

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.260043.

专题:面向6G的无线光通信

吴廷伟,于佳汇,周伟煜,等. 无人机自由空间光通信系统研究进展综述[J]. 光通信研究, 2026(3):1-12.

Wu T W, Yu J H, Zhou W Y, et al. A Review of Research Progress on UAV Free-Space Optical Communication Systems[J]. Study on Optical Communications, 2026(3):1-12.

无人机自由空间光通信系统研究进展综述(特邀)

吴廷伟^{1a,1b}, 于佳汇^{1a}, 周伟煜^{1a}, 赵伦^{1a}, 王永^{1c}, 朱睿杰², 杨辉², 郭磊^{1a}

(1. 重庆邮电大学 a. 通信与信息工程学院; b. 网络空间安全与信息法学院; c. 经济管理学院, 重庆 400065; 2. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 无人机(UAV)搭载自由空间光(FSO)通信因其高带宽和高安全性,成为空天地海一体化通信体系里关键的研究方向。然而 UAV 平台机动性强但稳定性有限,光通信链路在大气湍流和指向误差影响下,表现出时变和非平稳特性,严重限制了系统可靠性。文章综述了 UAV-FSO 通信系统在系统框架、信道特性与衰落建模、指向-捕获-跟踪(PAT)关键技术及典型应用场景等方面的研究进展,重点分析了大气湍流、平台抖动和到达角波动等因素的建模方法及其对链路性能的影响,梳理了预测控制、光机协同补偿和智能跟踪等 PAT 技术的发展现状,并总结了应急通信、空中协同、远距离回传和高可靠保障等场景下的应用特点。文章归纳了 UAV-FSO 通信在系统协同优化、复杂环境验证和工程应用方面的挑战,并展望了未来发展方向。

关键词: 无人机光通信;自由空间光通信;信道建模;指向-捕获-跟踪

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A

A Review of Research Progress on UAV Free-Space Optical Communication Systems

WU Tingwei^{1a,1b}, YU Jiahui^{1a}, ZHOU Weiyu^{1a}, ZHAO Lun^{1a}, WANG Yong^{1c}, ZHU Ruijie², YANG Hui², GUO Lei^{1a}

(1. a. School of Communication and Information Engineering; b. School of Cyberspace Security and Information Law; c. School of Economics and Management, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China; 2. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-enabled Free-Space Optical (FSO) communication, owing to its high bandwidth and strong security, has emerged as an important research direction in integrated space-air-ground-sea communication networks. However, although UAV platforms offer high mobility, their limited stability causes optical links to exhibit pronounced time-varying and non-stationary characteristics under atmospheric turbulence and pointing errors, thereby severely constraining the system reliability. This paper reviews the research progress in UAV-FSO communication systems from the aspects of system architectures, channel characteristics and fading modeling, Pointing, Acquisition and Tracking (PAT) technologies, and typical application scenarios. It focuses on the modeling of atmospheric turbulence, platform jitter, and angle-of-arrival fluctuations, as well as their effects on link performance. It also summarizes recent advances in PAT techniques, including predictive control, opto-mechanical cooperative compensation, and intelligent tracking. In addition, the characteristics of UAV-FSO applications in emergency communications, aerial collaboration, long-distance backhaul, and high-reliability communication support are discussed. Finally, the major challenges in system-level collaborative optimization, physical validation in complex environments, and engineering implementation are identified, and future research trends are outlined.

Key words: UAV optical communication; FSO communication; channel modeling; PAT

0 引言

随着第六代移动通信技术(6th Generation Mobile Communication Technology, 6G)空天地海一体化网络的发展,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)凭借机动性强、成本低和易部署等优势,成为构建中空域立体覆盖的重要通信平台,在应急通信、

临时覆盖、信息中继及高安全数据传输等场景中展现出了广阔应用前景^[1-3]。传统射频(Radio Frequency, RF)通信在应用中逐渐暴露出频谱资源紧张、抗干扰能力有限和通信保密性不足等问题,难以持续支撑 UAV 对高速率和高可靠性通信的需求^[4-6]。自由空间光(Free-Space Optical, FSO)通信利用激光作为载波,具有高带宽、高速率、强方向

收稿日期:2026-02-04; 修回日期:2026-03-11; 纸质出版日期:2026-06-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62025105, 62301097, 62401092, U24A20216);重庆市自然科学基金面上资助项目(CSTB2024NSCQMSX0991);光纤传感与通信教育部重点实验室开放基金资助项目(ZYGX2024K010)

作者简介:吴廷伟(1990-),男,重庆江津人。副教授,博士,主要研究方向为自由空间光通信。

通信作者:吴廷伟,副教授。E-mail:wutw@cqupt.edu.cn

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

性和免频谱许可等显著优势,被认为是 UAV 通信的重要补充甚至潜在替代方案^[7-8]。与地面或固定平台相比,UAV 在飞行和悬停过程中容易受到姿态扰动、振动及复杂气象条件影响,这就使得光通信链路更容易受到指向误差、大气湍流和遮挡等因素制约^[9]。在系统小型化和低功耗等工程约束条件下,怎样在复杂动态环境中实现稳定可靠的 UAV-FSO 通信,仍然是需要尽快解决的关键问题。

从系统层面看,UAV-FSO 通信的核心挑战并不是单一器件或算法性能的提升,而是在平台高机动性与环境强随机性条件下,对光链路不确定性的建模、抑制与协同控制。近年来,已有综述对 UAV-FSO 通信系统架构、性能分析及典型应用进行了总结,但多数工作侧重于结构比较或单一性能评估,对信道建模与关键支撑技术之间的关联分析相对不足,缺乏围绕动态环境下链路不确定性的系统梳理。本文从系统架构、信道特性与衰落建模、指向-捕获-跟踪(Pointing, Acquisition and Tracking, PAT)关键技术以及典型应用场景 4 个层面展开综述,重点分析了多因素联合建模方法及其对链路性能的影响,探讨了建模与主动补偿机制之间的协同关系,并在此基础上总结了当前 UAV-FSO 通信面临的主要挑战与未来发展趋势。

1 系统框架与应用模式

UAV-FSO 通信系统的基本架构通常由光发射机、光接收机、UAV 平台以及 PAT 子系统构成^[10-12],如图 1 所示。与固定平台 FSO 系统相比,

UAV 平台具有较强机动性,但同时也存在姿态扰动、位置漂移和载荷受限等特点,系统设计不仅要考虑光链路传输能力,还需要兼顾平台运动特性与对准控制能力。

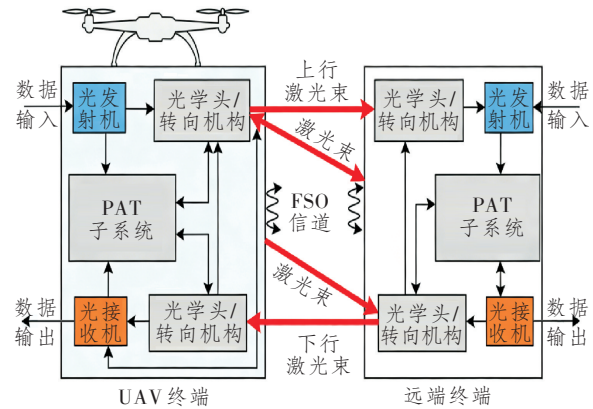


图 1 UAV-FSO 通信系统结构图

Figure 1 Structure diagram of UAV-FSO communication system

从系统实现形式来看,UAV-FSO 通信可根据网络节点构成与链路组织方式划分为若干典型架构,包括空地链路、空空链路、中继增强型以及光/RF 混合架构等^[13-18]。不同架构在节点部署方式、拓扑组织形式以及链路不确定性来源等方面存在明显差异,如表 1 所示。UAV 平台在飞行和悬停过程中不可避免地存在姿态抖动和位置偏移,使得系统对光轴对准精度和链路稳定性高度敏感,这也是 UAV-FSO 通信系统架构设计区别于固定式 FSO 系统的关键所在。

