

基于自由空间光的无人机通信研究进展及展望

吴旭阳, 王建萍*, 陈丹阳, 金建力, 路慧敏

(北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083)

摘要: 无人机因其灵活性高、机动性强, 在军事和民用领域应用广泛。基于射频的通信方式面临频谱资源有限和干扰问题, 自由空间光通信作为替代方案应用到无人机通信, 具有高带宽、高速率、强抗干扰能力和高安全性等优势。然而, 自由空间光通信易受大气环境影响, 且无人机的高移动性和机载资源有限等因素给其带来诸多挑战。本文概述了基于自由空间光的无人机通信架构、特点和信道特征, 介绍了多输入多输出、自由空间光和射频异构融合、中继通信/任务缓存、智能反射面等关键技术及最新进展, 探讨了环境适应性、高精度定位、能量效率、网络架构与安全性等方面的挑战, 并对自适应光束控制、多模态传感融合、能源高效硬件创新、混合通信架构与量子安全等未来发展方向进行了展望, 为自由空间光在无人机通信领域的创新应用提供参考。

关键词: 无人机; 自由空间光; 通信架构; 信道特征; 中继通信

基金项目: 国家自然科学基金(No.62401039, No.62374015)

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2025)08-3026-21

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20241080

Research Progress and Future Prospects of Free-Space Optical Communication for UAVs

WU Xu-yang, WANG Jian-ping*, CHEN Dan-yang, JIN Jian-li, LU Hui-min

(School of Computer & Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicles (UAVs) are extensively utilized in both military and civilian domains due to their high flexibility and mobility. However, radio-frequency (RF) communication faces challenges such as limited spectrum resources and interference. As a promising alternative, free-space optical (FSO) communication offers significant advantages, including high bandwidth, fast data rates, strong resistance to interference, and enhanced security. Nevertheless, FSO communication is highly sensitive to atmospheric conditions, and the high mobility of UAVs, coupled with limited on-board resources, introduces several operational challenges. This paper provides an overview of the FSO-based UAVs communication architecture, its characteristics, and the underlying channel dynamics. It discusses key technologies and recent advancements, including multiple-input multiple-output (MIMO), hybrid RF-FSO integration, relay communication/mission caching, and intelligent reflecting surfaces (IRS). The challenges related to environmental adaptability, precise positioning, energy efficiency, network architecture, and security are thoroughly examined. Furthermore, the paper explores future research directions, such as adaptive beam control, multi-modal sensor fusion, energy-efficient hardware innovations, hybrid communication architectures, and quantum security. This study aims to offer insights into the innovative applications of FSO communication for UAVs.

Key words: unmanned aerial vehicles; free-space optical; communication architecture; channel characteristics; relay communication

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.62401039, No.62374015)

1 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAVs)具备高

度的灵活性与可控的机动性, 在动态部署和灵活重构方面具有显著优势, 军事及民用领域均有着广阔的应

用前景,备受学术界与工业界的关注^[1-5]。当前,无人机通信大多基于射频技术^[6]。射频(Radio Frequency, RF)通信是以 30 kHz 至 300 GHz 频段的电磁波作为载波,运用幅度调制、频率调制、相位调制等技术,将数字或模拟信号加载于射频载波之上,经发射天线辐射传输^[7]。接收端通过天线捕获射频信号,再经滤波、下变频、解调等一系列信号处理过程,最终还原出原始数据的无线通信技术,具备传输距离远、环境适应性强等特性,在众多领域得到广泛应用^[8]。然而,射频频谱资源有限,再加上数据密集型应用程序以及海量物联网设备的接入,不同通信系统在频带内共存,导致有限的带宽难以满足日益增长的频谱需求,进而引发射频频谱资源的拥挤与争夺,使得通信速率和质量难以得到保障^[9-12]。此外,复杂电磁环境中,会造成数据传输错误甚至链路中断,射频信号开放式传输特性,使其极易遭受非法窃听与恶意篡改,威胁通信安全^[13]。同时,建筑物遮挡、恶劣天气等因素会导致信号严重衰减,产生多径效应与码间干扰,使得无人机在复杂环境下的通信链路稳定性大幅下降^[14]。针对上述问题,自由空间光通信(Free-Space Optical, FSO)被视作可行的解决方案被应用到无人机通信中。与基于射频的无人机通信链路相比,FSO 通信具有更高的带宽和数据传输速率,不受频谱限制,并且 FSO 通信抗干扰能力强,具有较高的安全性^[15-18]。因此,基于 FSO 的无人机通信网络被广泛认为是一种具有高带宽、低延迟和高可靠性的新型通信方式。

因 FSO 通信所具有的显著优势,基于 FSO 的 UAV 通信链路可迅速构建,即便处于无线电频谱拥塞情境,仍能提供高速率、高带宽的通信服务,在军事、应急救援、环境监测、农业等领域具备应用潜力^[19,20]。在军事领域,UAV 装配 FSO 设备可执行军事侦察、目标定位与追踪作业。在山区、丛林等复杂地形区域或存在电磁干扰之处,基于 FSO 的 UAV 可作为空中通信中继平台,有效确保通信的稳定性与可靠性^[21-23]。在应急救援方面,当自然灾害致使地面通信基础设施损毁时,基于 FSO 的 UAV 能够作为临时通信基站,助力通信基础设施受损地区快速恢复通信连接^[24-26]。在环境监测领域,基于 FSO 的 UAV 可携带二氧化硫、二氧化氮、颗粒物等多种大气监测传感器以及污染物监测装置,并通过 FSO 通信将数据实时传输至地面环境监测站^[27-29]。在农业领域,UAV 可凭借 FSO 通信技术搭载多光谱或高光谱成像仪对农田予以监测,进而获取作物株高、叶面积指数、叶绿素含量、养分状况等生长信息。这些数据对精准农业极为关键,农户可依此精确实施灌溉、施肥、病虫害防治等操作,提升农作物的产量与品质^[30-32]。

然而,FSO 基于视距链路传输,在通信时需确保发

射端与接收端间无障碍物遮挡,否则通信质量将严重受损。其通信质量还极易受大气湍流、大气衰减等复杂信道条件的影响^[33-35]。大气湍流致使光信号传输时产生散射与闪烁,令信号强度起伏不定,使接收端难以稳定接收清晰信号^[36-38]。大气衰减则因大气中的水汽、尘埃等成分对光信号的吸收与散射,导致信号在传输中逐渐变弱。同时,无人机的高移动性使 FSO 链路两端难以持续维持稳定对准状态,无人机快速飞行或实施复杂动作时,光通信链路易因角度偏差而中断^[39-41]。此外,无人机机载资源有限,包括计算能力与存储空间等方面,这要求 FSO 通信系统具备高效能源管理与数据处理能力,在有限资源条件下达成稳定通信^[42-44]。无人机所处环境瞬息万变,可能遭遇不同天气状况、电磁干扰等情形,这些均加大了维持 FSO 通信链路稳定性的难度。因此,要实现基于 FSO 的 UAV 通信的稳定可靠,需攻克诸多技术难题。

综上所述,本文对基于自由空间光的无人机通信架构、特性以及信道特征进行概述,同时介绍了多输入多输出、自由空间光与射频异构融合、中继通信/任务缓存、智能反射面等关键技术及其最新进展情况。此外,深入探讨了基于 FSO 的 UAV 在环境适应性、高精度定位、能量效率、网络架构及安全性等方面所面临的诸多挑战,并对自适应光束控制、多模态传感融合、能源高效硬件创新、混合通信架构与量子安全等进行展望,旨在为自由空间光在无人机通信领域的创新应用提供有益参考。

2 基于 FSO 的 UAV 通信概述

2.1 基于 FSO 的 UAV 通信架构

FSO 是一种基于视距的技术,其工作原理类似于光纤通信^[45]。它通过激光二极管发射高速明暗闪烁的信号来承载信息,主要区别在于光纤通信使用光纤作为传输介质,而 FSO 通信的激光信号在大气或真空中传播^[46,47]。作为空天地一体化网络的重要组成部分,基于 FSO 的无人机通信网络在其中起着承上启下的作用。根据信源和信宿节点类型的不同,FSO-UAV 通信可以划分为无人机-无人机通信(UAV-to-UAV, U2U)、无人机-地面通信(UAV-to-Ground, U2G)和地面-无人机通信(Ground-to-UAV, G2U)^[48-52]。典型的 FSO-UAV 部署场景如图 1 所示,广泛应用于通信覆盖扩展、灾害管理等领域。

基于 FSO 的 UAV 通信网络由发射端、大气信道和接收端三部分组成^[53-55]。发射端包括激光二极管、调制器、光学发射天线及无人机飞行平台等相关组件^[56]。激光二极管生成光信号,经过调制器加载电信号后,通过天线发射;无人机平台为激光系统提供支撑与协同,完

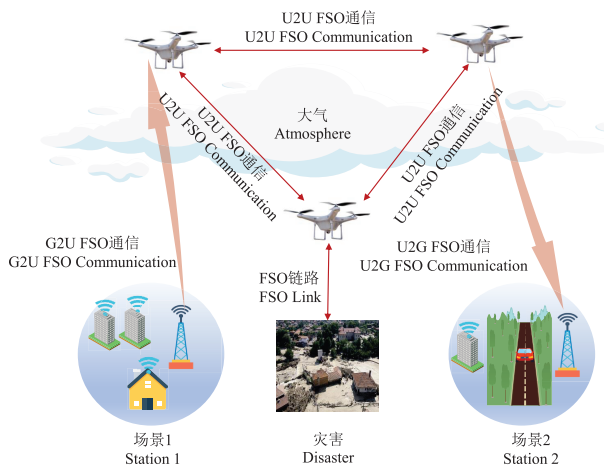


图1 典型基于FSO的UAV应用场景

成电信号到光信号的转换与发射^[57]。大气信道由气体分子和气溶胶粒子组成,这些成分通过分子吸收、粒子散射及湍流效应对信号传播产生影响,导致信号衰减与干扰^[58]。接收端包括光学接收天线、光电探测器、解调器、信号处理器及地面控制站等相关组件,负责接收光信号并进行转换、解调与处理,进而获取并处理无人机传输的数据,同时与无人机进行交互,完成通信任务^[59]。在整个通信链路中,发射端发起信号传输,大气信道承载信号传播,接收端完成信号接收与处理,共同实现FSO的无人机通信功能。

2.2 基于FSO的UAV通信特点

基于FSO的UAV通信具有天然的互补性,能够实现高质量的视距通信。FSO技术利用光信号的直线传播,提供高带宽、抗电磁干扰的高速链路,然而,它对链路视距和设备对准要求极高,并且易受大气湍流等环境因素干扰,导致光信号畸变、闪烁和漂移,进而显著影响通信性能和链路稳定性^[60-62]。传统地面基站的布设受到地形、建筑物和行政区域限制,难以灵活调整位置,无法保证稳定的视距连接^[63]。相比之下,无人机作为空中平台,可以灵活部署、避开地面障碍,实现动态调整 and 自适应连接,确保链路稳定畅通。凭借这一优势,基于无人机的FSO链路能够显著缓解对准问题,尤其在复杂地形或远程区域中,仍能维持较高的通信质量。

此外,UAV可根据实际通信需求灵活调整位置,为多个用户提供不同区域的覆盖,克服地面基站固定布设的局限性。其自适应部署特性使得UAV能够迅速响应环境变化。基于UAV的FSO通信网络结合了FSO的高带宽、高抗干扰性与UAV的灵活部署和广覆盖优势,构建了一种动态、可靠且高效的通信方式,能够满足6G网络对超高速率、超低时延和海量连接的需求^[64-66]。同时,这种融合空中平台的通信模式能够大幅扩展传统

