

引用本文:方志平,何易非,杨冬,等.基于CNN的自由空间光通信模式分集发射技术[J].光通信技术,2026,50(1):54-58.

基于CNN的自由空间光通信模式分集发射技术

方志平¹,何易非¹,杨冬¹,谢远举¹,周光波²,青廉¹

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060;2. 中国电子科技集团公司第四十四研究所,重庆 400060)

摘要:为提升自由空间光通信(FSO)的抗湍流干扰能力,提出一种基于卷积神经网络(CNN)的FSO模式分集发射(MDT-FSO)技术。该技术利用CNN实时分析湍流导致的轨道角动量模式功率分布,并动态优化发射信号。系统比较了选择性组合(SC)、等增益组合(EGC)和最大比值组合(MRC)3种方案。数值仿真结果表明:在强湍流条件下,SC-MDT方案使FSO系统的平均接收功率提高约4 dB,而MRC-MDT方案使FSO系统平均接收功率提升约5 dB。

关键词:模式分集;轨道角动量;卷积神经网络;大气湍流;自由空间光通信

中图分类号:TN92 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)01-0054-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.01.009

Mode diversity transmission technology for free space optical communication based on CNN

FANG Zhiping¹, HE Yifei¹, YANG Dong¹, XIE Yuanju¹, ZHOU Guangbo², QING Lian¹

(1. The 26th Research Institute of CETC, Chongqing 400060, China; 2. The 44th Research Institute of CETC, Chongqing 400060, China)

Abstract: To enhance the anti-turbulence capability of free-space optical communication(FSO), a mode diversity transmission technology for FSO (MDT-FSO) based on a convolutional neural network(CNN) is proposed. This technology utilizes the CNN to analyze the power distribution of orbital angular momentum modes caused by turbulence in real-time and dynamically optimizes the transmitted signals. The system performance is compared among three schemes: selective combining(SC), equal gain combining(EGC), and maximal ratio combining(MRC). Numerical simulation results show that under strong turbulence conditions, the SC-MDT scheme increases the average received power of the FSO system by 4 dB, while the MRC-MDT scheme improves it by 5 dB.

Key words: mode diversity, orbital angular momentum, convolutional neural network, atmospheric turbulence, free-space optical communication

0 引言

近年来,自由空间光通信(FSO)系统凭借其高数据传输容量和光束高方向性等优势而备受关注^[1-3]。在FSO中,基于轨道角动量(OAM)模式的模分复用技术可以同时传输多个独立的光束,并利用正交的空间模式来区分各个信道,显著提升了系统容量^[4-5]。在基于OAM模式的FSO系统中,光束螺旋相位波前的正交特性是模分复用的物理基础。然而,大气湍流效应引

发的随机相位扰动会导致不同OAM模式间的正交性退化,从而诱发跨模态的功率耦合效应。这种非线性干扰现象将直接导致多路信道间的模式串扰,从而降低FSO系统的信息保真度和传输可靠性。

为了克服大气湍流对FSO系统的影响,大孔径接收、自适应光学(AO)等技术被广泛提出。大孔径接收技术通过增大接收孔径实现对大气湍流扰动的空间平均化处理,能有效抑制辐照度闪烁^[6]。但该技术未解决相位波前畸变,使得FSO系统性能受限。此外,AO技术作为湍流补偿的核心解决方案,其通过校正大气湍流引起的相位波前畸变,有效提升了传输光束与单模光纤(SMF)之间的耦合效率^[7]。然而,在GHz量级的高速FSO系统中,AO技术对波前校正精度和闭环响应速度要求更为严苛,尤其在强湍流条件下,波前重构误差呈非线性增长,校正残余方差超出系统容

收稿日期:2025-03-18。

作者简介:方志平(1991—),男,重庆人,硕士研究生,高级工程师,现就职于中国电子科技集团公司第二十六研究所,主要从事相控阵雷达天线、空间激光通信以及高速信号传输等领域的研究工作,参与多项国家级科研项目。