表 1 UAV-FSO 通信系统的典型架构分类

Table 1 Classification of typical architectures for UAV-FSO communication systems

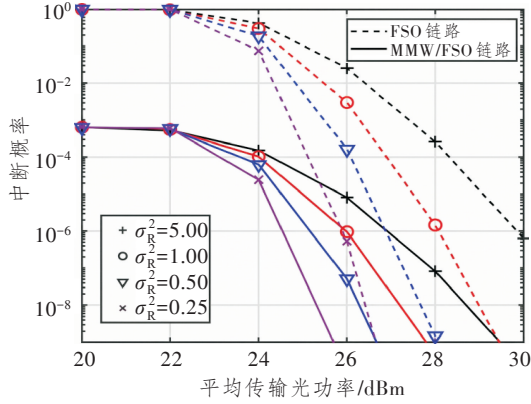
分类维度	空地链路	空空链路	中继增强型	光/RF 混合
通信节点高度关系	一端固定于地面,一端为低/中空 UAV	通信双方均为 UAV	UAV 位于源与目的节点之间	UAV 同时具备 FSO 与 RF 链路
网络拓扑结构	单跳、星型或点对点	单跳或多 UAV 协同	多跳或协同中继拓扑	异构多链路并行或切换
主要信道不确定性来源	大气湍流、指向误差、AoA 波动	相对运动、姿态耦合误差、湍流	多跳累积误差、AoA 地板效应	FSO 中断结合 RF 衰落切换
应用场景	应急通信、临时接入	空中协同、中继覆盖	长距离回传、复杂环境	强湍流或高可靠需求场景

注:AoA 为到达角。

目前,已有研究通过引入 UAV 中继或协同机制来改善链路几何条件并缩短单跳传输距离,从而在一定程度上提升了系统性能。例如,Li 等人针对 UAV 辅助的 FSO 中继系统,验证了译码转发(Decode-and-Forward, DF)及协同中继机制在复杂环境下的可行性与性能增益^[19]。单一光链路易受气

象条件和平台稳定性影响,有部分研究引入 RF 链路,将其作为补充或备份,然后构建光/RF 混合 UAV 通信系统,以此增强通信连续性^[20-21]。如图 2 所示,在不同的大气湍流水平下,毫米波(Millimeter Wave, MMW)/FSO 混合系统与纯 FSO 链路相比,其中断概率更低,此优势在强湍流条件下特别明

显,结果表明,引入异构链路能在系统层面有效让通信鲁棒性得到提升。



注: σ_R^2 为湍流强度,其数值越高,表示湍流强度越大。

图2 在不同的大气湍流水平下,FSO和MMW/FSO系统的平均中断概率与平均传输光功率的关系^[21]

Figure 2 Average outage probability versus average transmitted optical power for FSO and MMW/FSO systems under different level of atmospheric turbulence^[21]

2 信道特性与衰落建模

UAV-FSO通信链路的信道特性与地面固定式FSO存在显著差异。地面固定FSO系统通常基于刚性结构和稳定支撑平台,其指向误差多由微小安装偏差或低频环境扰动引起,常被建模为方差恒定的准静态高斯随机变量,信道整体可近似为统计平稳过程^[22]。在UAV平台中,飞行过程不可避免地伴随着高频机械振动以及横滚、俯仰和偏航等姿态角的快速变化,其指向误差不再是简单的独立随机变量,而需建模为受平台动力学方程驱动的非平稳时变随机过程^[23]。

UAV-FSO通信会受到几何扩展损耗、大气吸收与散射、大气湍流以及平台抖动引起的指向误差等因素的共同影响,导致接收光强和相位产生随机波动^[24-25]。UAV在飞行或悬停过程中存在姿态变化、机体振动和位置漂移,使链路表现出更强的时变性与非平稳性^[26]。此外,UAV通常工作于近地或中低空区域,该区域易受地表热流和气象条件变化影响,湍流特性也更加复杂。因此,准确对大气湍流与指向误差对链路性能造成的影响进行建模,是UAV-FSO通信系统设计与评估的关键。

大气湍流是UAV-FSO通信信道中最主要的随机扰动来源之一。空气温度和压力的随机变化,使得大气折射率在空间和时间上呈现随机分布,让

光波在传播过程中发生波前畸变和光强闪烁现象^[27]。对于固定FSO链路,在弱湍流条件下,光强起伏通常采用对数正态(Log-Normal, LN)模型进行刻画;在中、强湍流条件下,Gamma-Gamma(GG)模型因能够同时表征大尺度与小尺度湍流效应而被广泛采用^[28]。另外,FSO链路具有很强的方向性,光束发散角较小,即使有微小的姿态扰动、振动或控制误差也会让光束偏移和光斑漂移,从而引入指向误差。而UAV悬停和飞行过程中产生的姿态波动会造成几何对准误差,还会改变光束的入射方向,引起AoA波动,接收视场(Field of View, FOV)受限条件时,就会触发链路中断效应。2021年,南京邮电大学的Wang等人将UAV悬停过程中姿态波动引起的指向误差与AoA波动统一纳入信道建模框架中,信道总增益表示为大气衰减、大气湍流衰落、指向误差几何损耗以及AoA引起的FOV越界中断等因素的乘积 h_i ,其可表示为^[29]

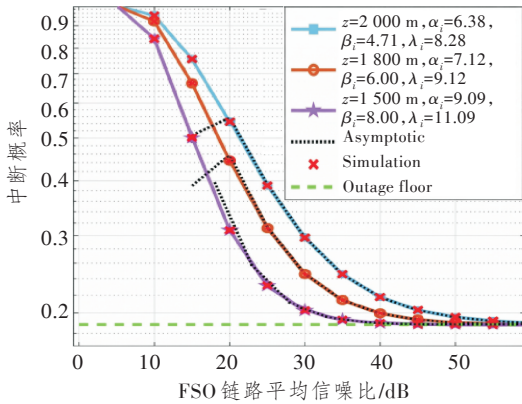
$$h_i = h_i^l h_i^a h_i^{pe} h_i^{aoa}, i = 1, \dots, M+1, \quad (1)$$