通信网络的覆盖范围和服务质量,特别适用于偏远地区的通信保障、应急通信恢复以及高安全性需求场景,展现出巨大的应用潜力^[67]。基于FSO的UAV通信网络,融合了FSO通信与UAV网络的优势,具有以下特点。

(1) 高带宽与高速率

FSO通信系统以光波为传输媒介,频谱资源远高于传统无线电频段,可实现高达Gbit/s乃至Tbit/s级的数据传输速率。这种高带宽特性能够满足无人机对大容量数据实时传输的需求,尤其适用于图像、视频及高精度传感数据的传输场景。

(2) 强抗干扰能力与高安全性

FSO信号具有较强的方向性和窄波束特点,不易受到其他信号源干扰,且难以被拦截或窃听。在军事和保密通信等场景中,能够保障数据传输的隐私性和安全性。

(3) 抗多径和抗散射衰减

与射频信号相比,FSO信号的窄波束特性使其在传输过程中几乎不受多径效应和散射问题的影响。因此,FSO通信在城市密集区域、山地等复杂环境中能够提供更稳定的传输性能,有效避免了常见的信号衰落问题。

(4) 轻量化与低功耗

FSO通信模块通常体积小、功耗低,非常适合无人机搭载使用。考虑到无人机的续航时间和负载能力有限,FSO系统的轻量化和低功耗设计不仅能减轻飞行负担,还能延长任务执行时间。

(5) 适合多跳网络和蜂窝结构

FSO支持点对点通信,并可通过多无人机中继或蜂窝结构扩展网络,实现广泛的通信覆盖。在灾害救援或战场环境中,借助多无人机协同通信,可迅速搭建临时通信网络,提供高效的数据中继和传输。

2.3 基于FSO的UAV通信信道特征

2.3.1 大气衰减

大气信道中存在气溶胶、灰尘、烟雾等悬浮颗粒以及各种气体,同时也会受到雨、雪、雾等天气条件的影响。这些因素导致光束在传播过程中发生吸收与散射,进而引起光信号衰减和传输功率降低,这一现象被称为大气衰减^[68-70]。大气吸收与波长密切相关,具有最小吸收系数的波长范围被定义为大气传播窗口,大多数FSO通信系统的设计针对的是780~850 nm和1 520~1 600 nm的窗口。在晴朗天气条件下,一些典型分子的吸收系数如表1所示。

大气散射会导致光束传播方向偏离,削弱原本传输方向的能量,散射过程取决于传播中粒子的半径大小^[71]。当粒子半径小于波长时,散射属于瑞利散射;当粒子半径与波长相近时,为米氏散射;当粒子半径大于

波长时,则需通过几何光学的衍射理论解释^[72-74]. 光信道中各类大气颗粒的尺寸及相应的散射机制如表 2 所示.

表 1 分子吸收系数

波长/nm	分子吸收系数/(dB·km ⁻¹)
550	0.13
690	0.01
850	0.41
1 550	0.01

表 2 大气粒子散射过程

类型	半径/μm	散射过程
空气分子	0.000 1	瑞利
雾霾粒子	0.01~1.00	瑞利-米氏
雾滴	1~20	三重几何
雨	100~10 000	几何
雪	1 000~5 000	几何
冰雹	5 000~50 000	几何

大气衰减通常用比尔-朗伯定律来建模,公式如下:

$$h_a = \Delta \exp(-\alpha_v Z) \quad (1)$$

其中, $\Delta = \frac{(2a)^2}{(2w_z)^2}$, a 为接收机孔半径, w_z 为波束宽度, α_v 为大气衰减系数, Z 为链路长度. 在米氏散射模型下, 大气衰减因子为^[75]

$$\alpha_v = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550 \text{ nm}} \right)^{-\delta} \quad (2)$$

其中, V 为可见范围, 单位为 km; 550 nm 为可见范围参考波长, λ 为工作波长, 单位为 nm; δ 为与尺寸分布有关的散射系数. 散射系数的值可以用 Kim 模型或 Kruse 模型来确定对于大衰减, 首选 Kim 模型, 表达如下^[76]:

$$\delta = \begin{cases} 1.6, & V > 50 \\ 1.3, & 6 < V < 50 \\ 0.16V + 0.34, & 1 < V < 6 \\ V - 0.5, & 0.5 < V < 1 \\ 0, & V < 0.5 \end{cases} \quad (3)$$

2.3.2 大气湍流

大气湍流源于大气中不同层次气体因温度、湿度和压力变化而产生的不稳定气流^[77-79]. 这种不均匀的流动导致折射率波动, 从而影响光束传播. 在晴朗天气下, 尽管大气衰减对 FSO 通信的影响较小, 但大气湍流引起的光学效应仍然显著. 湍流会导致光束的幅度和相位发生变化, 进而影响通信质量. 根据湍流漩涡的尺度与光束尺寸的关系, 可将大气湍流效应分为 3 种类型, 如表 3 所示: 当漩涡尺寸大于光束直径时, 光束会发生漂移, 造成指向误差; 当漩涡尺寸与光束直径相当时, 光束会受到聚焦效应影响, 产生强度波动并形成光束闪烁; 当漩涡尺度小于光束尺寸时, 光束会发生部分

衍射和散射, 导致接收功率密度下降并引起波前扭曲, 这种现象称为光束扩散. 这些效应共同影响 FSO 系统的信号稳定性和传输质量.

表 3 大气湍流类型

类型	特点
光束漂移	随机、低频、具有一定幅度变化
光束闪烁	高频、强度起伏、不规则
光束扩散	渐进、弥散、角度扩展

大气湍流效应可以看作一个随机过程, 对其进行理论分析时可采用数学中的统计分析, 该理论由 Kolmogorov 提出^[80,81]. 根据该理论分析可以使用无量纲的 Rytov 方差表示:

$$\chi = 1.23 C_n^2 k^7 L^{11/6} \quad (4)$$

其中, C_n^2 为折射率结构常数, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, L 表示传输距离. 折射率结构常数常用于衡量大气湍流程度, 在不同的气候和环境下, C_n^2 会发生变化, 其中海拔高度对其影响巨大, 相关文献中给出了 C_n^2 随着海拔高度的变化所得的统计模型, 主要是 Hufgael 模型和 Hufnagel-Valley 模型^[82].

常见的大气湍流模型包括对数正态分布模型、Gamma-Gamma 分布模型和 Malaga 分布模型^[83,84]. 对数正态分布模型适用于较弱的湍流强度, Gamma-Gamma 分布模型适用于中度湍流, 而 Malaga 分布模型则更适合强湍流条件下的光信号分析, 能够有效捕捉强度波动及变化的复杂特性. 下面详细介绍不同大气湍流模型.

(1) 对数正态分布模型

对数正态分布模型是早期提出并广泛应用于弱湍流条件下的经典模型, 适用于天气较好、海拔不高的环境. 该模型一般服从 $(0, 2\delta^2)$ 正态分布, 适合分析仅具有正值的光信号. 对数正态分布能够有效描述光信号在传播过程中因环境变化引起的随机波动, 尤其是在大气湍流影响下. 通过该模型, 可进行误码率分析、信号传播模拟以及光通信系统性能评估, 为通信链路的设计和优化提供理论依据. 其概率密度函数表达式为^[85]

$$f_{h_t}(h_t) = \frac{1}{2h_t \sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{(\ln h_t + 2\sigma_x^2)^2}{8\sigma_x^2}\right) \quad (5)$$

其中, σ_x^2 是对数振幅方差, 与 Rytov 方差的关系为

$$\sigma_x^2 = \frac{\sigma_R^2}{4} = 0.31 C_n^2 k^7 L^{11/6} \quad (6)$$

(2) Gamma-Gamma 分布模型

Gamma-Gamma 分布模型广泛应用于模拟由湍流引起的信号衰落特性. 该模型基于 2 个独立的 Gamma 分布随机变量, 分别用于描述大气湍流导致的信道衰

落和接收信号的光强变化^[86]. 模型假设接收信号强度服从 Gamma 分布, 且各分布参数与大气湍流强度和信号传播路径密切相关. 该模型能够精确描述复杂湍流环境下的信道衰落特性, 特别是在高频通信系统中, 湍流效应对信号的影响尤为显著. 通过引入 2 个独立的 Gamma 分布, Gamma-Gamma 模型能够有效表征信号的多种传播损耗效应, 因而在无线通信、光通信等领域具有较高的准确性和实用性. Gamma-Gamma 模型是基于 FSO 系统的有效解决方案, 其概率密度函数为^[87]

$$f_{h_i}(h_i) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} h_i^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} k_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}h_i) \quad (7)$$

式中, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数, $k_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 表示第二类修正贝塞尔函数, α 和 β 分别表示大尺度衰落和小尺度衰落, 它们取决于接收器的孔径直径, 具体表达式为

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma_R^2}{(1+1.11\sigma_R^{\frac{12}{5}})^{\frac{7}{6}}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.51\sigma_R^2}{(1+0.69\sigma_R^{\frac{12}{5}})^{\frac{7}{6}}}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (9)$$

(3) Malaga 分布模型

Malaga 分布模型广泛应用于光通信系统, 特别是在 FSO 和卫星通信等高频信号传播场景中. 该模型基于大气湍流的物理特性及传输环境, 采用复合分布方式表征由湍流引起的信号衰落过程. Malaga 模型考虑了 3 种主要成分: 视距传输分量 U_L 、与视距传输分量耦合的传播轴上涡流准前向散射分量 U_S^C 、离轴涡流散射分量 U_S^C . 该模型能够同时描述信号的振幅衰减和相位干扰, 适用于不同湍流环境下的信号传播特性, 包括弱湍流和强湍流条件. 其概率密度函数为^[88]

$$f_{h_i}(h_i) = \chi \sum_{k=1}^{\beta} a_m h_i^{\frac{\alpha+m}{2}-1} k_{\alpha-m}\left(2\sqrt{\frac{\alpha\beta h_i}{g\beta + \Omega'}}\right) \quad (10)$$

其中, α 表示散射过程中大涡流的数量, $\beta > 0$ 是衰减参数, $k_{\alpha-m}(\cdot)$ 表示第二类修正贝塞尔函数, 其他参数表示如下:

$$\chi = \frac{2\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{g^{1+\frac{\alpha}{2}}\Gamma(\alpha)} \left(\frac{g\beta}{g\beta + \Omega'}\right)^{\beta+\frac{\alpha}{2}}, g = 2b_0(1-\rho) \quad (11)$$

$$a_m = \left(\frac{\beta-1}{m-1}\right) \frac{(g\beta + \Omega')^{1-\frac{m}{2}}}{(m-1)!} \left(\frac{\Omega'}{g}\right)^{m-1} \left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^{\frac{m}{2}} \quad (12)$$

$$\Omega' = \Omega + 2\rho b_0 + 2\sqrt{2b_0\rho\Omega} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (13)$$

式中, b_0 是总散射分量平均功率的一半, $\rho (0 \leq \rho \leq 1)$ 表示耦合到视距分量的散射功率量, 参数 ρ 随着湍流强度的

减小而增加. Ω 是视线的平均功率分量, ϕ_1 和 ϕ_2 是 U_L 耦合到 U_S^C 的固定相位.