限,制约了通信性能的提升。近年来,模式分集技术(MD)已应用于高速FSO系统,主要分为模式分集发射(MDT)和模式分集接收(MDR)2种方案^[8-9]。基于湍流扰动下相位波前畸变可分解为基模与高阶模叠加的物理特性,MDT通过调制发射光束为共轭叠加模式而实现湍流预补偿,MDR则依赖多通道模式解复用和信号组合技术消除湍流引起的模式串扰。

然而,模式解复用装置需实现高精度模式分离,现有模式选择光子灯在湍流条件下存在模式相关损耗波动。同时,复杂的MD方案需实时监控各信道分支信噪比,系统实现复杂性较高。而卷积神经网络(CNN)在OAM模式识别^[10]中取得显著进展,为发展新型高效解调技术提供了新思路。因此,设计并研究基于CNN的MD-FSO系统具有重要的实际应用价值。在不同信号组合的MD技术中,选择性组合(SC)仅选择信噪比最高的分支作为输出信号,虽实现简单,但性能有限;等增益组合(EGC)对所有分支信号直接求和,复杂度较低;最大比值组合(MRC)对各分支信号赋权后求和,能实现最大输出信噪比,是目前MD-FSO通信系统的主流方案。针对不同信号组合方法的MDR方案已开展理论研究^[11],但目前尚缺乏其在MDT方案中的系统性比较。针对上述问题,本文提出一种基于CNN的MDT-FSO技术。

1 基于CNN的MDT-FSO模型

本文首先利用CNN测出FSO系统在不同湍流强度下的OAM模式功率分布。然后,基于测得的功率分布,研究在不同湍流强度下不同模式的MDR方案对接收功率的影响。

1.1 基于CNN的OAM-FSO信道模型

OAM光束通常可在输入高斯光的基础上加载角向相位 $\exp(i l \theta)$ 调制产生,其表达式可简单表示为

$$U(r, \theta) = A \exp \left[-\frac{r^2}{w_0^2} \right] \exp(i l \theta) \quad (1)$$

式中: A 表示常数振幅, r 为径向坐标, w_0 为光束在传输距离 $z=0$ 处的半径。

OAM光束为径向模式数 $p=0$ 时的拉盖尔-高斯(LG)光束,当拓扑荷数 $l \neq 0$ 时,光束的光强分布呈现圆环状,且圆环半径随着 l 的增大而增大。当 $l=0$ 时,OAM光束的光强分布则退化为高斯分布。

在大气湍流中,随机折射率分布会对激光光束的波前相位产生扰动,从而导致信号的衰减和串扰。本文采用Hill提出的经典湍流模型来描述湍流特性,该模型通过加载包含折射率波动光谱的随机相位屏来模拟大气湍流。为了实现光束在湍流中的传输数值模拟,可使用多层相位屏的方法对湍流效应进行逐步仿真,其空间功率谱函数的表达式^[12]为

$$\Phi_n(k) = \frac{0.033 C_n^2}{(k^2 + k_0^2)^{11/6}} \exp \left(-\frac{k^2}{k_m^2} \right) \quad (2)$$

式中: C_n^2 为结构常数,用于表征大气湍流的强度; k_0 为低频截止频率, k_m 为高频截止频率, k 为波数。

通常,湍流强度也通过光束横截面直径 D 与大气相干长度 r_0 的比值来量化。对于未指定湍流条件下的平面波, r_0 在一般情况下满足以下关系:

$$r_0 = \left[0.423 k^2 \int_0^L C_n^2(z) dz \right]^{-3/5} \quad (3)$$

式中: L 为传输路径长度, z 为传输距离。

结果表明,CNN在OAM模式功率测量中具有较高的准确性和有效性。

1.2 基于CNN的MDT-FSO系统

本文构建基于CNN的MDT-FSO系统结构如图1所示。系统采用波长为1 550 nm的连续高斯探针光束,通过发射孔径 R_T 发射进入大气信道。在光束传输过程中,大气湍流会引起光强和相位的随机波动,导