式中: h_i^l , h_i^a , h_i^{pe} 和 h_i^{aoa} 分别为大气损耗因子、大气湍流因子、指向误差因子以及AoA波动引起的链路中断因子; $M+1$ 为UAV链路总数量; i 为链路索引。其中各个衰落因子的分布如表2所示,推导了单链路及端到端中断概率的解析表达式,结合渐近分析揭示了入射角波动对系统性能上限的约束机理,同时讨论了波束宽度、FOV角以及UAV位置等关键参数对中断性能的影响。2024年,印度理工学院的Sharma等人把上述多因素联合信道模型扩展至多跳UAV辅助FSO系统场景中,在DF中继框架中引入双重反转Gamma-Gamma(Doubly Inverted Gamma-Gamma, IGGG)湍流模型^[30],并同时考虑了非零波束偏置指向误差与AoA波动对系统性能的影响。如图3所示,表明多跳结构可通过缩短单跳距离有效缓解湍流引起的性能退化,但AoA波动在高信噪比区域仍会引入明显的性能地板,成为制约系统可靠性的关键因素。图3(a)和图3(b)分别验证了缩短链路距离与增加中继节点

表2 衰落因子的分布

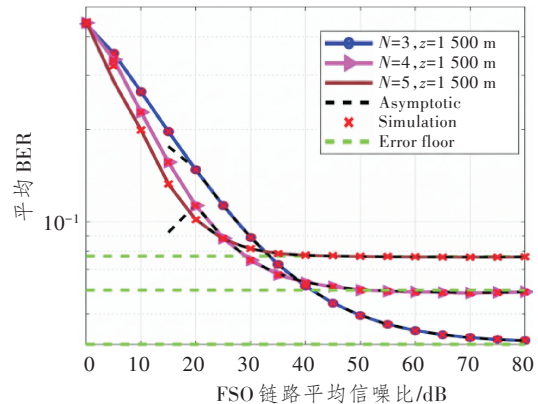
Table 2 Distribution of the fading factor

衰落因子	符号	对应的统计分布模型
大气损耗	h_i^l	确定性参数
大气湍流	h_i^a	LN(弱湍流)、GG(中强湍流)、IGGG(多跳复杂)
指向误差	h_i^{pe}	高斯分布
AoA波动	h_i^{aoa}	FOV越界触发的随机中断



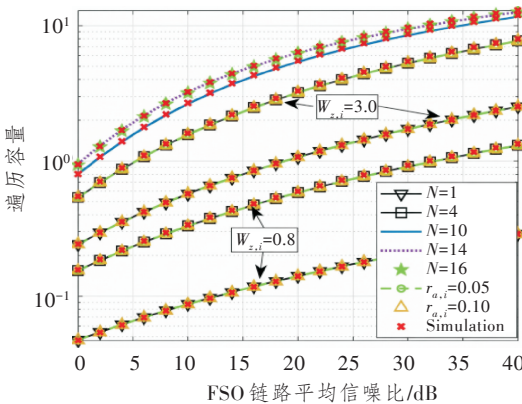
注： z 为源节点到目的节点的总距离； α_i 、 β_i 和 λ_i 分别为IGGG湍流分布的参数。

(a) 不同链路距离下 FSO 系统的中断性能
(a) Outage performance of FSO system for various link distances



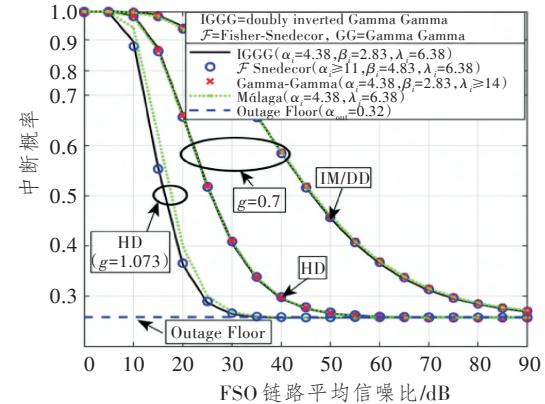
注： N 为中继 UAV 数量。

(b) 不同中继数量下的 BER
(b) BER for various numbers of relays



注： $W_{z,i}$ 为入射光束宽度； $r_{a,i}$ 为接收端的接收孔径半径。

(c) 随参数 N 、 $W_{z,i}$ 和 $r_{a,i}$ 变化的遍历容量曲线
(c) Ergodic capacity curve for varying N , $W_{z,i}$ and $r_{a,i}$



注：HD 为外差检测； g 为指向误差系数；IM/DD 为强度调制/直接检测； α_{om} 为中断概率底值。

(d) 不同湍流模型的中断性能对比
(d) Outage performance comparison of different turbulence models

图 3 链路距离、中继数量、湍流模型及遍历容量的影响与对比^[30]

Figure 3 Impact and comparison of link distance, relay number, turbulence model, and ergodic capacity^[30]

对改善中断概率和误码率(Bit Error Rate, BER)的显著作用,而图 3(c)进一步表明多跳拓扑能够提升系统遍历容量,图 3(d)则通过不同模型的对比,验证了 IGCG 模型在评估复杂湍流性能时的适用性。杭州电子科技大学的 Xu 等人进一步研究了雾环境下的多 UAV-FSO 通信系统,构建了同时考虑雾吸收、Málaga 湍流和指向误差的多跳信道模型,并推导了放大转发和 DF 协议下的中断概率、平均 BER 和遍历容量表达式^[31]。结果表明,增加中继跳数可在一定程度上缓解雾衰减和湍流带来的性能退化,而 UAV 间高度差、方位角及抖动标准差的增大会进一步恶化链路性能。

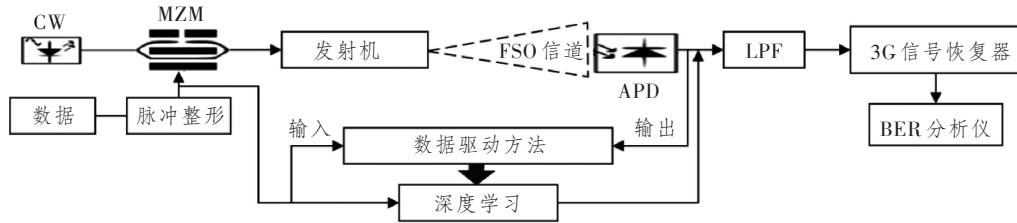
面对 UAV 平台高频抖动与复杂环境物理遮挡带来的非平稳信道衰落,可重构智能表面(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)作为一种主动信道重构机制被应用到 UAV-FSO 通信系统中。近

期,Nguyen 等人针对 RIS-UAV 中继辅助的卫星-空中-地面混合 FSO/RF 集成网络,构建了由 FSO 上行段和 RF 下行段组成的端到端系统模型,并围绕 RIS 反射单元配置、UAV 部署位置及功率分配开展联合优化,给出了系统中断性能与容量变化规律^[32];Li 等人则面向 RIS 辅助多用户混合 FSO/RF 系统,建立了复合信道模型,推导了保密中断概率和平均保密容量等解析表达式,量化分析了 RIS 单元数量、湍流强度及窃听条件对系统安全性能的影响^[33]。这些工作表明,RIS 辅助场景下的研究已由传统直视链路分析拓展至反射增强与异构融合条件下的复合信道建模。

近年来,有研究开始引入机器学习方法构建数据驱动的 FSO 信道模型^[34],其模型结构如图 4 所示。2023 年,北京邮电大学 Chen 等人采用生成式对抗网络(Generative Adversarial Networks,

