实验系统搭建

首先, 搭建如图 3 所示的相干通信实验光路图, 其中大部分光路与图 1 所述的湍流补偿光路一致, 区别在于图 3 省略了一些光路中不重要的元件, 并在发射端和接收端加入了相干调制和外差检测装置。在实验过程中, 改变接收端功率, 测量不同接收端功率下的误码率(Bit Error Rate, BER)和信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR), 探究在接收功率较低的情况下, 利用模式法补偿前后信号的 BER 和 SNR 的变化情况, 验证模式法波前畸变测量补偿对相干通信的改善能力。



注: DSP 为数字信号处理器; ADC 为模/数转换器; DAC 为数/模转换器; PBS 为偏振分束器; PBC 为偏振合束器; LO 为本地振荡器。

图 3 相干通信实验系统图

Figure 3 Diagram of the coherent communication experimental system

2.3.2 相干通信实验结果分析

相干通信实验结果如图 4 和图 5 所示, 图 4 为补偿前后的功率曲线图, 由图可知, 在不同接收端功率下, 补偿后功率平均提升了 11~12 dB。图 5(a) 为补偿前后 BER 随接收端功率的变化关系, 由图可知, 利用模式法补偿后的 BER 始终小于未补偿时的 BER, 接收功率在 -58~-44 dBm 范围内时, 补偿后的 BER 为 10^{-7} , 接近 0, 在 -66~-58 dBm 范围内

时, 补偿前后 BER 的差距有所减小, 在接收功率为 -66 dBm 时差距最小, 此时补偿后 BER 与补偿前相比减小了 88%。图 5(b) 为 SNR 随接收端功率的变化关系, 由图可知, 补偿后的 SNR 始终大于未补偿时的 SNR, 二者差距在 6~18 dB 范围内。由 BER 和 SNR 的结果可知, 模式法可以有效补偿湍流导致的波前相位畸变, 从而降低相干光通信的 BER 并且提升通信系统的 SNR。

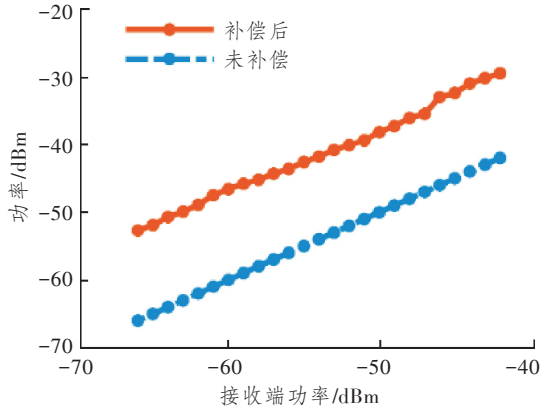
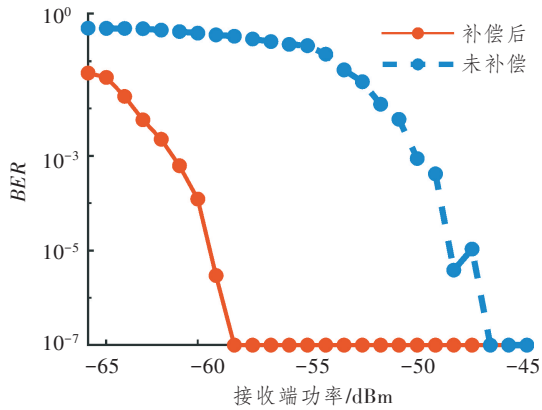
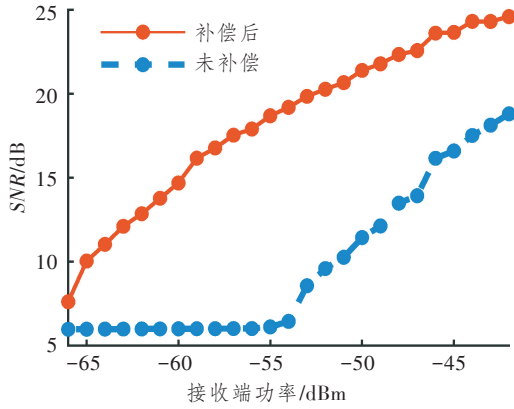


图 4 相干光通信实验补偿前后的功率曲线
Figure 4 Power curves before and after compensation in coherent optical communication experiments



(a) BER



(b) SNR

图 5 相干光通信实验结果图

Figure 5 Experimental results of coherent optical communication

3 结束语

FSOC 因高带宽和抗干扰等优势成为研究热点,但其信号受大气湍流引发的波前相位畸变影响导致通信质量下降。本文针对 WFSless AO 系统中波前畸变测量与补偿问题,基于模式法开展了理论与实验研究。首先建立模式法 WFSless 测量模

型,推导 Zernike 多项式表征的波前畸变系数矩阵。试验构建湍流补偿系统,利用 LCoS 模拟湍流相位畸变,弱湍流 ($D/r_0=2$, 式中: D 为光学系统的口径; r_0 为大气相干长度。)下模式法使相位标准差从 1.212 5 降至 0.500 6 rad,峰谷值从 5.876 4 降至 2.660 8 rad,环围能量比从 2.232 4 降至 1.163 1,接收功率由 -16.40 提升至 -9.11 dBm。进一步开展相干光通信实验,在接收功率为 -50 dBm 时, BER 从 0.012 25 降至 10^{-7} , SNR 由 11.43 提升至 21.38 dB。研究证实,模式法能有效恢复波前相位、提升系统抗湍流能力,为 FSOC 系统提供了高精度的波前校正方案。然而由于 LCoS 只能调制 1 个偏振方向的光,与其相垂直的另一偏振态的光无法被调制与补偿,从而导致功率损失,因此未来的研究方向将聚焦于偏振分集波前畸变测量与补偿一体化系统研究。