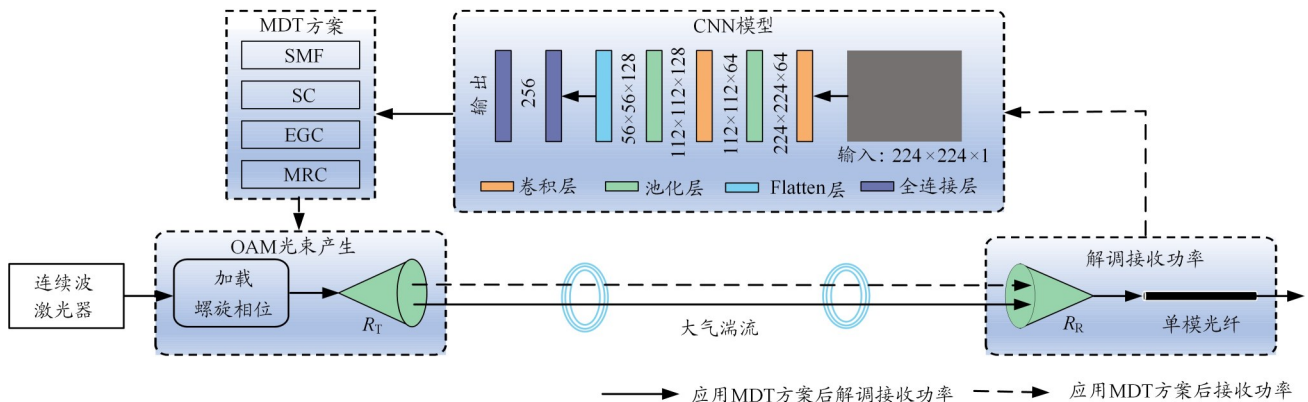


图1 基于CNN的MDT-FSO系统结构图

方志平,何易非,杨冬,等:基于CNN的自由空间光通信模式分集发射技术

致光功率的衰减以及OAM模式间的串扰。随后,高斯光束通过接收孔径 R_r 接收,接收到的OAM光束强度图像被作为输入数据,馈入后续的CNN模型进行处理。CNN模型在本系统中充当解复用器的角色,模型通过卷积层、池化层提取特征,并由全连接层输出各阶OAM模式的功率分布。基于此检测结果,系统可动态选择不同信号组合的MDT方案。根据CNN的输出,系统通过加载特定的调制相位,生成携带目标OAM模式及其相邻模式的涡旋光束进行传输。这种多模式分集共光束传输的设计,旨在提高系统的接收功率和抗湍流性能,同时避免了传统MRC因多链路处理导致的硬件冗余问题。为了保持总接收功率恒定,MDT系统中发射功率需根据OAM模式阶数进行放大。本文中的CNN模型包含7层结构:卷积层采用2的步长,卷积核大小为 5×5 和 7×7 ;最大池化层的步长为2,池化窗口大小为 2×2 ;Flatten层将多维特征图展平为一维特征向量;全连接层使用ReLU激活函数,并引入了Dropout与L2正则化以防止过拟合。输入图像尺寸通常调整为 $224 \times 224 \times 1$ 以平衡信息完整性与计算效率。此结构通过CNN强大的特征提取能力,直接高效地探测接收功率分布,替代了传统MDR方案中复杂的信道参数计算,从而简化了信号处理流程,并辅助MDT方案优化系统性能。

基于CNN的MDT-FSO系统的核心是利用CNN实时感知信道状态,可灵活实现不同的信号组合策略。本文重点研究并比较3种典型方案:SC-MDT、EGC-MDT与MRC-MDT。