GAN)、双向长短期记忆网络(Bidirectional Long Short-Term Memory, BiLSTM)和贝叶斯神经网络(Bayesian Neural Network, BNN)3种算法对FSO通信系统进行建模,动态学习FSO的信道特性^[35]。结果表明,与BiLSTM和BNN算法相比,GAN能够更好地学习FSO通道的统计分布特性,并通过更少的神经元数量和更低的复杂度实现更好的建模性能;2025年,Tumma等人提出了一种基于变分自编码器的无导频信道估计方法^[36],该方法综合考虑了大气湍流、指向误差以及加性噪声等因素对链路传输性能的影响,通过学习接收信号的潜在统计特

征实现信道估计,结果表明,与自编码器、深度神经网络和卷积神经网络等方法相比,此方法在强湍流和指向失配条件下能够获得更低的估计误差。2026年,北京邮电大学的Zhang等人提出了一种面向大气湍流鲁棒传输的端到端FSO通信框架^[37],通过在联合编码调制与联合解调重构网络之间嵌入BiLSTM信道模型,实现了对真实湍流信道失真的可微近似与端到端联合优化。如图5所示,在不同湍流强度下,BiLSTM模型生成的信道在概率分布与时域波形上均与真实信道高度匹配,有效复现了实测信道的动态演化特征。



注: CW为连续波; MZM为马赫-曾德尔电光调制器; APD为雪崩光电检测二极管; LPF为低通滤波器; 3G信号为第三代移动通信技术信号。

图4 FSO通信系统中采用机器学习算法的数据驱动信道模型^[34]

Figure 4 Data-driven channel model using machine learning algorithm in FSO communication system^[34]

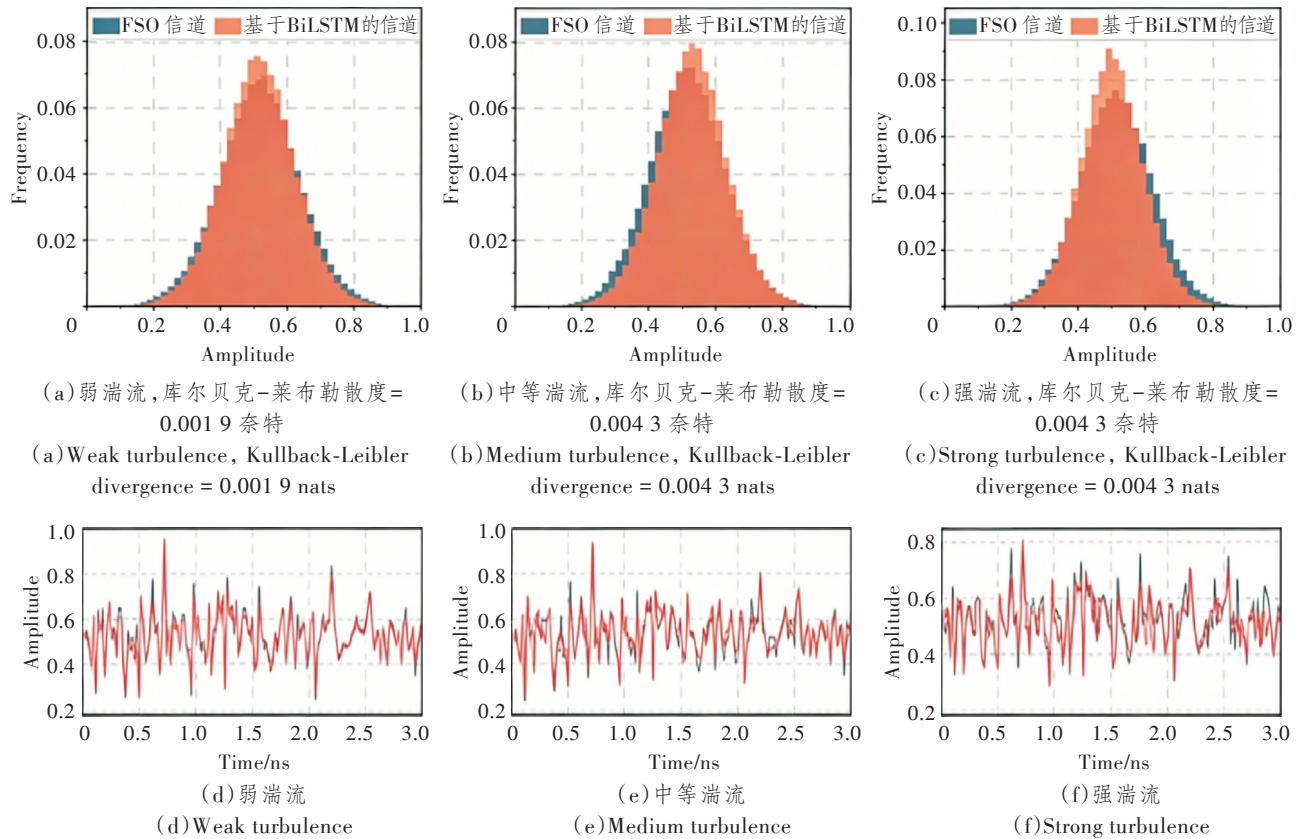


图5 真实FSO信道和基于BiLSTM的信道模型在弱、中等和强湍流下的幅度分布和波形对比^[37]

Figure 5 Amplitude distribution and waveform comparison between the real FSO channel and the BiLSTM-based channel model under weak, moderate, and strong turbulence^[37]

为了方便对不同建模方法的适用场景与局限性进行系统比较,表3所示为本文对当前 UAV-FSO 通信信道不确定性建模框架的归纳与对比。从单因素统计模型到多因素复合建模,再到数据驱动方法,

可以观察到建模思路逐渐由解析表达式向高维映射逼近的转变,但不同方法在工程适用性与模型复杂度之间仍存在显著的权衡关系。

表3 UAV-FSO 信道不确定性建模框架与演进路径对比

Table 3 Modeling framework and evolutionary path comparison of UAV-FSO channel uncertainty

建模层级	代表文献	不确定来源	数学建模形式	工程适用性	局限性
单因素湍流建模	[28]	大气湍流	LN/GG	理论分析	忽略平台扰动
湍流+指向误差	[29]	湍流+抖动	乘积型衰落模型	UAV 悬停	忽略多跳
多跳复合衰落建模	[30-31]	多跳+ AoA	IGGG+中断模型	中继场景	复杂度高
异构链路融合与 RIS 辅助建模	[32-33]	FSO/RF 异构衰落+反射增强	联合信道与资源优化模型	恶劣环境与高可靠场景	强依赖场景假设与优化参数
数据驱动建模	[35-37]	隐式全因素	深度学习	动态环境	解释性不足

3 PAT 关键技术

信道与衰落建模为量化评估大气湍流与平台抖动对通信质量的劣化效应提供了理论依据。理论模型主要侧重于揭示系统性能的物理边界,在实际的动态飞行环境中,UAV 平台的高频振动、随机姿态扰动以及节点间的相对运动,会引发严重的光束指向失配。为了从物理层面上实时克服这种时变的空间不确定性,维持光链路的持续连通,只依赖信道评估显然不足,还须引入主动的光束对准与补偿机制,而高精度的 PAT 技术正是实现这一目标的核心支撑^[38]。