参考文献:

- [1] Trichili A, Cox M A, Ooi B S, et al. Roadmap to Free Space Optics [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2020, 37(11): A184.
- [2] 李晓鹏, 魏梦霞, 祝战科, 等. 自由空间光通信中被动调制研究进展[J]. 光通信研究, 2024(3): 230121.
Li X P, Wei M X, Zhu Z K, et al. Research Progress of Passive Modulation in Free Space Optical Communication[J]. Study on Optical Communications, 2024(3): 230121.
- [3] 王熹, 邓磊, 陶坤宇, 等. 空间激光通信与测距一体化研究[J]. 光通信研究, 2024(3): 230016.
Wang X, Deng L, Tao K Y, et al. Research on the Integration of Space Laser Communication and Ranging[J]. Study on Optical Communications, 2024(3): 230016.
- [4] 柳海楠, 邵宇丰, 王安蓉, 等. FSO通信系统中应用机器学习算法的研究进展[J]. 光通信研究, 2025(2): 240040.
Liu H N, Shao Y F, Wang A R, et al. Research Progress of Machine Learning Algorithms Applied in FSO Communication Systems[J]. Study on Optical Communications, 2025(2): 240040.
- [5] Toyoshima M. Recent Trends in Space Laser Communications for Small Satellites and Constellations [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(3): 693–699.
- [6] 李林. 大气湍流对高阶自由空间相干光通信影响的补偿研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.

- Li L. Research on Compensation of the Influence of Atmospheric Turbulence for High - Order Free - Space Coherent Optical Communication [D]. Changchun, China: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [7] Wang F, Du W, Yuan Q, et al. A Survey of Structure of Atmospheric Turbulence in Atmosphere and Related Turbulent Effects [J]. *Atmosphere*, 2021, 12 (12) : 1608.
- [8] 陈晓, 胡晓英. 无线光中继通信在弱湍流时的性能估计方法[J]. *光通信研究*, 2021(1): 58–62.
Chen X, Hu X Y. Approximations to the Performance of Wireless Optical Relaying Communications over Weak Turbulence Channels[J]. *Study on Optical Communications*, 2021(1): 58–62.
- [9] 戴炜杰, 苏晓凤, 刘晓谦, 等. OAM模式增广的自由空间光通信[J]. *光通信研究*, 2025(4): 250021.
Dai W J, Su X F, Liu X Q, et al. Free-Space Optical Communication based on Augmentation of OAM Modes[J]. *Study on Optical Communications*, 2025(4): 250021.
- [10] Babcock H W. The Possibility of Compensating Astronomical Seeing [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1953, 65: 229.
- [11] Platt B C, Shack R. History and Principles of Shack - Hartmann Wavefront Sensing[J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2001, 17(5) : S573–S577.
- [12] Zhan H, Wang L, Wang W, et al. Experimental Analysis of Adaptive Optics Correction Methods on the Beam Carrying Orbital Angular Momentum Mode through Oceanic Turbulence [J]. *Optik*, 2021, 240: 166990.
- [13] Booth M J. A Model-based Approach to Wave Front Sensorless Adaptive Optics[J]. *MEMS Adaptive Optics*, 2007, 6467: 64670J.
- [14] Booth M J. Wavefront Sensorless Adaptive Optics for Large Aberrations[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(1) : 5–7.
- [15] Huang L, Rao C. Wavefront Sensorless Adaptive Optics: a General Model-based Approach[J]. *Optics Express*, 2011, 19(1): 371–379.
- [16] Yang H, Soloviev O, Verhaegen M. Model - based Wavefront Sensorless Adaptive Optics System for Large Aberrations and Extended Objects [J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24587–24601.
- [17] Wen L, Ping Y, Wang S, et al. A High Speed Model-based Approach for Wavefront Sensorless Adaptive Optics Systems [J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 99: 124–132.
- [18] Cao J, Zhao X, Li Z, et al. Stochastic Parallel Gradient Descent Laser Beam Control Algorithm for Atmospheric Compensation in Free Space Optical Communication[J]. *Optik*, 2014, 125(20): 6142–6147.
- [19] Li J, Wen L, Liu H, et al. A Novel SPGD Algorithm for Wavefront Sensorless Adaptive Optics System [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, 15(4): 7801109.
- [20] Peng J, Qi B, Li H, et al. AS - SPGD Algorithm to Improve Convergence Performance for Fiber Coupling in Free Space Optical Communication[J]. *Optics Communications*, 2022, 519: 128397.
- [21] 吴伟彬, 戴一帆, 关朝亮, 等. 横向压电效应变形镜优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(8): 0818003.
Wu W B, Dai Y F, Guan C L, et al. Optimization Design for Transversal Piezoelectric Effect Deformable Mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0818003.
- [22] Madec P Y. Overview of Deformable Mirror Technologies for Adaptive Optics and Astronomy [J]. *Adaptive Optics Systems III*, 2012: 924892.
- [23] Soomro S R, Sager S, Paniagua - Diaz A M, et al. Head - Mounted Adaptive Optics Visual Simulator [J]. *Biomedical Optics Express*, 2024, 15(2): 608–623.
- [24] Hasegawa S, Hayasaki Y. Femtosecond Laser Processing with Adaptive Optics based on Convolutional Neural Network [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141: 106563.
- [25] Soomro S R, Artal P. A Handheld Adaptive Optics Device for Personalized Visual Evaluation [C]//*Ophthalmic Technologies XXXIII*. San Francisco, USA: SPIE, 2023: 51.