2.3.3 指向误差

光束指向精度是影响系统性能的关键因素之一. 由于发射端与接收端无法完美对准, 以及建筑物振动引起的光束偏移, 会导致指向误差^[89]. 当指向误差达到一定程度时, 可能引发显著的信号衰减, 严重影响系统性能. 指向误差的来源主要包括收发端固定误差, 以及环境因素和无人机平台自身振动引起的随机误差^[90].

由于指向误差具有随机性, 因此对它进行准确的建模非常重要. 如图 2 所示, 在接收端有一个圆形的探测孔径, 其半径为 a , 则光束光斑中心到探测器中心的瞬时径向位移向量 \mathbf{r}_d 为

$$\mathbf{r}_d = [x_d, y_d] \quad (14)$$

其中, x_d 为探测器平面上水平的位移, y_d 为探测器平面上垂直的位移.

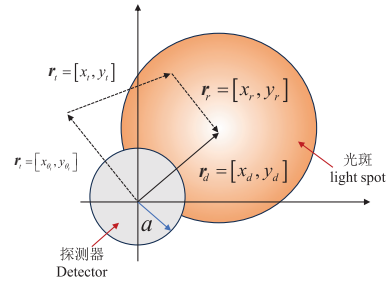


图 2 接收机与光路偏差

瞬时径向位移向量 \mathbf{r}_d 由 3 种不同的误差矢量决定, 分别是发射端的位置偏差所引起的位移矢量 $\mathbf{r}_t = [x_t, y_t]$ 、接收端的位置偏差所引起的位移矢量 $\mathbf{r}_r = [x_r, y_r]$ 和发射端的方向偏差所引起的位移矢量 $\mathbf{r}_{\theta} = [x_{\theta}, y_{\theta}]$, 假设 θ_{ix} 和 θ_{iy} 足够小, 则 x_{θ} 和 y_{θ} 可以表示为

$$\begin{aligned} x_{\theta} &= Z \tan \theta_{ix} \approx Z\theta_{ix} \\ y_{\theta} &= Z \tan \theta_{iy} \approx Z\theta_{iy} \end{aligned} \quad (15)$$

则 x_d 和 y_d 可以进一步表示为

$$\begin{aligned} x_d &= x_r + x_t + x_{\theta} = x_r + x_t + Z\theta_{ix} \\ y_d &= y_r + y_t + y_{\theta} = y_r + y_t + Z\theta_{iy} \end{aligned} \quad (16)$$

在大量随机事件的作用下, 链路两端的位置和方向会发生偏移. 根据中心极限定理, 这些偏移量可视为服从高斯分布. 具体而言, UAV 端的位置偏差建模为均值为 0、方差为 $\sigma_{p,u}^2$ 的高斯变量, 方向偏差则为均值为 0、方差为 σ_o^2 的高斯变量. 对于地面端, 位置偏差同样服从均值为 0、方差为 $\sigma_{p,u}^2$ 的高斯分布, 而方向偏差通常较小, 可忽略不计.

假设式(16)的随机变量相互独立, 则总径向位移

为 $r_{tr} = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$, 服从瑞利分布, 即

$$f_{r_{tr}}(r_{tr}) = \frac{r_{tr}}{\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{r_{tr}}{2\sigma_s^2}\right), r_{tr} \geq 0 \quad (17)$$

其中, 不同的链路方差 σ_s^2 可以表示为

$$\sigma_s^2 = \begin{cases} \sigma_{p,g}^2 + \sigma_{p,u}^2, & \text{G2U} \\ \sigma_{p,u}^2 + Z^2\sigma_o^2, & \text{U2U} \\ \sigma_{p,g}^2 + \sigma_{p,u}^2 + Z^2\sigma_o^2, & \text{U2G} \end{cases} \quad (18)$$

因为指向误差造成的功率衰减 h^p 的概率密度函数可表示为

$$f_{h^p}(h^p) = \frac{\zeta}{A^{\zeta^2}} (h^p)^{\zeta^2-1}, 0 \leq h^p \leq A \quad (19)$$

其中, $\zeta^2 = \frac{\omega_{z_{eq}}^2}{4\sigma_s^2}$, $A = [\text{erf}(v)]$, $v = \frac{\sqrt{\pi} a}{\sqrt{2} \omega_z}$, $\omega_{z_{eq}}^2 =$

$\frac{\omega_z^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}$ 为等效光束半径, ω_z 为距离 Z 处的束腰半径, $\text{erf}(\cdot)$ 为误差函数.

2.3.4 到达角抖动

对于基于 FSO 的 UAV 通信链路, 到达角抖动是区别于传统 FSO 通信的重要因素. 具体而言, 到达角是光信号相对于接收孔径平面的入射角, 而到达角波动则反映了信号入射角度的随机变化. 与地面通信系统不同, UAV 在大气中飞行受到多种自然环境因素的影响, 导致光信号传输过程中出现更为剧烈的随机抖动, 这可能导致信号丢失或在接收器处产生入射角变化, 如图 3 所示. 到达角波动与指向误差均属于对准误差, 但二者表现形式不同: 指向误差通常表现为光束在接收机上的漂移, 而到达角波动则表现为接收器焦平面上的光斑运动或图像晃动^[91].

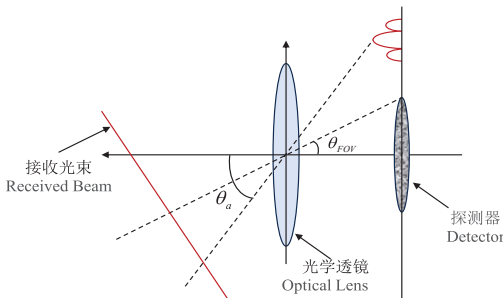


图3 到达角抖动对光束的影响

到达角抖动的数学模型可以使用概率模型来描述环境中的不同信号传播路径和相关的角度波动. 根据信道链路的不同, 可以定义信号的到达角为:

$$\theta_a = \begin{cases} \sqrt{\theta_{rx}^2 + \theta_{ry}^2}, & \text{G2U} \\ \sqrt{(\theta_{tx}^2 + \theta_{rx}^2) + (\theta_{ty}^2 + \theta_{ry}^2)}, & \text{U2U} \\ \sqrt{\theta_{tx}^2 + \theta_{ty}^2}, & \text{U2G} \end{cases} \quad (20)$$

其中, θ_{rx} 和 θ_{ry} 分别是发射端水平方向和垂直方向上的方向偏差, θ_{tx} 和 θ_{ty} 分别是接收端水平方向和垂直方向上的方向偏差. θ_a 服从瑞利分布, 其概率密度函数表达式为

$$f_{\theta_a}(\theta_a) = \frac{\theta_a}{m\sigma_o^2} \exp\left(-\frac{\theta_a}{2m\sigma_o^2}\right), \theta_a \geq 0 \quad (21)$$

其中, 当链路为 G2U 链路或者 U2G 链路时, $m=1$, 当链路为 U2U 链路时, $m=2$. 当光束 θ_a 在接收机的视场角之外时, 发射机和接收机之间的链路就会中断, 因此, h_{aoa} 可以表示为

$$h_{aoa} = \begin{cases} 1, & \theta_a \leq \theta_{FOV} \\ 0, & \theta_a > \theta_{FOV} \end{cases} \quad (22)$$

θ_{FOV} 为接收机的视场角, 根据式 (21) 和式 (22), 可以得出 h_{aoa} 的概率密度函数表达式为

$$f_{h_{aoa}}(h_{aoa}) = \exp\left(-\frac{\theta_{FOV}}{2m\sigma_o^2}\right) \delta(h_{aoa}) + \left[1 - \exp\left(-\frac{\theta_{FOV}}{2m\sigma_o^2}\right)\right] \delta(h_{aoa} - 1) \quad (23)$$

其中, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数.

3 基于 FSO 的 UAV 通信研究进展及应用

3.1 关键技术研究进展

3.1.1 多输入多输出

多输入多输出 (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 技术作为一种空间多样性技术, 已广泛应用于无线通信领域. 通过在系统中部署多个天线实现数据的并行传输, MIMO 技术显著提升了通信系统的容量和可靠性. 在 FSO 系统中, MIMO 技术的应用与射频通信系统类似. 发射端使用多个光学孔径, 接收端采用多个光电探测器, 通过空间复用有效缓解湍流引起的衰落效应. 特别在视距链路受到障碍物遮挡的情况下, MIMO 技术能减少信号中断对系统性能负面影响. 此外, 地面基站配置多个光源阵列可以实现从多个空间角度同时向空中传输光信号. 每个光源对应一个特定的传输角度, 使得阵列能够并行向多个 UAV 传输数据, 提升链路可靠性^[92]. 通过在中央单元选择适当的发射孔径, 还可以进一步优化接收端的信号质量, 从而最大化系统性能.

Mahmood 等^[93] 提出了一种 UAV 辅助的多用户大规模 MIMO 系统, 如图 4 所示. 通过优化混合波束成形、无人机定位和功率分配, 最大化系统总速率. 采用基于几何的毫米波信道模型, 提出了 3 种优化方案, 并结合深度学习设计了低复杂度的联合优化算法. 实验结果表明, 在发射功率 $P_T=40$ dBm 时, 最优方案 J-HBF-PSOLPA 的总可达速率分别提高 200%, 如图 5(a) 所示; 图 5(b) 和 (c) 分别为平均延迟与发射功率、队列大小的

关系以及不同用户数量的 HBF 解决方案运行时间的比较,由图可知,J-HBF-PSOLPA 在降低平均延迟方面效果显著,且 J-HBF-DLLPA 算法运行时间大幅减少,适用于实时物联网应用。

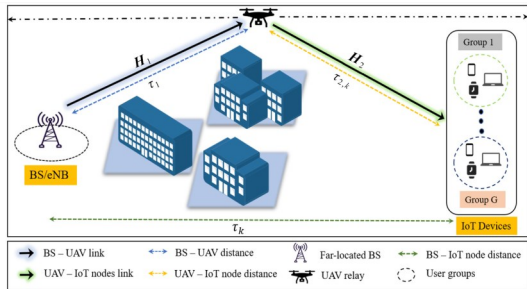
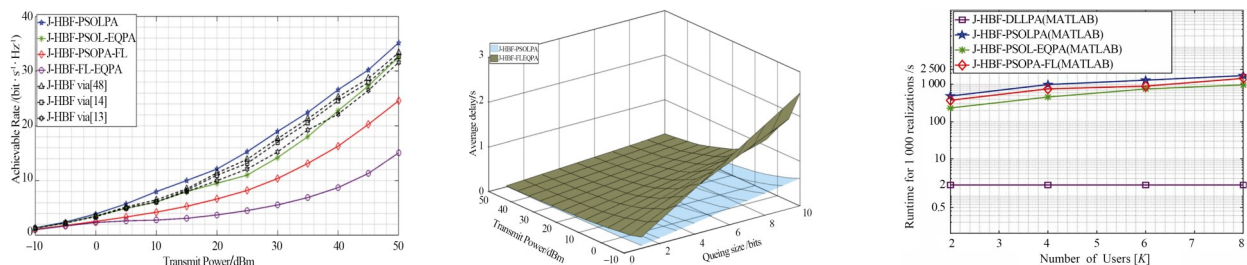


图4 UAV辅助的多用户大规模MIMO系统模型^[93]