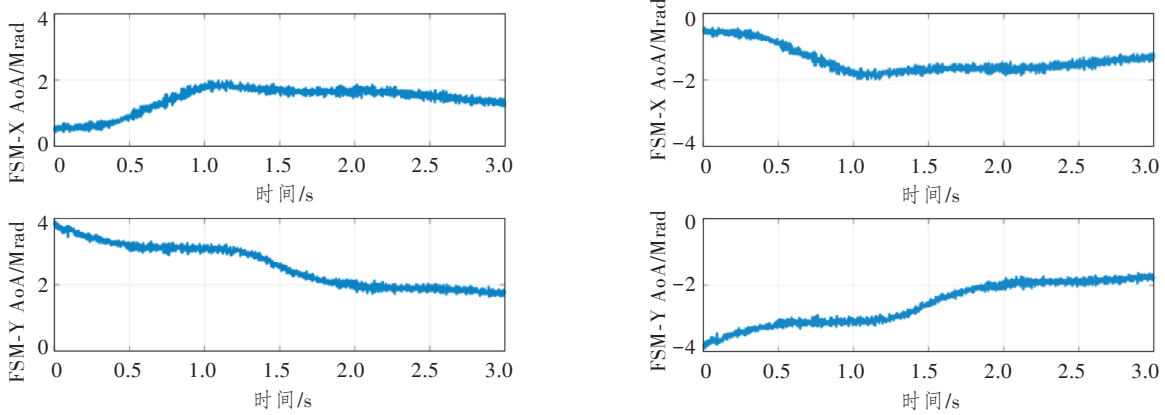
PAT 系统通常包括初始指向、目标捕获与闭环跟踪 3 个基本环节。指向用于将发射光束粗略对准目标方向,捕获用于建立稳定链路,跟踪则用于在平台运动和外界扰动条件下持续修正指向误差,从而保证通信光束始终落入接收视场范围内。PAT 系统的性能通常用残余指向误差进行量化,其目标可表述为最小化跟踪误差的均方值 σ_{pe}^2 ,可表示为

$$\sigma_{pe}^2 = E[(\theta_x - \hat{\theta}_x)^2 + (\theta_y - \hat{\theta}_y)^2], \quad (2)$$

式中: $E[\cdot]$ 为数学期望; θ_x 和 θ_y 为指向 x 轴和 y 轴上的真实角度值,也就是目标光束的实际指向角度; $\hat{\theta}_x$ 和 $\hat{\theta}_y$ 为指向 x 轴和 y 轴上的估计角度值,也就是 PAT 系统通过跟踪算法得到的指向角度估计。

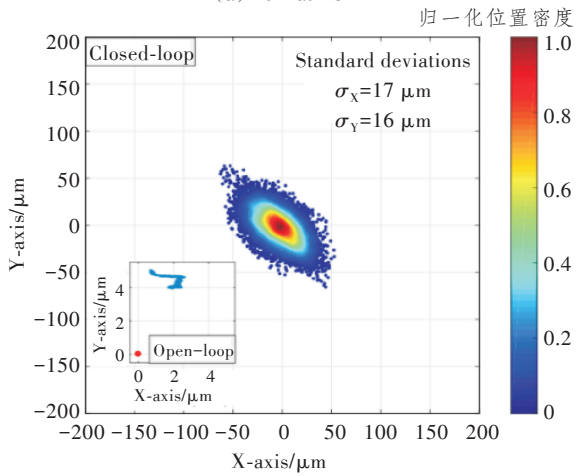
现有研究表明,UAV-FSO 通信中的 PAT 技术已形成由传统机械云台、视觉/非对称跟踪以及光束跟踪等核心技术分支构成的技术谱系。然而,地面场景中成熟的静态开环对准与低速机械转台粗跟踪技术,因无法响应 UAV 平台毫秒级的瞬态偏移而难以直接适用,极易引发持续性的 FOV 越界与

链路断连。因此,部分传统技术虽可向 UAV 平台迁移,但必须进行深度改造。例如,传统的比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)闭环控制受限于反馈时延与带宽,正逐步升级为融合卡尔曼滤波的多步预测控制或深度强化学习(Deep Reinforcement Learning, DRL)自适应控制;顺应这一技术发展,部分研究聚焦于控制算法的改进。例如,中国科学院半导体研究所陈加文团队针对单探测器复合轴 PAT 系统粗跟踪子系统数据利用率较低的问题,提出了结合卡尔曼滤波与最小二乘法的多步长实时预测方法^[39],该方法通过多卡尔曼滤波器并行预测与数据平滑处理,提高了粗跟踪阶段的预测精度与系统稳定性;仿真结果表明,25 ms 预测步长相较于传统 20 ms 单步长预测,系统误差与稳定性均得到明显改善,为 UAV 平台下低成本、高可靠粗跟踪优化提供了思路。也有研究着眼于硬件层面的光机协同,Guo 等人提出了一种基于快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)的光轴偏差补偿方法^[40],把光线追迹模型与多框架光机系统建模结合起来,实时修正平台振动和姿态变化引起的光束偏移,实验结果显示,能把残余指向误差控制在微弧度量级,并提高动态场景下的指向精度。在系统级物理验证方面,东京大学的 Trinh 等人通过实验研究了搭载精跟踪系统的 UAV-地面反射型 FSO 链路^[41],系统分析了跟踪误差对信道统计特性的影响,表明精跟踪机制能够显著抑制指向误差引起的光强波动。如图 6 所示,在 20 m 高悬停条件下,尽管仍存在明显 AoA 波动,PID 驱动的 FSM 仍可实现实时补偿,使系统保持 9 μm 以内的跟踪精度。结合 15 m 高度下的实验结果可知,此 PAT 系统在不同悬停高度下均具有较好的高精度跟踪性能与场

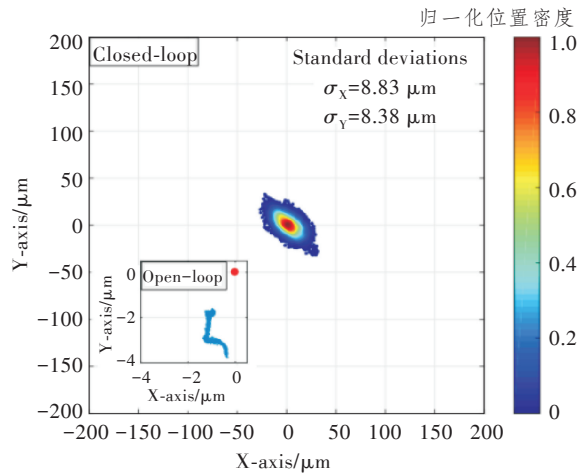


注:FSM-X为FSM在x轴的分量;FSM-Y为FSM在y轴的分量
(a)FSM处AoA

(b)FSM光束跟踪角
(b)FSM tracking angle



注: σ_x 为水平方向上的标准差; σ_y 为垂直方向上的标准差。
(c)四象限探测器上光束质心的归一化位置密度
(c)Beam-centroid normalized position density at the quadrant detector



(d)功率计处的光束质心归一化位置分布密度
(d)Beam-centroid normalized position density at the power meter

图6 不同悬停高度下PAT系统的AoA波动与光束对准特性图^[41]

Figure 6 AoA fluctuations and beam alignment characteristics of the PAT system under different hovering altitudes^[41]