2 仿真结果与分析

2.1 仿真设置与CNN模型性能验证

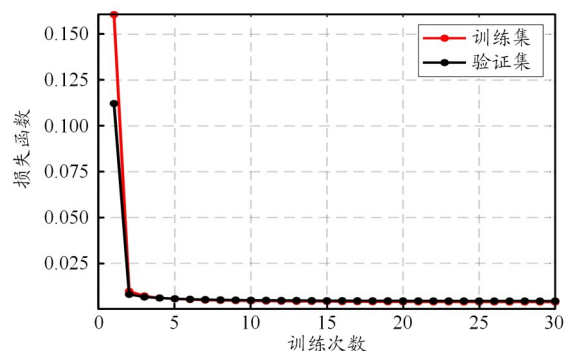
本文采用Matlab软件对OAM-FSO大气传输链路进行仿真,具体仿真配置如下:CPU为Inter Core i7-12700H, GPU为NVIDIA GeForce RTX 3050 Ti, CNN运行环境为Pytorch 1.8.0, 编程语言为Python 3.8.6。FSO系统的仿真参数设置如下:大气湍流内尺度 $l_0 = 0.01$ m, 湍流外尺度 $L_0 = 20$ m, 光束束腰半径 $w_0 = 3$ cm, 随机相位屏间距 $\Delta z = 50$ m, 传输距离 $z = 1$ km。CNN模型训练使用初始学习率为 $1e-2$, 动量为0.9的随机梯度下降(SGD)优化器, batch-size设定为64, epochs设定为30。为了评估CNN模型的预测性能, 本文采用均方误差(MSE)作为损失函数, 其定义为

$$L(y, y') = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (y[j] - y'[j])^2 \quad (4)$$

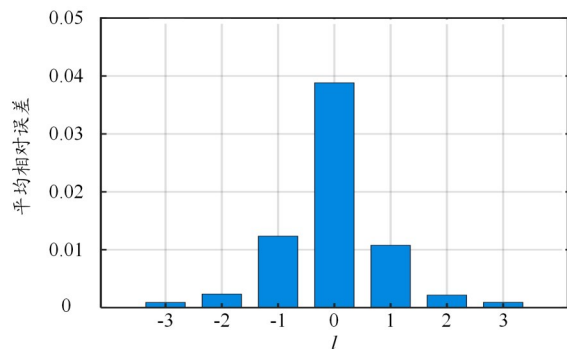
式中: y 为真实值, y' 为预测值, M 为训练样本数目, N 为预测OAM阶数。MSE作为损失函数有助于量化模型预测结果与实际值之间的误差,从而优化模型性能。

在FSO中,大气湍流作为关键干扰因素,其本质是地球大气折射率遵循零均值、非零方差统计规律的随机过程。为全面评估湍流随机性对光强分布的影响,本文选取OAM阶数 $l = -3 \sim 3$ 的七阶模式,分别在弱、中、强湍流强度条件下(对应 $D/r_0 = 1, 2, 3$),系统研究基于CNN的不同MDT-FSO方案的性能优势。每种湍流条件下采集10 000张光强分布图作为数据集,总计30 000张图像。其中,24 000张用于训练集,3 000张用于测试集,3 000张用于验证集。

在复杂大气湍流强度情况下,训练次数与损失函数数值的关系如图2(a)所示。可以看出,随着训练的不断迭代,训练集与验证集上的损失函数值均迅速下降并趋于稳定,且两者变化过程较为接近,表明CNN模型未出现过拟合现象。当CNN模型达到收敛后,其在测试集上预测的平均功率误差如图2(b)所示。可以看出,各阶OAM模式的误差均低于5%,验证了CNN模型在测量OAM模式功率分布中的有效性。同时,数