Tran 等^[94]提出了一种创新的 CF-mMIMO 架构,将低地球轨道卫星与无人机集成为飞行接入点,致力于提升地面用户的上行链路频谱效率. 研究推导了卫星、无人机和地面用户间的信道表达式,运用 TDD 技术保障通信有序. 通过提出动态集群框架,依据距离和信号强度等动态分配 FAP 服务对象,有效减少用户干扰. 构建的 FAP 轨迹和能量管理模型,能优化轨迹降低能耗. 在功率控制上,通过推导 MMF 功率控制问题的闭式解实现公平的频谱效率分配,并结合 LSF 技术降低计算复杂度,提升 GU 频谱效率. 仿真实验在 4 km×4 km 农村区域展开,部署 80 个 FAP 和 50~65 个 GUs,结果表明该方法在频谱效率和能量消耗等方面显著优于传统配置,为

未来空中通信系统提供思路. Zedini 等^[95]研究了 MIMO 自由空间光通信系统的性能,涵盖了倾斜路径和水平链路的各种配置,包括地对高空平台系统(High Altitude Platform System, HAPS)、HAPS 对地以及 HAPS 到 HAPS 链路. 通过 Gamma-Gamma、Hoyt 和 Rayleigh 分布模拟大气湍流、指向误差损伤和到达角波动,推导了端到端信噪比的概率密度函数,并提出了 UAV 中断概率、开关键控调制的平均误码率等基本性能指标的新结果. 研究表明,MIMO 配置显著提升了 FSO 通信链路的性能,蒙特卡洛验证了分析结果的可靠性. Zhou 等^[96]提出了一种基于张量序列分解的毫米波大规模 MIMO/FSO 混合波束形成方法,以解决 UAV 抖动引起的指向误差和波束错位问题. 该方法结合可重构智能表面,优化了无人机辅助毫米波 MIMO/FSO 系统的频谱效率. 首先,通过张量分解将高维通道表示为低维通道,利用神经网络解决 FSO 指向误差问题,并估计衰落信道和多普勒频移. 最后,通过奇异值分解优化可重构智能表面相移矩阵,采用低复杂度相位提取方法提高波束对准精度. 仿真结果表明在不同信噪比下,基于 BiGRU-Attention 神经网络的无人机双跳 FSO 系统平均传输速率最高,如图 6(a) 所示;图 6(b) 为 4 种方法的误码率对比,在 25 dB 信噪比时,BiGRU-Attention 模型平均误码率最低,表明其能更好应对无人机抖动影响,且所有方法误码率均随信噪比增加而降低;图 6(c) 为不同方法下中断概率与信噪比的关系,在 20 dB 信噪比时,BiGRU-Attention 模型中断概率最低,说明该模型可减少通信中断,增强系统稳定性.



(a) 不同算法方案下总可达速率随发射功率的变化 (b) 平均延迟发射功率和缓冲队列大小的变化 (c) 不同用户数量的 HBF 解决方案运行时比较

图5 相关实验结果^[93]

3.1.2 FSO/RF 异构融合

FSO 通信系统在大气湍流条件下对环境变化高度敏感,尤其在恶劣天气条件下,光信号的传播质量显著下降. 这主要是由于大气粒子和水汽引发的散射、吸收和折射效应对光信号造成干扰,严重影响了 FSO 通信的传输稳定性和可靠性,从而限制了其在实际应用中的有效性. 相比之下,RF 通信在复杂天气条件下表现出更强的鲁棒性,其信号传播较少受雨、雪或雾霾的影

响,能在不利环境中保持较为稳定的传输性能. 然而,尽管 RF 通信在恶劣天气中具有优势,其传输速率相对较低,难以满足高数据速率的应用需求. 此外,RF 信号带宽较窄,受限于频谱资源,在高流量需求场景下效率也会显著下降.

由于 FSO 和 RF 通信技术各有局限,单一技术难以同时兼顾高传输速率和高可靠性. 因此,FSO 与 RF 的混合模式成为一种有前景的解决方案. 通过灵活部署

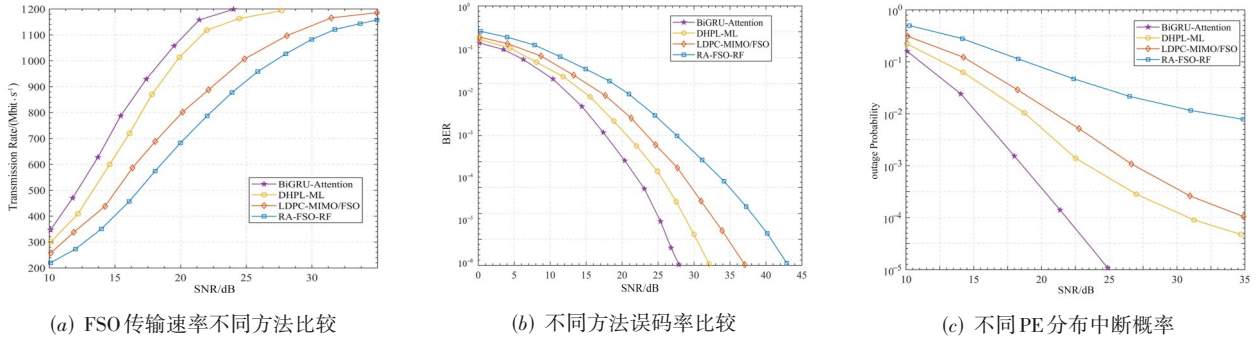


图6 相关实验结果^[96]

FSO和RF通信系统,根据环境条件和需求动态切换通信模式,在不同气象条件下优化系统性能.FSO/RF混合系统支持多种应用方式,如图7所示.

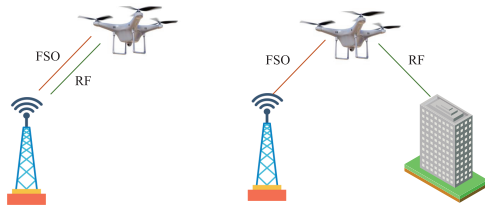


图7 基于FSO的UAV通信链路

当前研究中,FSO/RF混合系统主要有2种模式:一种是根据条件动态切换FSO链路和RF链路,另一种是将二者融合应用.第一种模式通过灵活切换和协同工作,在不同天气条件下优化系统性能.在良好天气下,优先采用FSO以提高传输速率;在恶劣天气下,则切换至RF通信以确保稳定性,从而有效提升系统的可靠性、传输速率和抗干扰能力.Song等^[97]提出了一种RF/FSO通信系统,旨在解决UAV通信网络中的同频干扰问题.该系统以RF链路为主通信方式,FSO链路作为备用.当干扰发生时,系统通过根据信干噪比切换链路,优化网络性能.通过推导混合通信网络的中断概率和符号误码率,仿真结果表明,与单一射频通信网络

相比,混合系统显著提高了中断概率,并获得约4.6 dB的信噪比增益,特别是在射频链路遭遇干扰或恶劣天气时表现更佳.Zhang等^[98]提出了一种基于FSO的UAV通信链路,特别适用于恶劣天气条件.通过部署额外的无人机,避免云层阻塞,实现机载光通信与地面站的连接.提出了基于天气的FSO/RF链路切换方案,并推导了在大气衰减、湍流、指向误差及无人机悬停引起的到达角影响下的中断概率和误码率表达式.仿真验证了该方案在不同天气条件下的有效性,并为系统设计提供了指导.Xu等^[99]提出了一种具有自适应组合方案的空地一体化网络系统,提升FSO/RF通信性能.当FSO链路的瞬时信噪比超过阈值时,采用放大转发协议;否则,RF与FSO链路同时工作,通过最大比率组合方法合并信号.推导了中断概率、符号误码率和遍历容量的闭式表达式及其渐近表达式.仿真实验从检测技术、视场角和切换信噪比3个关键因素出发,对比不同情况下系统的中断概率.图8(a)表示不同检测技术下中断概率随平均光功率,从图中可以看出HD检测的中断概率始终低于IM/DD检测,且 $\gamma_{th} < \gamma_s$ 时系统中断性能更优.图8(b)表示不同湍流强度下视场角对中断概率的影响,随着湍流强度增强,中断概率增加,视场角增大时,中断概率先减后增.图8(c)体现了切换信噪比与中断概率的关系,随着切换信噪比增大,中断概率减小.

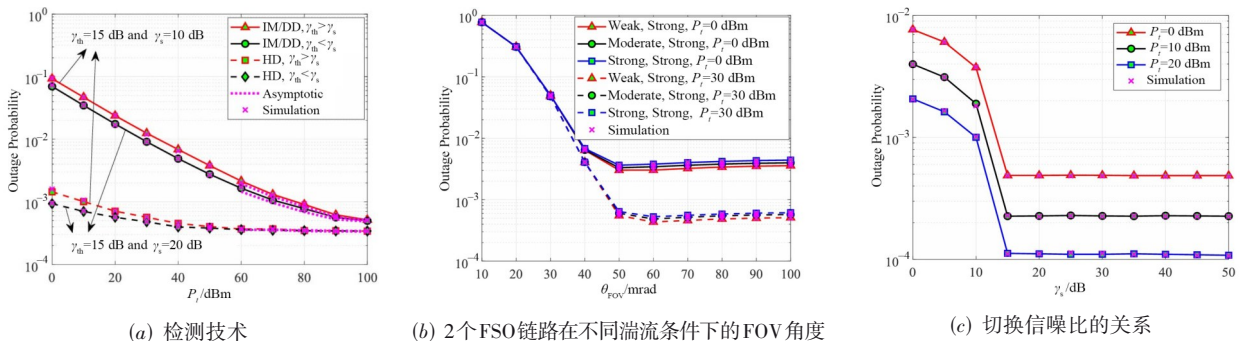


图8 不同情况下系统的中断概率^[99]

第二种模式是FSO链路和RF链路的融合应用,通过将FSO用于上行链路、RF用于下行链路,充分发挥两者的优势. 在上行链路中,FSO链路提供高速数据传输,降低延迟;而RF链路则在下行链路中确保在复杂环境或恶劣天气下的通信稳定性. 两者协同工作,提升了空地一体化网络的整体性能和可靠性. Guo等^[100]探讨了在应急通信场景中,利用UAV作为空中中继,通过FSO/RF技术实现室外和室内通信的接入与回传链路. 无人机的位置优化不仅影响室外通信的穿墙损耗,还影响FSO通信质量. 通过优化无人机的部署位置、功率和带宽分配,结合信息因果约束和用户公平性,提升了资源利用效率和系统吞吐量. 图9(a)表示在室内用户数量为10的情况下,随着最大带宽的增加,系统吞吐量显著上升;图9(b)为室内用户数量为

10的情况下,系统吞吐量随着最大功率的增加而增加;图9(c)对比了FSO/RF系统与仅使用RF系统的吞吐量,在最大功率 $P_{\max} = 0.1$ W时,FSO/RF系统的吞吐量约为仅使用RF系统的两倍,且随着带宽增加,两者差距会进一步扩大. Park等^[101]研究了UAV辅助的FSO/RF系统,重点分析了衰落效应、无人机尺寸、质量和功率限制对系统性能的影响. 通过将无人机作为解码转发中继,分析了衰落和功率放大器非线性效应下的中断概率,特别是在高发射功率区间,提出了非线性功率放大器对中断概率的影响及其缓解调制方案. 基于此,提出了一种联合布局与发射功率优化算法,并通过轮询和信噪比调度方案降低端到端中断概率. 仿真结果表明,所提优化算法的性能与基线方法相当,验证了其有效性.