景适应性。

针对更为复杂的跨尺度协同需求,DRL自适应控制展现出了巨大的潜力。近期,东北大学的Tian等人引入了DRL框架,对UAV-地面FSO链路中的光束跟踪与对准问题进行了系统建模,并对深度确定性策略梯度(Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG)与近端策略优化(Proximal Policy Optimization, PPO)算法进行了对比分析^[42]。在有用户移动、建筑遮挡以及大气扰动的高保真动态环境里,仿真表明,两种算法均能将链路中断率从近100%降至30%以下。PPO算法具有更快的收敛速度,而DDPG在稳态阶段表现出更高的跟踪精度与系统吞吐量。沈阳航空航天大学Yu等人从系统层对UAV-FSO通信中动态对准问题进行了归纳,认为大气衰减、湍流、平台振动、指向误差以及硬件约

束之间存在相互耦合关系,而PAT系统与飞行平台控制在响应速度和作用尺度上又具有显著差异。针对此“快慢环分离”的问题,作者提出了多速率协同对准框架^[43],将UAV平台稳定控制与FSO精细跟踪统一到多智能体强化学习框架中,为实现跨尺度和跨层次的协同对准提供了新的思路。

为系统梳理PAT关键技术的发展脉络与控制机制差异,表4对不同控制范式的理论基础、性能瓶颈及发展趋势进行了对比。从传统PID闭环控制到预测控制与光机耦合补偿,再到基于DRL的智能控制方法,可以观察到控制策略逐步由线性反馈机制向自适应与数据驱动框架演进。

此外,UAV-FSO通信系统的全面实用化还离不开其他几个关键技术维度的协同支撑。在硬件基础层面,受限于UAV平台严苛的载荷与电池容量,

表4 PAT 关键技术的控制机制与技术演进对比

Table 4 Comparison of control mechanisms and technological evolution of PAT key technologies

技术范式	代表文献	控制理论	性能瓶颈	发展趋势
反馈控制	[38][41]	PID 控制	受带宽限制	提升精度
预测增强控制	[39]	卡尔曼+最小二乘法	参数依赖强	融合模型
光机协同补偿	[40]	光线追迹+FSM	机械响应速度慢	微弧度控制
DRL 智能控制	[42-43]	PPO/DDPG	训练成本高	自适应控制

系统小型化与低功耗设计是实现长航时通信的物理前提;在链路保障层面,对于城市或复杂空域中视距链路易受物理遮挡的问题,基于智能反射面或灵活中继节点的抗遮挡技术正成为提升链路环境适应性的重要手段;在网络调度层面,随着应用场景向集群化演进,面向多 UAV 协同通信的资源调度算法构成了实现网络全局效能最优的核心软件支撑。

除本文详述的信道建模、PAT 与混合架构外,UAV-FSO 通信的全面实用化还需要多维技术的协同支撑。在硬件基础层面,依托光子集成电路等微机电系统的硬件小型化与低功耗设计,是突破 UAV 严苛载荷限制、实现长航时通信的物理先决条件;在链路保障层面,针对强非平稳与易受遮挡的通信环境,自适应调制编码技术与基于智能反射面的抗遮挡机制,共同构筑了底层传输可靠性的基石;在网络调度层面,面向高动态集群的多用户接入、灵活组网及多 UAV 协同资源调度算法,构成了实现全局效能最优的核心支撑;这些技术无疑也是推动 UAV-FSO 通信从理论走向大规模工程应用的重要基石。

4 典型应用场景

UAV-FSO 通信具有高带宽、高保密性、抗电磁干扰和灵活部署等优势,在应急保障、灾后临时保障、空中协同、远距离回传及高可靠通信等场景发挥着重要作用^[44]。由于不同场景在容量、时延、可靠性和环境适应性等方面的需求存在显著差异,其适用的系统架构、链路角色及关键支撑技术也不尽相同。

4.1 应急通信与灾后临时保障场景

在自然灾害、突发事故及重大活动保障等场景中,地面通信基础设施可能出现受损、中断或短时容量不足等情况,需要能够快速部署的通信手段恢复重点业务传输能力。此时,UAV-FSO 通信能够快速构建临时高速链路,实现灾情信息、现场视频、测绘数据和指挥调度信息等关键业务的回传^[45]。具体应用时,UAV 通常部署于受灾区域上空或通信薄弱区域附近,通过空地视距链路与地面指挥中心、

应急基站或临时通信节点建立连接,从而在原有网络失效或不足条件下,提供面向重点业务的临时通信保障。该场景的核心需求在于快速建链和及时恢复,因此其应用重点是提升系统的快速部署能力、短时驻空支撑能力及链路建立效率。

4.2 空中协同侦察与组网通信场景

在协同侦察、目标监测、编队飞行和巡检作业等任务中,多架 UAV 之间需要进行高速、低时延的信息交互,以支撑任务协同、状态共享和联合决策。UAV-FSO 通信在该场景中的主要作用是作为多 UAV 系统提供空中平台之间的高速互联链路,用于传输图像、视频流、传感信息及协同控制指令^[46]。具体应用时,FSO 链路通常部署于相邻 UAV 或编队骨干节点之间,形成面向任务协同的空中通信通道,从而实现多平台之间的实时信息共享与协同作业^[47]。该场景的重点在于“空中节点之间的互联”,其核心问题是平台相对运动、姿态变化和拓扑动态演化条件下的链路保持与组网支撑,更强调高精度 PAT、多节点协同控制和动态组网机制。

4.3 远距离回传与复杂环境覆盖场景

在山区、海岛、边远地区及城市高楼密集区域等环境中,通信链路常面临传输距离过长、视距受限或地面设施部署困难等问题,系统需要具备跨障碍和远距离传输能力。UAV-FSO 通信在该场景中的主要作用是利用 UAV 平台构建中继节点或补盲节点,实现远距离数据回传和复杂环境下的覆盖增强^[48]。具体应用时,UAV 通常部署于源节点与目的节点之间,通过单中继或多跳 FSO 链路缩短单跳传输距离,改善传播条件,并完成跨山体、跨建筑物或跨复杂地形条件下的数据传输。该场景的核心在于“把原本难以连通的链路接起来”,其重点是中继部署、链路延伸和覆盖增强,主要面向边远区域回传、复杂地形补盲及跨障碍临时传输等任务。

4.4 高可靠保障与全天候保障场景

在重要任务通信、全天候应急保障、关键区域临时支撑及复杂空域稳健传输等场景中,业务往往对链路连续性和系统可靠性提出更高要求,单一 FSO

链路在雾霾、降雨、沙尘、强湍流及瞬时遮挡条件下容易出现性能退化甚至中断,因此难以独立满足长期稳定通信需求。UAV-FSO 通信在该场景中的主要作用是作为高速主链路或关键业务链路,与其他无线方式协同构建高可靠异构通信系统。具体应用时,UAV 平台通常同时配置 FSO 与 RF 通信模块,在链路条件良好时由 FSO 承担大容量业务传输,而在天气恶化、遮挡出现或对准失配导致光链路性能下降时,则由 RF 链路承担备份保障、通信维持或控制信令传输任务,从而实现业务不中断和系统可靠性提升^[49]。该场景的核心不在于快速恢复、空中组网或远距离补盲,而在于通过异构链路协同提升通信连续性和全天候适应能力,因此其应用重点集中在链路状态感知、自适应切换及异构资源协同等方面。