(a) 训练次数与损失函数值的关系



(b) CNN在测试集上预测的平均功率误差

图2 CNN模型的训练性能

据量与模型性能存在正相关关系,若进一步扩充数据集,CNN模型有望实现更低的误差,性能得到进一步提升。

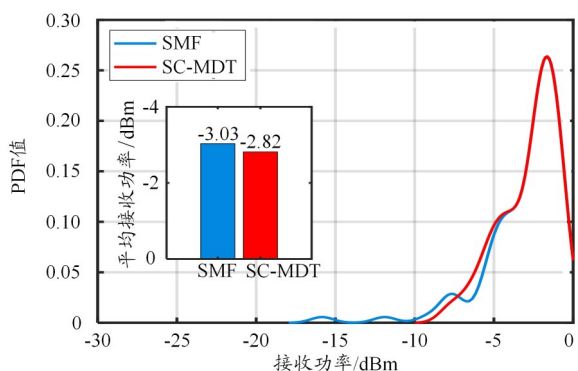
2.2 SC-MDT方案的性能分析

为了全面评估不同信号组合方案下,基于CNN的MDT-FSO系统的传输性能,本文首先验证FSO系统中SC-MDT方案在不同湍流条件下较传统SMF方案的传输性能提升效果,其仿真结果如图3所示。通过图中接收功率概率密度函数(PDF)曲线及平均接收功率数

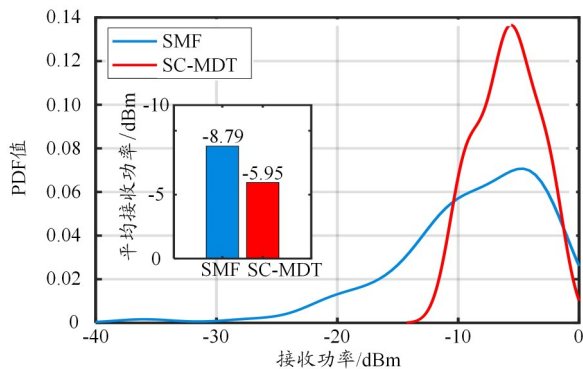
据可知,在不同湍流条件下,SC-MDT方案的平均接收功率均高于传统的SMF方案。当湍流强度为 $D/r_0 = 1$ 时,SC-MDT方案对系统性能的提升较小。这是因为在弱湍流条件下,大气湍流引起的OAM模式耦合较少,SC-MDT的FSO系统主要接收基模信号。随着湍流强度的增加,模式耦合逐渐增强,SC-MDT方案对接收功率的改善更为显著。在强湍流条件下($D/r_0 = 3$),采用SC-MDT方案后,FSO系统的平均接收功率提高了约4 dB。

2.3 EGC-MDT与MRC-MDT方案的性能比较

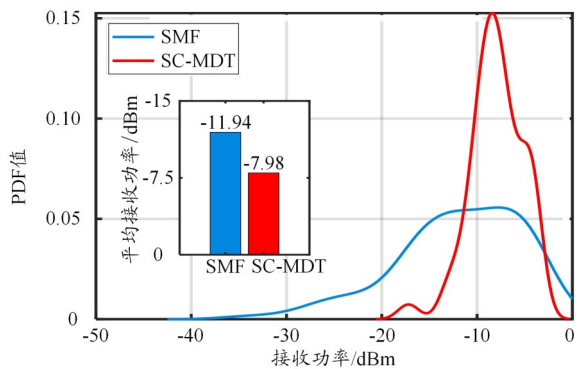
本文分析并比较了基于CNN的EGC-MDT和MRC-MDT方案对FSO系统传输性能的影响。由于多模式组合MDT-FSO系统在单个光束中同时发射多阶OAM模式,其总接收功率与未采用MDT的基模FSO系统相当。为公平比较,MDT方案统一采用3阶OAM模式进行耦合。其中,EGC-MDT选取基模附近的 $l = -1, 0, 1$ 三阶模式,且将未采用MDT的对照系统发射功率相应调整为原功率的三分之一。得到的传输性能如图4所示。当 $D/r_0 = 1$ 时,基于CNN的EGC-MDT方案的传输性能不如未采用MDT的传统SMF方案。这是因为在弱湍流条件下EGC-MDT方案不仅未能带来增益,反