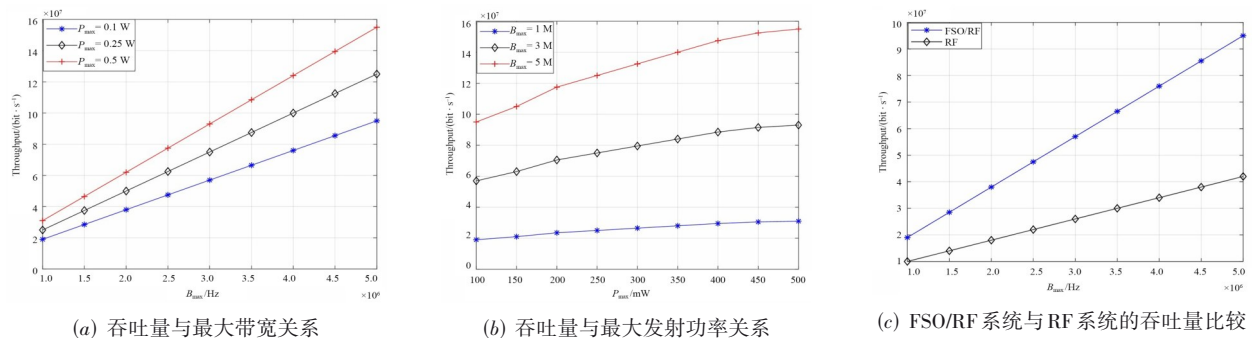


图9 相关实验结果^[100]

3.1.3 中继通信/任务缓存

随着UAV技术的迅猛发展与FSO通信技术的不断成熟,将二者结合构建高效的中继传输系统,成为应对现代通信挑战的一种创新方案. 无人机作为灵活的空中平台,能够在多变环境中动态部署,提供高带宽、低延迟的通信支持;而FSO技术凭借其较高的传输速率和丰富的频谱资源,成为弥补传统射频通信局限的有效选择. 然而,FSO链路易受天气和大气衰减影响,而无人机的电力、飞行稳定性及中继性能优化仍需解决. 因此,UAV与FSO技术结合的中继系统不仅为应急通信、物联网和军事等领域提供了新的解决方案,也为未来智能通信网络的发展开辟了广阔前景. 如图10所示,UAV作为移动中继与FSO通信相结合,可以根据信道条件实时调整位置,减轻视距传输中位置限制的影响,提升系统机动性,使其相比传统地面固定中继更具灵活性.

Hayal等^[102]研究了指向误差和大气湍流对UAV中继辅助FSO通信系统的影响,提出将UAV作为移动中继器集成到传统FSO系统中,以提升系统性能. 通过评估M-PSK和M-QAM调制对传输质量的影响,优化了系统的符号误码率、中断概率和信噪比. 研究表明,基于空间分集的中继辅助系统能够有效减小指向误差和大

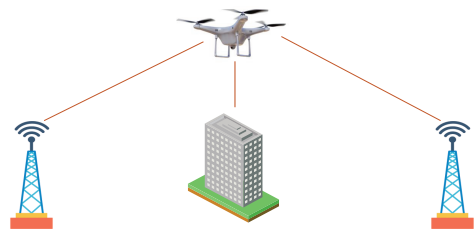


图10 基于FSO的UAV中继通信

气湍流效应,提升UAV间FSO链路的性能. 数值结果显示,适当的信噪比可以在不同风速条件下保持较低的误码率. 最后,比较了CFSO与基于NFSO的辅助中继系统,结果表明后者具有明显优势. Khallaf等^[103]提出了无人机中继辅助自由空间光学通信链路中断和保密中断概率的近似表达式,考虑了天气衰减和无人机位置波动. 采用L-ary多脉冲位置调制优化链路性能,研究了波束发散和调制参数对系统的影响. 结果表明,该方案能够在时变信道中提高频谱效率,并保持较低的中断概率. 图11(a)展示了普通多脉冲位置调制和L-ary多脉冲位置调制在不同天气、指向误差条件下,平均频谱效率随平均发射光功率的变化,低功率时二者

相近,高功率时L-ary多脉冲位置调制优势明显;图11(b)表示指向误差衰落和复合衰落场景下,保密中断概率随保密容量阈值的变化情况,表明在短FSO链路中大气湍流影响可忽略;图11(c)说明不能简单地以Eve与Bob共面作为最坏情况来考虑,需综合多种因素确定系统的安全性能.Li等^[104]分析了基于UAV辅助的自由空间光学中继通信系统,采用解码转发中继方案.研究了路径损耗、大气湍流、指向误差和到达角波动等因素对

系统性能的影响.基于马拉加分布模型,推导了信道衰落系数的概率密度函数、中断概率和误码率的闭式表达式.数值分析表明,波束宽度、无人机位置和接收器视场角度等可调参数对系统性能有显著优化作用,且最佳无人机位置与接收器波束宽度密切相关.结果表明,解码转发中继下的端到端性能受限于性能较差的链路,调整无人机位置有助于平衡链路性能并提升整体系统性能.

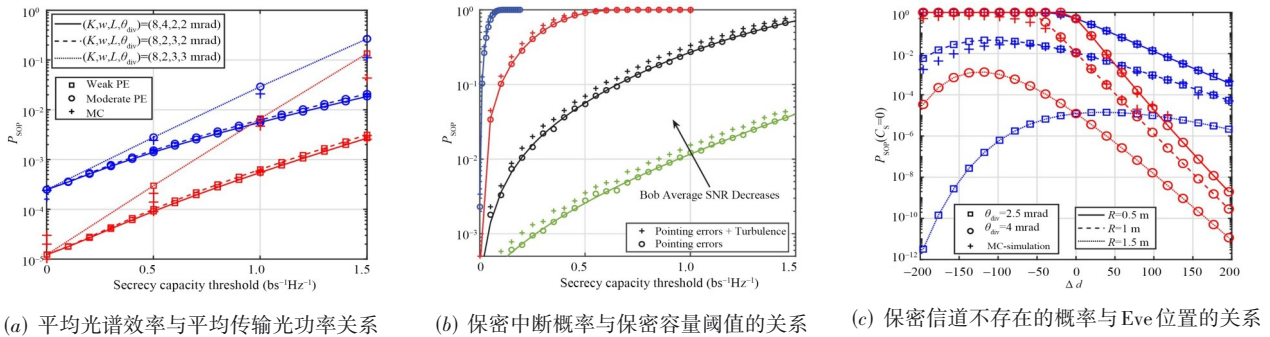


图 11 相关实验结果^[103]

在基于FSO的UAV中继系统中,启用缓存的无人机通过临时存储传输或接收的数据,可显著提升系统性能.缓存策略能够有效缓解动态大气条件或链路质量波动带来的延迟,提高数据传输效率,特别是在间歇性通信或高流量场景中尤为重要.无人机利用机载缓存,在链路状态良好时存储数据,并在通信链路稳定时完成传输,从而减少丢包风险并提升系统吞吐量^[105].此外,缓存管理算法可优化数据存储和检索过程,优先保障高优先级数据的可用性,进一步增强基于FSO的UAV中继系统的可靠性和鲁棒性.典型基于FSO的UAV中继任务缓存如图12所示.

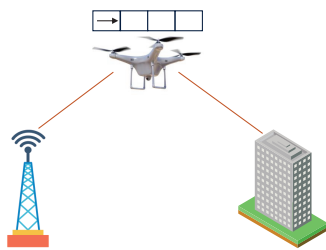


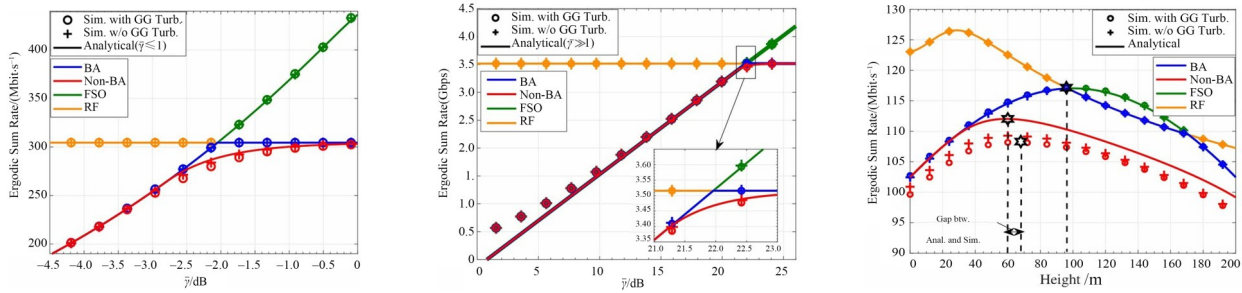
图 12 基于FSO的UAV中继任务缓存

Pervez等^[106]研究多无人机协同网络,结合FSO技术,优化任务卸载、服务器选择、传输功率、无人机轨迹和CPU频率,以减少能量消耗和延迟.提出了一种基于块下降法的交替迭代方法,该方法分为三层:第一层使用博弈论解决卸载和服务器选择;第二层通过几何填充和SCA优化传输功率和轨迹;第三层通过梯度下降

优化CPU频率.仿真结果表明,该方法优于多种基准方案.Al-Eryani等^[107]研究了一种多用户混合射频与自由空间光系统,多个移动用户通过虚拟MIMO系统将数据传输到中继节点,中继通过射频MIMO和FSO链路转发数据至目的地.中继节点配备物理层缓冲区,存储数据直到链路条件最佳.所提出的传输协议通过虚拟MIMO实现多路复用增益,并推导了有限缓冲区情况下的中断概率和符号错误率等性能指标.结果表明,缓冲区显著提升了系统性能,增强了对指向误差和恶劣天气的容忍,且虚拟MIMO方案在大规模接收天线下具有明显性能提升.Ajam等^[108]研究了基于UAV的通信系统,使用射频链路连接移动用户,FSO链路连接地面站.分析了缓冲辅助和非缓冲辅助中继的性能,图13(a)表示在低信噪比下,各信道及中继方式的分析结果与模拟结果相符,验证了相关理论分析和近似方法的正确性,同时表明缓存辅助中继在低信噪比环境下能实现更高的遍历和速率;图13(b)表明高信噪比下各信道及中继方式的分析结果与模拟结果一致,进一步验证了理论分析的可靠性,同时说明缓存辅助中继在高信噪比环境下也具有性能优势;图13(c)表明UAV高度对不同信道及中继方式的遍历和速率影响显著,不同中继方式的最优UAV高度不同,缓存辅助中继在相同条件下性能更优,同时验证了分析结果的准确性.

3.1.4 智能反射面

在基于FSO的UAV系统中,智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)技术通过相位调控矩阵与光信号传播特性的深度耦合,实现视距链路通信质量



(a) 低信噪比下各信道及中继方式遍历和速率对比 (b) 高信噪比下各信道及中继方式的遍历速率对比 (c) UAV 高度对遍历和速率的影响

图 13 相关实验结果^[108]

的多维优化. IRS 表面集成的大量可重构超材料单元, 能够基于环境感知数据动态调整相位, 构建自适应光信号反射路径. 当遭遇大气湍流导致的光束发散时, IRS 可通过预设的相位补偿算法, 将发散光束重新汇聚至接收端, 降低因光斑漂移造成的误码率; 在城市复杂环境中, 面对建筑物遮挡, IRS 能够构建虚拟视距链路, 通过多次反射绕过障碍物, 其相位优化算法可基于强化学习动态调整反射参数, 使反射光功率得以提升. 此外, IRS 的深度学习优化算法可根据天气参数实时调整反射策略, 在极端天气下仍能保持链路可用性. 在雾天场景中, 通过 IRS 对光信号的多径反射与相位合成, 有效抑制大气衰减效应, 显著提升了 UAV 通信系统在复杂环境下的鲁棒性与传输效率. 典型的应用场景如图 14 所示. IRS 通常部署在高楼顶部或其他高处位置, 这不仅扩大了通信覆盖范围, 也增强了系统在城市环境中的可靠性, 有效缓解了因障碍物遮挡和多路径效应造成的信号衰减问题.