5 挑战与趋势

5.1 当前面临的主要挑战

当前核心挑战在于系统级协同优化不足与复杂环境下的物理验证缺失。现有工作多将高精度 PAT 子系统与通信链路分离设计,较少从全局统筹控制带宽、平台振动及时延对端到端性能的综合影响,缺乏统一的联合建模框架。多跳中继与光/RF 混合等增强型架构虽在理论上提升了系统鲁棒性,却也引入了链路频繁切换和空间资源调度等系统级难题。目前多数研究仍受限于理想化假设的理论推导与仿真,面向实际强湍流和机动遮挡等复杂动态环境的系统级物理验证严重匮乏,导致理论模型与 UAV 平台的工程实际存在显著脱节。

5.2 未来发展趋势与展望

UAV-FSO 通信系统的未来研究需要从单一链路的被动适应转向系统级综合效能的主动优化。转变的趋势之一是物理机理与数据驱动相融合的主动智能控制。在演进路径上,信道建模将从单一的解析表达式逐渐向结合物理先验与深度学习的混合模型发展;系统设计则逐步摒弃被动的抗扰动策略,依托环境感知与智能算法实现光束的主动预测与动态补偿。如何在系统可靠性、算法能耗与硬件复杂度之间实现最优平衡,将成为该技术工程落地的重要考量方向。

另一个核心趋势则是跨层协同与多维技术分支的深度融合。除了夯实物理层的信道与对准保障,未来的系统级演进还需在多个关键分支上协同发力:一是研发适应强非平稳信道的端到端自适应调

制与编码技术;二是突破适用于 UAV 高动态拓扑的多用户接入与灵活组网协议;三是推进低功耗、小型化光机电硬件攻关,以缓解 UAV 载荷受限的矛盾;四是应充分发挥 FSO 的天然抗截获特性,探索结合物理层加密的高等级安全保密机制。

6 结束语

本文系统梳理了 UAV-FSO 通信在系统框架与应用模式、信道特性与衰落建模以及 PAT 关键技术等方面的研究进展,总结了当前面临的挑战与未来发展趋势。总体来看,UAV-FSO 通信兼具高带宽、高保密性和灵活部署等优势,在应急保障、空中协同、远距离回传及高可靠通信等场景中展现出了重要应用潜力。但 UAV 平台高机动性、姿态扰动和复杂环境变化也使光链路呈现出显著的时变性、非平稳性和强耦合特征,这构成了系统设计与工程实现的核心难点。

UAV-FSO 通信技术经历了从“单一链路的静态理论验证”向“高动态立体组网的复杂系统探究”的深刻跨越。纵观其整体研究脉络,UAV-FSO 通信领域不仅极大拓宽了空天地海一体化通信的物理边界,更在克服大气湍流和平台抖动等经典难题上积累了丰富的理论基础。UAV-FSO 通信要实现从实验室走向大规模产业化应用,仍受制于严苛的尺寸、重量和功耗限制、全天候复杂环境下的单链路可靠性不足以及统一软硬件接口标准的缺失。为此,产业化破局需要依托光子集成电路等硬件技术的成熟来实现设备的轻量化与低成本量产,同时亦需产学研各界协同推进标准化工作,从而打通商业落地的现实壁垒。

UAV-FSO 通信未来的核心研究方向必须从被动适应转向主动优化。一方面,应依托物理先验与数据驱动相融合的主动智能控制,在算力能耗与硬件复杂度之间寻求最优平衡;另一方面,需持续深化跨层协同与多维技术融合,协同攻关端到端自适应调制、高动态接入协议及物理层高等级加密机制。UAV-FSO 通信的未来不仅是光通信技术的单一演进,更是光学、人工智能与航空网络深度交叉的系统工程,其突破将为构建泛在、宽带且安全的下一代三维空间信息网络提供不可替代的核心驱动力。

参考文献:

- [1] 陈新颖,盛敏,李博,等.面向6G的无人机通信综述[J].电子与信息学报,2022,44(3):781-789.

- Chen X Y, Sheng M, Li B, et al. Survey on Unmanned Aerial Vehicle Communications for 6G [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(3): 781–789.
- [2] Tumma Y, Kappala V K. A Review on Deployment of UAV-FSO System for High-Speed Communication[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 124915–124930.
- [3] Abbas F H, Khazaal W M, Elango B, et al. Relay Selection based Adaptive Temporal Routing to Improve Emergency Communication Systems in Multi-UAV Networks [C]//2025 11th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). Melmaruvathur, India: IEEE, 2025: 11089259.
- [4] 郭磊, 周伟煜, 吴廷伟, 等. 无线光通信安全技术发展与应用综述(特邀)[J]. *光学学报*, 2025, 45(13): 1306006.
- Guo L, Zhou W Y, Wu T W, et al. Review on Development and Application of Optical Wireless Communication Security Technology (Invited) [J]. *Acta Optica Sinica*, 2025, 45(13): 1306006.
- [5] 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.
- [6] Chow C W. Recent Advances and Future Perspectives in Optical Wireless Communication, Free Space Optical Communication and Sensing for 6G [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(11): 3972–3980.
- [7] Dabiri M T, Hasna M, Althunibat S, et al. UAV-based Dynamic FSO Access Networks: Technological Comparison, Design Considerations, and Future Directions[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2025, 32(2): 247–253.
- [8] Rodrigues Dias Filgueiras H, Saia Lima E, Seda Borsato Cunha M, et al. Wireless and Optical Convergent Access Technologies Toward 6G [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 9232–9259.
- [9] Singh D, Swaminathan R. Comprehensive Performance Analysis of Hovering UAV-based FSO Communication System [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(5): 7352013.
- [10] Shen B, Chen J, Xu G, et al. Performance Analysis of a Drone-Assisted FSO Communication System over Málaga Turbulence under AoA Fluctuations [J]. *Drones*, 2023, 7(6): 374.
- [11] Wondmagen A B, Lakew D S, Tran A T, et al. A Review on FSO/RF based Satellite-Aerial-Ground Communication Systems [C]//2024 International Conference on Information Networking (ICOIN). Ho Chi Minh City, Vietnam: IEEE, 2024: 10572075.
- [12] Elfikky A, Singh M, Boghdady A I, et al. Spatial Diversity-based FSO Links under Adverse Weather Conditions: Performance Analysis [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024, 56(5): 826.
- [13] Zeng Y, Zhang R, Lim T J. Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 36–42.
- [14] Trung H. Performance of UAV-to-Ground FSO Communications with APD and Pointing Errors [J]. *Applied System Innovation*, 2021, 4(3): 65.
- [15] Liu J, Luo H, Ruby R, et al. UAV-based Reliable Optical Wireless Communication via Cooperative Multi-Agent Reinforcement Learning Approach [C]//2023 IEEE 29th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS). Danzhou, China: IEEE, 2023: 10475959.
- [16] Xu F, Duo B, Xie Y, et al. Multi-UAV Assisted Mixed FSO/RF Communication Network for Urgent Tasks: Fairness Oriented Design with DRL [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025, 74(1): 1736–1741.
- [17] 邵龙, 李勇军, 李信, 等. 无人机FSO/RF混合中继链路传输速率优化方法 [J]. *应用光学*, 2023, 44(5): 1142–1152.
- Shao L, Li Y J, Li X, et al. FSO/RF Hybrid Link Transmission Rate Optimization Method through UAV Relay [J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(5): 1142–1152.
- [18] Song S, Liu Y, Wu J, et al. Demonstration of Intelligent Hybrid FSO/RF System based on Enhanced GRU Prediction and Real-World Meteorological Dataset [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(21): 7048–7059.
- [19] Li P, Wei X, Tang X, et al. UAV-Assisted Free Space Optical Communication System with Decode-and-Forward Relaying [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(10): 14102–14112.
- [20] Li X, Liu Y, Guo S, et al. Robust Joint Optimization for Efficient and Reliable FSO/RF Satellite-UAV-Terrestrial Networks with Random Fading and Imperfect Channel Information [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(21): 45307–45324.
- [21] Roshdy M M, El-Shazly E H, Mohamed E M, et al. Performance Analysis of UAV-based MMW/FSO Re-