(a) $D/r_0 = 1$

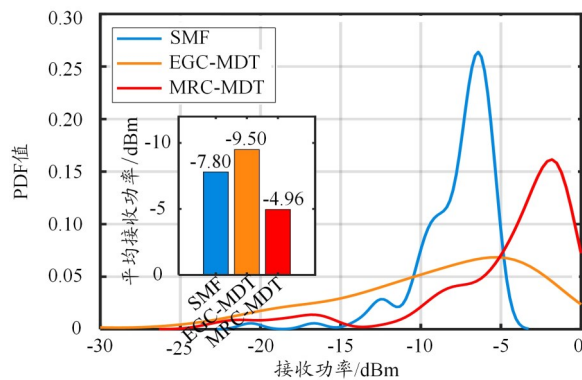


(b) $D/r_0 = 2$

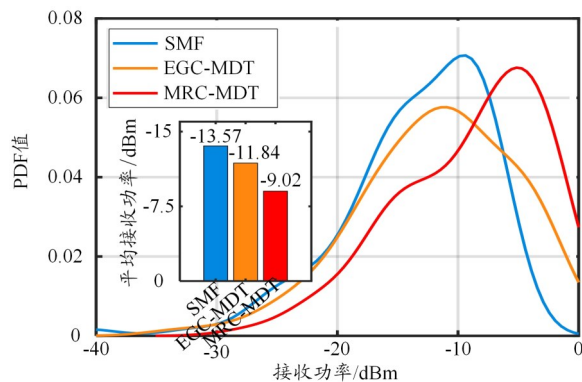


(c) $D/r_0 = 3$

图3 不同湍流条件下,2种方案的FSO系统传输性能

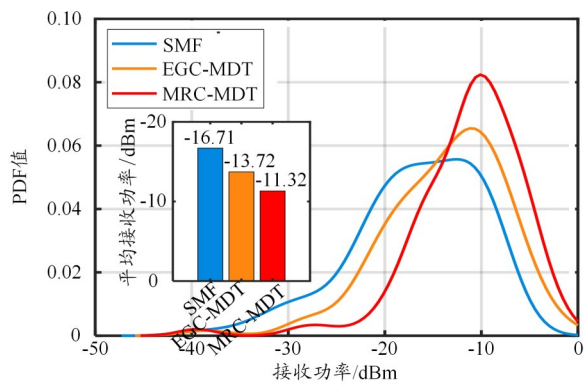


(a) $D/r_0 = 1$



(b) $D/r_0 = 2$

方志平,何易非,杨冬,等:基于CNN的自由空间光通信模式分集发射技术



(c) $D/r_0 = 3$

图4 不同湍流条件下,不同方案的FSO系统的传输性能

而因其固有的模式合并处理引入了额外的模式间串扰,导致性能劣化。当 $D/r_0 = 2$ 或3时,2种基于CNN的MDT方案均显著提升了FSO系统的传输性能,其中MRC-MDT方案的效果最佳,使系统平均接收功率提升了约5 dB。

2.4 MRC-MDT与MRC-MDR方案的对比

本文对基于CNN的MRC-MDT与MRC-MDR这2种方案的性能进行对比分析。其中,MRC-MDR方案采用了功率正比加权策略。2种方案的FSO系统传输性能如图5所示。可以看出,在弱、中、强湍流强度条件下,较MRC-MDR方案,MRC-MDT方案始终保持3 dB的平均接收功率优势。这归因于MRC-MDT不仅能实现多阶OAM模式的能量汇聚,其权重分配机制还能利用CNN学习大气湍流特性,动态补偿因湍流导致的OAM模式扩散,从而实现更高效的信号接收与处理,展现出更优的系统性能。