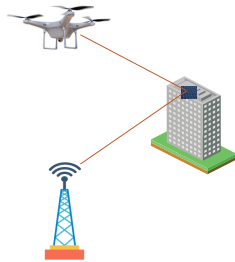


图 14 基于 FSO 的 UAVIRS 应用

Saxwna 等^[109]研究了恶意无人机干扰对利用合法无人机中继和智能反射面提高覆盖范围的 FSO 通信系统性能的影响. 通过分析大气湍流、指向误差和到达角波动对系统性能的综合影响, 推导出了系统的平均误码率和中断概率的闭式表达式. 研究考虑了不同位置的恶意无人机干扰和 IRS 的作用, 全面评估了系统性能, 并通过渐近分析和蒙特卡罗模拟验证了结果. Deng 等^[110]提出了一种基于双层长短期记忆的 IRS 辅助高速

无人机自适应波束对准方案, 旨在优化无人机通信. 通过预测飞行轨迹, 优化了 IRS 相移矩阵和波束赋形, 从而最大化接收信噪比, 实现在基站与 IRS 之间的自适应波束对准. 仿真结果图 15(a)对比了无 IRS 辅助的自适应波束对准方案和所提算法在不同发射信噪比下的频谱效率, 结果显示所提算法在 $N_{Rx} = N_{Rz} = 38$ 和 $N_{Rx} = N_{Rz} = 56$ 时, 频谱效率分别提升约 43% 和 86%, 且能达到穷举搜索算法的最优性能; 图 15(b)为不同算法的频谱效率随发射信噪比和时间的变化, 从图中可以看出, 其中所提算法在不同时刻都能保持稳定良好的性能, 而其他算法性能不稳定; 图 15(c)展示了在发射信噪比为 15 dB 的条件下, 完整波束跟踪持续时间内各算法的频谱效率. 其中, IRS 辅助的传统窄波束对准算法在波束对准时无机接收信噪比高, 频谱效率在特定时刻略优于所提算法, 但优势持续时间短. Mondal 等^[111]研究了 FSO/IRS 辅助的 NOMA 通信系统在不完美 CSI 和 SIC 条件下的性能, 分析了大气湍流对 FSO 链路的影响. 通过数值分析, 发现选择发射孔径和使用多个发射天线能显著提高中断性能; 且有源 IRS 相比无源 IRS 能有效减轻双通道损耗. 中断概率的闭式表达式通过矩量方法推导, 并通过蒙特卡罗模拟验证, 提供了高 RF 和 FSO 功率场景下的渐近表达式及分集顺序.

3.2 应用

3.2.1 应急通信

在应急通信场景中, 基于 FSO 的无人机通信发挥着至关重要的作用. 当自然灾害或是紧急公共事件导致地面通信基础设施遭受严重破坏时, 传统通信方式往往陷入瘫痪. 基于 FSO 的无人机通信凭借其高带宽、高速率以及不受频谱限制的优势, 能够迅速构建起临时通信链路. 无人机可灵活部署至受灾区域, 作为空中通信节点, 实现受灾地区与外界的通信连接, 及时传递救援信息、人员伤亡情况以及物资需求等关键数据, 为救援指挥决策提供有力支持, 极大地提升应急救援的效率与效果.

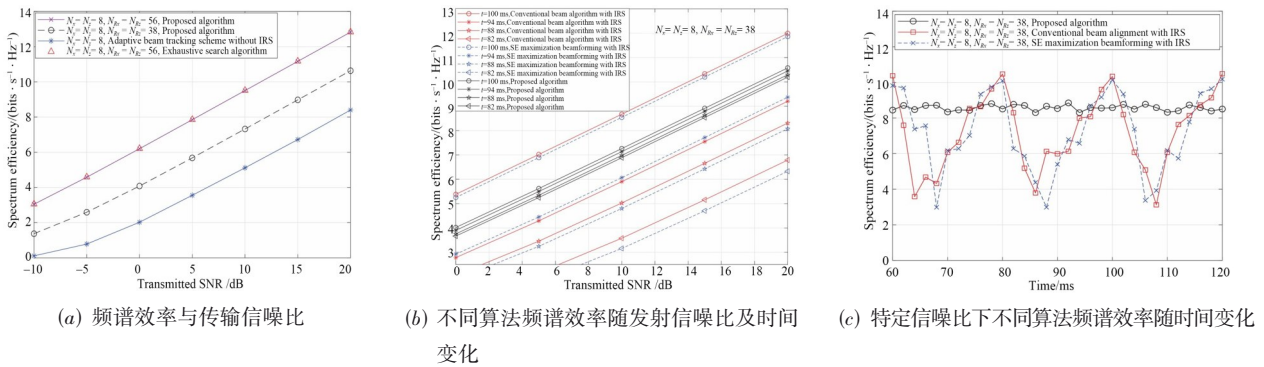


图 15 相关实验结果^[110]

Guan 等^[112]结合增强 K-均值算法与 MAPPO 算法提出 KMAPPO 方法,解决灾区应急通信中多无人机协同轨迹设计难题. 研究针对通信基础设施受损场景,利用无人机中继恢复通信. 图 16(a)为不同学习率下 KMAPPO 算法平均系统奖励的收敛情况,过大的学习率会阻碍算法收敛,过低的学习率虽能在收敛后提升平均

奖励但收敛速度慢,学习率为 5×10^{-4} 时二者可实现较好平衡;图 16(b)对比了不同算法的收敛,结果显示 KMAPPO 收敛速度最快,且获得的平均系统奖励最高;图 16(c)表示无人机数量从 3 增加到 8,不同算法下链路系统容量的变化,其中 KMAPPO 的系统容量始终为最高.

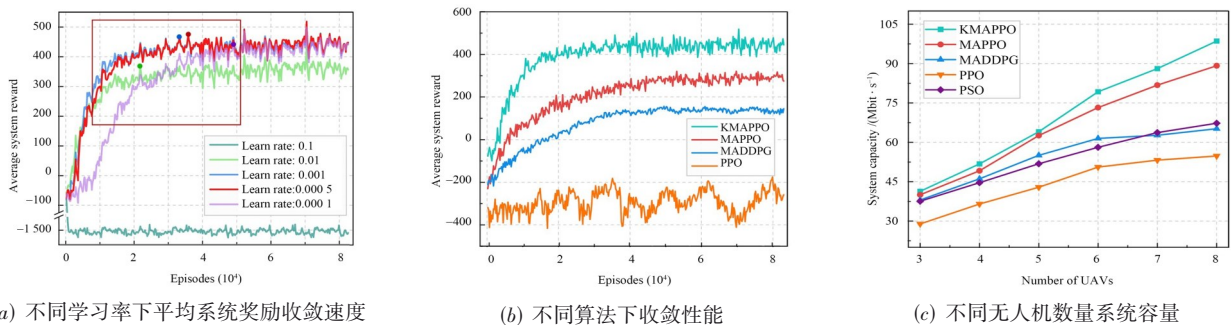


图 16 相关实验结果^[112]

3.2.2 智慧城市

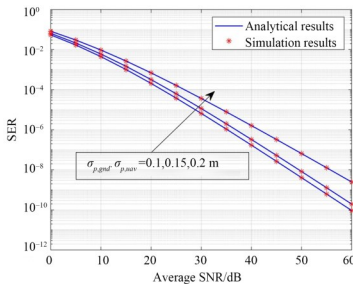
智慧城市是城市发展的关键趋势,基于 FSO 的无人机通信在城市管理与运行中全方位、实时的信息获取和高效传输极为关键. 无人机配备多种先进传感器,借助 FSO 通信技术,能够快速、精准地采集城市交通、环境、基础设施等多方面的数据信息,并及时传递给城市管理部门和相关机构. 城市管理者依据这些数据,可精细开展交通疏导、环境治理、设施维护等工作,实现城市资源的合理调配,提升城市的运行效率,推动智慧城市发展.

Komathi 等^[113]提出了一种结合 UAV 与 Alamouti 方案的 FSO 系统,用于智慧城市实时交通监测与管理,以缓解高峰时段交通拥堵. 该系统利用 UAV 作为中继扩大覆盖范围,构成双跳 FSO 通信系统,并采用 Alamouti 方案减轻大气湍流影响. 研究构建了包含大气损耗、大气湍流、指向误差和到达角波动的信道模型,并通过 MATLAB 仿真和蒙特卡罗模拟验证结果. 图 17(a)表示

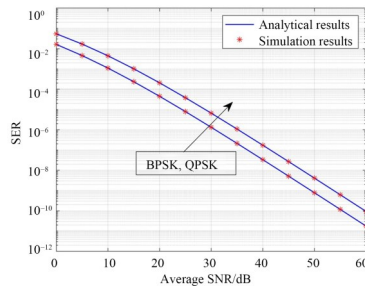
地面和无人机位移标准差增大时,系统误符号率随平均信噪比变化而上升,表明二者增大会降低系统性能;图 17(b)呈现 BPSK 调制技术在相同平均信噪比下误符号率低于 QPSK,说明其在降低误码率方面更具优势;图 17(c)表明存在到达角波动时系统 SER 高于无波动情况,体现到达角波动会使系统性能下降. 通过研究不同参数对系统性能影响,验证了该系统在交通管理中的可行性.

3.2.3 卫星中继通信

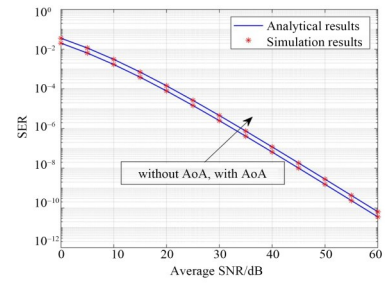
在空天地一体化通信网络中,基于 FSO 的无人机卫星中继系统展现出独特的应用价值. 通过将无人机作为空中中继节点与低轨卫星协同工作,可有效解决地面站与卫星间因云层遮挡、大气衰减导致的通信中断问题,显著提升空间通信链路的可靠性和覆盖范围. 无人机凭借其灵活机动特性,能够在临近空间动态调整位置,构建卫星-无人机-地面站的三维光通信中继架构,特别适用于海洋监测、极地科考等地面基础设施匮



(a) 不同地面与无人机位移标准差下 SER 随平均 SNR 变化



(b) 不同调制技术 SER 随平均 SNR 对比



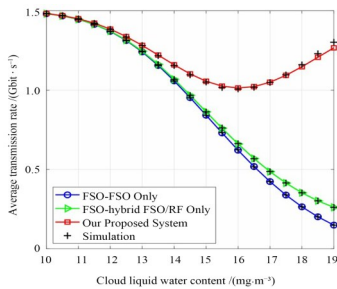
(c) 有无到达角波动 SER 随平均 SNR 变化

图 17 相关实验结果^[113]

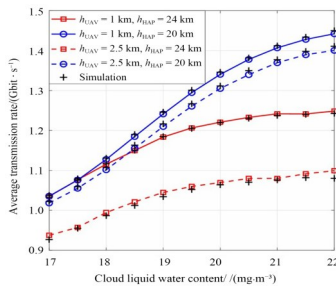
乏的场景.