- lay-Assisted System[C]//2023 International Telecommunications Conference (ITC - Egypt). Alexandria, Egypt:IEEE, 2023: 10206143.
- [22] Farid A A, Hranilovic S. Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links with Pointing Errors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(7): 1702–1710.
- [23] Moon H J, Chae C B, Wong K K, et al. A Generalized Pointing Error Model for FSO Links with Fixed-Wing UAVs for 6G: Analysis and Trajectory Optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(7): 5723–5737.
- [24] Roa C Á, Gültekin Y C, Wu K, et al. On Error Rate Approximations for FSO Systems with Weak Turbulence and Pointing Errors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2026, 32(1): 3800115.
- [25] Ibrahim A A, Ozgur Ata S, Durak-Ata L. Performance Analysis of FSO Systems over Imperfect Málaga Atmospheric Turbulence Channels with Pointing Errors[C]//2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP). Porto, Portugal:IEEE, 2020: 1–5.
- [26] Gupta A, Dhawan D, Gupta N. Review on UAV-based FSO Links: Recent Advances, Challenges, and Performance Metrics [J]. Optical Engineering, 2024, 63(4): 041204.
- [27] Hickson P. Atmospheric and Adaptive Optics[J]. The Astronomy and Astrophysics Review, 2014, 22: 76.
- [28] Zhang J, Che J, Feng B, et al. Research on Simulation Method of Atmospheric Turbulence Gamma-Gamma Distribution Light Intensity Flicker Sequence[C]//2025 4th International Symposium on Semiconductor and Electronic Technology (ISSET). Xi'an, China: IEEE, 2025: 11184955.
- [29] Wang J Y, Ma Y, Lu R R, et al. Hovering UAV-based FSO Communications: Channel Modelling, Performance Analysis, and Parameter Optimization [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(10): 2946–2959.
- [30] Sharma P, Swaminathan R, Singh D. Multi-Hop UAV-based FSO System over Doubly Inverted Gamma-Gamma Turbulence Channel [J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(10): 2313–2317.
- [31] Xu G, Yu X, Wang J, et al. Performance Analysis of Multi-UAV Optical Communication Systems over Foggy Channel under Málaga Turbulence and Pointing Error Impairments[J]. IEEE Photonics Journal, 2024, 16(6): 7303716.
- [32] Nguyen T V, Le H D, Pham A T. On the Design of RIS-UAV Relay-Assisted Hybrid FSO/RF Satellite-Aerial-Ground Integrated Network[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022: 59(2): 757–771.
- [33] Li X, Li Y, Zhang K, et al. Channel Modeling and PLS Performance Analysis of RIS-Assisted Multi-User Hybrid FSO/RF Systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(11): 3520–3524.
- [34] 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.
- [35] Chen W, Zhang M, Wang D, et al. Deep Learning-based Channel Modeling for Free Space Optical Communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(1): 183–198.
- [36] Tumma Y, Miriyala M. Deep Learning-based Pilot-Free Channel Estimation of UAV-FSO System Using Variational Auto-Encoder[J]. ICT Express, 2025, 11(6): 1162–1166.
- [37] Zhang W, Yu Z, Huang H, et al. Robust End-to-End FSO Transmission with Joint Coding Modulation and BiLSTM-based Channel Modeling under Atmospheric Turbulence [J]. IEEE Transactions on Communications, 2026, 74: 3478–3488.
- [38] Ryu J H, Chang Kim S, Ryoo J R, et al. Tracking Control for Free-Space Optical Communication of Unmanned Aerial Vehicle [C]//2018 IEEE 3rd International Conference on Communication and Information Systems (ICCIS). Singapore: IEEE, 2018: 8644959.
- [39] 陈加文, 孙凝, 刘建国. 一种提升单探测器复合跟踪中粗跟瞄子系统预测精度和稳定性的方法[J]. 半导体光电, 2024, 45(4): 658–661.
- Chen J W, Sun N, Liu J G. Method for Improving Prediction Accuracy and Stability in Coarse-Aiming Subsystem of Single-Detector Composite Tracking [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2024, 45(4): 658–661.
- [40] Guo X, Lin Y, Pang D, et al. Beam-Deviation Compensation of FSM *via* Beam-Tracing Modeling in Dynamic Optomechanical Systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2026, 38(6): 430–433.
- [41] Trinh P V, Carrasco-Casado A, Okura T, et al.

- Experimental Channel Statistics of Drone - to - Ground Retro - Reflected FSO Links with Fine - Tracking Systems[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 137148–137164.
- [42] Tian S S, Wang F Y, Wei T, et al. DRL-based Beam Tracking for Free - Space Optics in UAV - Ground Links: Deterministic or Stochastic Policy [C]//2025 37th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Xiamen, China;IEEE, 2025: 11091009.
- [43] Yu C, Zhuang Y, Zhao W. Review on Dynamic Alignment Challenges and Reinforcement Learning-based Solutions in UAV - FSO Communications [C]//2025 IEEE 25th International Conference on Communication Technology (ICCT). Shenyang, China; IEEE, 2025: 11374269.
- [44] 冯斯梦, 赵一迪, 董超, 等. 基于自由空间光的无人机通信网络关键技术与发展趋势[J]. *电子与信息学报*, 2024, 46(6): 2311–2322.
- Feng S M, Zhao Y D, Dong C, et al. Key Technologies and Development Trends of Free Space Optical UAV Communication Network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024, 46(6): 2311–2322.
- [45] Al-Allaq Z J, Shakir W M R, Charafeddine J. A Comprehensive Review of Cutting-Edge Disaster Response: UAVs Equipped with FSO-based Communications[J]. *Wireless Personal Communications*, 2025, 141(1–2): 329–394.
- [46] Petkovic M, Narandzic M. Overview of UAV based Free - Space Optical Communication Systems [C]//International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019: 270–277.
- [47] Mazher W J, Ibrahim H T, Ucan O N, et al. Drone Swarm with Free-Space Optical Communication to Detect and Make Deep Decisions about Physical Problems for Area Surveillance [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(3): 306116.
- [48] Nzekwu N J, Fernandes M A, Fernandes G M, et al. A Comprehensive Review of UAV - Assisted FSO Relay Systems[J]. *Photonics*, 2024, 11(3): 274.
- [49] Wu Y, Kong D, Wang Q, et al. Performance Analysis of UAV - Assisted Hybrid FSO/RF Communication Systems under Various Weather Conditions [J]. *Sensors*, 2023, 23(17): 7638.