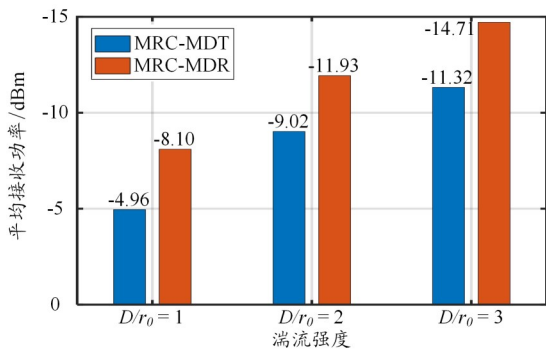


图5 不同湍流条件下,2种方案的FSO系统传输性能

3 结束语

本文提出一种基于CNN的模式分集发射FSO系

统。该系统利用CNN实时感知湍流信道并测量OAM模式功率分布,为发射端预补偿提供依据。研究比较了SC-MDT、EGC-MDT与MRC-MDT这3种方案的系统传输性能。实验结果表明:在强湍流条件下,与传统SMF方案相比,SC-MDT与MRC-MDT方案可分别提升平均接收功率4 dB与5 dB;其中,MRC-MDT方案在中强湍流下优势显著,且在不同湍流强度下均保持约3 dB的性能优势。综上所述,所提基于CNN的MDT-FSO系统方案在对抗湍流干扰方面具有优越性,为高速FSO提供了一种有效的发射分集解决方案。

参考文献:

- [1] Al-gailani S A, Salleh M F M, Salem A A, et al. A survey of free space optics (FSO) communication systems, links, and networks[J]. IEEE Access, 2020, 9: 7353-7373.
- [2] Elsayed E E. Atmospheric turbulence mitigation of MIMO-RF/FSO DWDM communication systems using advanced diversity multiplexing with hybrid N-SM/OMI M-ary spatial pulse-position modulation schemes [J]. Optics Communications, 2024, 562: 130558-130573.
- [3] 卜洋,杨志,赵丽娟,等. 大气湍流对基于轨道角动量的自由空间光通信影响及解决方案综述[J]. 半导体光电, 2022, 43(6): 1099-1108.
- [4] Zou K, Pang K, Song H, et al. High-capacity free-space optical communications using wavelength-and mode-division-multiplexing in the mid-infrared region[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 7662-7671.
- [5] Wang J, Liu J, Li S, et al. Orbital angular momentum and beyond in free-space optical communications[J]. Nanophotonics, 2022, 11(4): 645-680.
- [6] Liu N, Ju C, Wang D, et al. Multi-aperture coherent digital combining based on complex-valued MIMO 2N×2 adaptive equalizer for FSO communication[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(18): 5983-5990.
- [7] Song S, He Q, Liu Y, et al. Personalized federated learning based adaptive optical compensation for atmospheric turbulence[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 43(1): 177-189.
- [8] Willner A E, Zou K, Pang K, et al. Free-space mid-IR communications using wavelength and mode division multiplexing[J]. Optics Communications, 2023, 541: 129518-129524.
- [9] Zhang C, Liang P, Nebhen J, et al. Performance analysis of mode division multiplexing-based free space optical systems for healthcare infrastructure's[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53: 1-14.
- [10] Liu W, Tu C, Liu Y, et al. Orbital angular momentum superimposed mode recognition based on multi-label image classification[J]. Optics Express, 2024, 32(22): 38187-38202.
- [11] Wang F, Qiu C, Zhang M, et al. Free-space optical communication based on mode diversity reception using a nonmode selective photonic lantern and equal gain combining[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 15(1): 1-7.
- [12] Li S, Chen S, Gao C, et al. Atmospheric turbulence compensation in orbital angular momentum communications: Advances and perspectives [J]. Optics Communications, 2018, 408: 68-81.