Nguyen 等^[114]提出了基于 RIS-UAV 中继的混合 FSO/RF 卫星-空中-地面一体化网络架构,通过引入可重构智能表面与无人机协同的反射式中继方案,解决了传统混合 FSO/RF 系统在云层遮挡下的带宽受限问题.该研究创新性地设计了多速率链路切换机制,并建立了融合大气湍流、云衰减与无人机悬停误差的复合信道模型,为 6G 空天地网络的高可靠传输提供了理论与技术支撑.图 18(a)对比了不同系统在云层遮挡下的平均传输速率.当 CLWC 增加时,FSO-FSO 仅有的系统因受云层影响,传输速率显著下降,FSO-混合

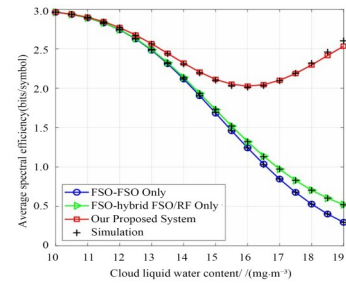
FSO/RF 系统由于切换到低速率的 RF 链路,传输速率也明显降低.相比之下,所提系统在高 CLWC 值时优势突出,能保持 1.15 Gbit/s 的传输速率,远高于其他 2 个对比系统;图 18(b)为不同 UAV 和 HAP 高度下,系统平均传输速率随 CLWC 的变化情况.随着 CLWC 值增加,系统选用 UAV 辅助的 FSO-FSO2 链路进行传输的机会增多,从而使可实现的数据速率有所提升;图 18(c)对比了不同系统平均光谱效率随 CLWC 的变化.随着 CLWC 增加,所提系统的平均光谱效率优势愈发明显,而 FSO-FSO 系统和 FSO-混合 FSO/RF 系统光谱效率较低.



(a) 平均传输速率随 CLWC 变化



(b) UAV 部署高度与传输速率关系



(c) 频谱效率对比

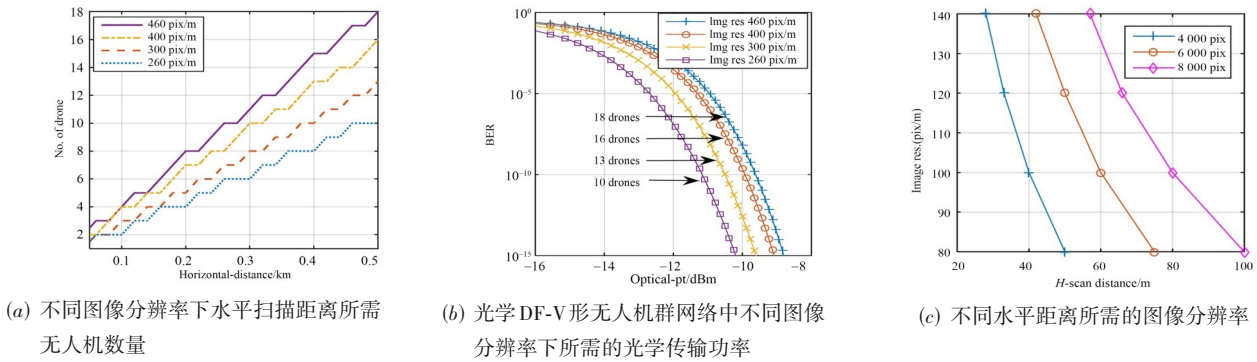
图 18 相关实验结果^[114]

3.2.4 无人机集群自组网

随着无人机应用场景的不断拓展,多个无人机协同作业的需求日益增长,无人机集群自组网成为实现高效协同任务的关键技术.在集群作业过程中,无人机之间需要实时、稳定地交互大量数据,以实现精准的任务分配、协同定位和行动协调.基于 FSO 的通信技术能够满足无人机集群对数据传输速率和实时性的严格要求.同时,其强抗干扰能力和高安全性,可保障在复杂电磁环境下无人机之间通信的可靠性和数据的安全性.

Mazher 等^[115]提出利用自由空间光通信的无人机群网络,用于检测物理拓扑问题并进行深度决策.通过

构建光学 V 形无人机群网络和优化相关参数,实现高图像分辨率检测,降低人力成本和风险,提高检测效率.图 19(a)表示在水平扫描距离及图像分辨率确定情况下,优化所需最小无人机数量的关系.从图中可以看出无人机数量随扫描距离线性增加,每增加 50 m 需额外增加一架无人机;图 19(b)对比了不同图像分辨率下 V 形编队中无人机的传输功率需求,发现当水平扫描距离为 1 000 m 时,460 pix/m 分辨率需 18 架无人机且传输功率显著降低;图 19(c)表示不同相机像素在 100 pix/m 分辨率下的水平扫描距离,表明高像素相机可覆盖更大区域.结合飞行速度与时间,优化后的水平距离设置有效平衡了任务效率与图像清晰度需求.

图 19 相关实验结果^[115]

4 挑战与未来展望

4.1 挑战

4.1.1 环境适应性与链路稳定性

FSO通信链路对大气环境的敏感性是其主要限制因素之一。大气中的微粒会显著导致光信号的衰减,直接影响通信质量,尤其在低能见度的天气条件下,光信号的传输距离和强度会迅速下降。此外,大气湍流会引起激光束的扩散和散射,形成“湍流衰减”现象,进一步降低光学信号的稳定性。这些挑战对系统设计提出了更高要求,需要引入自动补偿机制。例如,通过动态调整激光发射功率、采用先进的光学对准技术,以及引入多通道传输和自适应光学技术,可以有效对抗大气干扰。尤其在无人机高速移动的场景下,保持稳定的光学链路并提高系统鲁棒性已成为FSO通信领域的重要研究方向。这些改进不仅能提升系统的可靠性和适应性,还为FSO技术在复杂环境下的实际应用提供了可行的解决方案。

4.1.2 高精度定位与动态跟踪

FSO通信要求高度的视距,因此无人机必须能够精准定位并实时调整其光学系统,确保光束始终对准接收端。然而,在动态飞行环境中,由于无人机的快速移动、高速旋转和复杂气流变化,传统的光学跟踪系统往往难以维持稳定链路,尤其是在高速飞行和复杂飞行状态下。为此,设计能够应对无人机快速姿态变化的定位与跟踪系统成为关键挑战。常见的技术方案包括基于视觉的跟踪系统、惯性测量单元与GPS的多传感器融合技术,甚至通过机器学习方法动态调整光学组件的方向。此外,适应高速飞行的光学系统需要具备极高的精度和快速响应能力,这对硬件和软件性能提出了更高要求。因此,提升光学跟踪系统的稳定性和实时性,成为保障FSO通信稳定性的核心问题之一。

4.1.3 能量效率与散热管理

在FSO通信中,无人机依赖高功率激光发射器进行数据传输,这些设备通常具有较高的能耗,尤其是在在

高速、大数据量传输时。由于无人机的电池容量有限,高能耗的通信系统会显著缩短飞行时间并限制操作范围,因此,如何优化光学通信系统的能效、平衡通信质量与能耗,成为设计中的重大挑战。此外,高功率激光器在运行过程中会产生大量热量,过高的温度不仅会降低系统性能,还可能损坏设备。因此,如何有效进行热量管理,防止因过热引发故障或性能衰减,也是一个亟待解决的问题。为了应对这些挑战,开发轻量化、高效的散热技术,以及高效的能量管理策略显得尤为重要。同时,采用低功耗技术的电池管理系统,也能在一定程度上延长无人机的飞行时间,提高整体系统的可靠性与稳定性。

4.1.4 网络架构与安全性问题

FSO的高定向性使得其链路极易受到视距条件的限制,给多无人机系统中的链路建立与维护带来了显著挑战。在多无人机动态组网环境中,由于各无人机的相对运动,链路拓扑结构会频繁变化,如何动态调整网络拓扑、合理分配带宽并有效管理频率,成为系统设计中的核心问题。为了确保网络的稳定性和可靠性,需要引入智能调度算法、分布式控制机制以及动态路由协议,以保证各无人机之间的通信不间断。此外,FSO通信的高度定向性意味着信号传播方向非常集中,容易受到敌对方或恶意第三方的拦截。因此,数据加密传输和防窃听技术对于确保通信安全至关重要。面对频谱资源的有限性,如何合理分配频带、减少干扰并确保各链路间的无缝协作,是优化FSO通信系统性能的关键挑战之一。

4.2 未来展望

4.2.1 自适应光束控制与智能链路优化

在未来基于FSO的UAV通信系统中,自适应光束控制技术将成为应对复杂动态环境的核心方案。当前,该领域已取得突破性进展,研究人员将深度学习深度融入光束控制算法,极大提升了系统的自适应能力。卷积神经网络被用于实时处理大气湍流、气候变化等环境因素产生的大量数据,通过对光束传输过程中畸变

图像的特征提取与分析,精确预测光束偏移和强度衰减情况,进而调整光束发射角度和聚焦度,使信号传输的稳定性提高.长短期记忆网络则被应用于处理时间序列数据,在无人机高速飞行过程中,可基于历史环境数据和光束传输状态,提前预判障碍物遮挡等突发状况,提前动态调整光束功率和路径,有效避免信号中断.此外,强化学习算法在自适应光束控制中的应用也成为热点.通过构建环境-动作-奖励的反馈机制,智能体可在复杂的空中通信场景中不断试错学习,自主探索最优光束控制策略.在近期的实验中,基于深度Q网络的强化学习算法,成功使无人机在多变天气条件下,通信链路的传输效率得到提升.未来,随着边缘计算与分布式优化算法的协同发展,自适应光束控制技术将进一步增强无人机通信网络的自主性,使其在网络拥堵、极端环境等情况下,也能快速做出智能决策,全方位提升整体网络性能与可靠性.

4.2.2 多模态传感融合与高精度定位

为了确保无人机在复杂、动态环境中保持稳定的FSO通信链路,必须具备极高的定位精度和实时的环境感知能力.未来的无人机通信系统将采用多模态传感器融合技术,集成激光雷达、红外成像、超声波、GPS和惯性导航系统等多种传感器,实时感知环境变化,提升飞行精度和可靠性.通过多传感器数据融合,无人机可以获得全面的环境感知,尤其在低光、恶劣天气或高度动态环境中,单一传感器难以提供足够的支持.多模态感知融合能够显著提高无人机光束对准的精度和通信链路的稳定性.系统能够实时优化光束角度和定位,确保光信号的准确对接,从而最大程度地提升FSO链路的传输可靠性和鲁棒性.特别是在高速飞行的场景下,这种集成化技术能够有效减少由定位误差引起的信号丢失或中断,确保通信系统的高效和稳定运行.

4.2.3 能源高效与硬件创新

无人机的能效是未来通信系统发展的关键瓶颈,尤其是在长时间飞行和稳定通信的需求下.为了提升FSO通信性能并延长无人机续航时间,未来研究将重点关注低功耗激光器和智能电源管理模块的开发.新型激光器设计,如基于垂直腔面发射激光或采用石墨烯、纳米材料等先进材料的激光源,能够有效降低能耗,并提高信号传输效率.此外,为了在长时间飞行中减少电池消耗,智能电源管理技术将成为关键.通过实时监控和调节电源消耗,智能电源管理系统能够根据通信需求和飞行模式动态调整功率输出,最大化能源利用率.这样的高效能源管理方案不仅能延长无人机飞行时间,还能提高系统在复杂任务中的稳定性.在硬件创新方面,无人机通信系统将采用更先进的微型光学相控阵列和可变焦透镜技术,确保光束定向和聚焦更加精

确.与传统光学组件相比,这些新型硬件提供了更高的灵活性和响应速度,极大地提升了FSO通信系统的适应性和稳定性.这些技术的结合,不仅为长时间飞行和高效通信奠定了基础,也为无人机在复杂和动态环境中的应用提供了更加可靠的支持.

4.2.4 混合通信架构与量子安全

随着无人机应用场景的日益复杂,尤其是在军事和安全领域,单一通信技术往往难以满足高动态性和高可靠性的需求.因此,未来的通信架构将趋向于混合通信技术的整合,不仅限于FSO与RF技术,还可能结合多种先进通信手段,以适应复杂环境和多样化的任务需求.与此同时,随着数据安全问题日益受到关注,量子通信技术,特别是量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)技术的应用,将为FSO链路提供更高层次的安全保障.量子密钥分发利用量子态不可克隆的特性,能够确保通信链路免受窃听和攻击,从而为无人机在敏感数据传输中的应用提供更加坚实的安全防护.随着量子安全通信技术的不断发展,它将成为未来无人机通信系统的重要方向,尤其在涉及高度机密和敏感信息的场景中,提供前所未有的安全性保障.

5 结论

基于FSO的无人机通信网络结合了无人机的灵活性与FSO通信的高带宽优势,但面临着大气环境、定位跟踪、能量管理和网络安全等多重挑战.未来的发展将聚焦于自适应技术、多模态传感、能源优化和混合通信架构等创新领域,以实现更稳定、高效和安全的通信系统.通过这些技术的突破,克服当前的局限,推动无人机通信网络在军事、应急救援、环境监测等多个领域的广泛应用,满足日益增长的通信需求.

参考文献

- [1] KUMAR R P, SINHA A, CAO Y C, et al. Relational maneuvering of leader-follower unmanned aerial vehicles for flexible formation[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2024, 54(10): 5598-5609.
- [2] GE Y M, FAN J C, LI G Y, et al. Intelligent reflecting surface-enhanced UAV communications: Advances, challenges, and prospects[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 30(6): 119-126.
- [3] RUIZ F, ARRUE B C, OLLERO A. SOPHIE: Soft and flexible aerial vehicle for physical interaction with the environment[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(4): 11086-11093.
- [4] DENG C L, FANG X M, WANG X B. Beamforming design and trajectory optimization for UAV-empowered

- adaptable integrated sensing and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(11): 8512-8526.
- [5] LIAO Z F, YUAN C H, ZHENG B, et al. An adaptive deployment scheme of unmanned aerial vehicles in dynamic vehicle networking for complete offloading[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(13): 23509-23520.
- [6] PANDEY G K, GURJAR D S, YADAV S, et al. UAV-assisted communications with RF energy harvesting: A comprehensive survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2025, 27(2): 782-838.
- [7] HEFFERNAN B M, KAWAMOTO Y, MAEKAWA K, et al. 60 Gbps real-time wireless communications at 300 GHz carrier using a Kerr microcomb-based source[J]. *APL Photonics*, 2023, 8(6): 066106.
- [8] TRAN T H T, LE H N, VU N A, et al. LNA linearization solution for direct conversion receiver using under-sampling technique in reference receiver[J]. *Physical Communication*, 2023, 59: 102059.
- [9] KHALEK N A, TASHMAN D H, HAMOUDA W. Advances in machine learning-driven cognitive radio for wireless networks: A survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(2): 1201-1237.
- [10] YAO Z H, CHENG W C, ZHANG W, et al. The rise of UAV fleet technologies for emergency wireless communications in harsh environments[J]. *IEEE Network*, 2022, 36(4): 28-37.
- [11] GUO W, ZHANY Y, TSIFTSIST A, et al. Performance and channel modeling optimization for hovering UAV-assisted FSO links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(15): 4999-5012.
- [12] 张敏惠, 童杨, 王怡. 基于 Kappa-mu/M 分布的联合多用户分集与并行中继选择 RF/FSO 系统性能研究[J]. *电子学报*, 2022, 50(1): 26-35.
- ZHANG M H, TONG Y, WANG Y. Performance analysis of multiuser diversity and parallel relay selection RF/FSO system over kappa-mu/M distribution channels[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, 50(1): 26-35. (in Chinese)
- [13] ABDELSALAM N, AL-KUWARI S, ERBAD A. Physical layer security in satellite communication: State-of-the-art and open problems[J]. *IET Communications*, 2025, 19(1): e12830.
- [14] NIU Y Y, WEI Z Q, WANG L, et al. Interference management for integrated sensing and communication systems: A survey[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2025, 12(7): 8110-8134.
- [15] JOHARIFAR M, DURUPT L, DELY H, et al. Advancing LWIR FSO communication through high-speed multi-level signals and directly modulated quantum cascade lasers[J]. *Optics Express*, 2024, 32(17): 29138-29148.
- [16] YUE P Y, AN J P, ZHANG J K, et al. Low earth orbit satellite security and reliability: Issues, solutions, and the road ahead[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2023, 25(3): 1604-1652.
- [17] ALIMI I A, MONTEIRO P P. Performance analysis of 5G and beyond mixed THz/FSO relaying communication systems[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 176: 110917.
- [18] 刘文亚, 王翔, 赵尚弘, 等. 同频干扰下混合 MUD-RF/FSO 航空中继通信系统性能分析[J]. *电子学报*, 2021, 49(10): 1960-1968.
- LIU W Y, WANG X, ZHAO S H, et al. Performance analysis of mixed MUD-RF/FSO airborne relay communication system with co-channel interference[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(10): 1960-1968. (in Chinese)
- [19] KHAN A, GUPTA S, GUPTA S K. Emerging UAV technology for disaster detection, mitigation, response, and preparedness [J]. *Journal of Field Robotics*, 2022, 39(6): 905-955.
- [20] 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.
- [21] ADNAN M H, AHMAD ZUKARNAIN Z, AMODU O A. Fundamental design aspects of UAV-enabled MEC systems: A review on models, challenges, and future opportunities[J]. *Computer Science Review*, 2024, 51: 100615.
- [22] SOUZA F L D S D, TEIXEIRA M A, RIBEIRO C H C, et al. Classification and specification of communication network requirements for UAVs in military applications[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2024, 40(3): 4-18.
- [23] MAO K, ZHU Q M, WANG C X, et al. A survey on channel sounding technologies and measurements for UAV-assisted communications[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 8004624.
- [24] GUAN Y, ZOU S, LI K, et al. MAPPO-based cooperative UAV trajectory design with long-range emergency communications in disaster areas[C]//2023 IEEE 24th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. Piscataway: IEEE, 2023: 376-381.

- [25] DAI M H, HUANG N, WU Y, et al. Unmanned-aerial-vehicle-assisted wireless networks: Advancements, challenges, and solutions[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(5): 4117-4147.
- [26] HAMID H, BEGH G R. IRS assisted UAV communications for 6G networks: A systematic literature review[J]. *Wireless Networks*, 2025, 31(1): 779-807.
- [27] IQBAL S, RAZA A, KALEEM M, et al. A full duplex LG modes enabled millimeter-wave based FSO communication system for disaster zone[J]. *Wireless Networks*, 2024, 30(2): 961-971.
- [28] SONG S, CHOI M, KO D E, et al. Multi-UAV trajectory optimization considering collisions in FSO communication networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2021, 39(11): 3378-3394.
- [29] BHARDWAJ P, BANSAL V, BIYANI N, et al. Performance of integrated IoT network with hybrid mmwave/FSO/THz backhaul link[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(2): 3639-3652.
- [30] JAVAID S, SAEED N, QADIR Z, et al. Communication and control in collaborative UAVs: Recent advances and future trends[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(6): 5719-5739.
- [31] LI X G, XUE X L, ZHOU C, et al. A review of UV communications for UAVs[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024, 5: 6495-6534.
- [32] LE H D, NGUYEN H D, NGUYEN C T, et al. FSO-based space-air-ground integrated vehicular networks: Cooperative HARQ with rate adaptation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(4): 4076-4091.
- [33] 徐东苓, 岳鹏, 易湘. 一种基于OAM的FSO误码性能的理论分析方法[J]. *电子学报*, 2021, 49(10): 1934-1944.
XU D L, YUE P, YI X. A theoretical analysis method of OAM-based FSO error performance[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(10): 1934-1944. (in Chinese)
- [34] 邵军虎, 杜旭晓, 庞健, 等. 基于马尔科夫模型的双站激光微波混合链路性能分析[J]. *电子学报*, 2024, 52(2): 468-476.
SHAO J H, DU X X, PANG J, et al. Performance analysis of dual ground station laser-microwave hybrid links based on Markov model[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2024, 52(2): 468-476. (in Chinese)
- [35] TUMMA Y, KAPPALA V K. A review on deployment of UAV-FSO system for high-speed communication[J]. *IEEE Access*, 2024, 12: 124915-124930.
- [36] DROULIAS S, LOULAKIS M, PAPAZOGLU D G, et al. Vortex inverted pin beams: Mitigation of scintillations in strong atmospheric turbulence[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(17): 4811-4814.
- [37] BURRELL D J, SPENCER M F, DRIGGERS R G. Open-loop wavefront sensing in the presence of speckle and weak scintillation[J]. *Optics Communications*, 2024, 572: 130960.
- [38] 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.
- [39] XU G J, LU S Y, QU L, et al. Outage probability and average BER of UAV-assisted RF/FSO system for space-air-ground integrated networks under angle-of-arrival fluctuations[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(20): 34009-34023.
- [40] FAKIRAH M, LENG S P, MOHAMMAD M A B, et al. Hybrid VLC/RF misalignment system for autonomous vehicles at roundabouts[C]//2023 6th International Conference on Electronics Technology. Piscataway: IEEE, 2023: 581-586.
- [41] LI X, LI Y J, SONG X K, et al. RIS assisted UAV for weather-dependent satellite terrestrial integrated network with hybrid FSO/RF systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, 15(5): 7304217.
- [42] SONG X K, WANG X, ZHAO S H, et al. Secure and covert communication strategy of UAV based on hybrid RF/FSO system[J]. *Optics Communications*, 2025, 574: 131234.
- [43] PANAHI F H, PANAHI F H. Cellular coverage extension using an intelligent FSO-based UAV: An energy and spectral efficient approach[J]. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2025, 11(1): 556-565.
- [44] 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.
- [45] ELAMASSIE M, UYSAL M. Multi-layer airborne FSO systems: Performance analysis and optimization[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2025, 73(4): 2522-2537.
- [46] ABOAGYE S, AMIN SAEIDI M, TABASSUM H, et al. Multi-band wireless communication networks: Fundamentals, challenges, and resource allocation[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2024, 72(7): 4333-

- 4383.
- [47] DELY H, JOHARIFAR M, DURUPT L, et al. Unipolar quantum optoelectronics for high speed direct modulation and transmission in 8-14 μm atmospheric window[J]. *Nature Communications*, 2024, 15: 8040.
- [48] CHEN C, JI J H, ZHAO H W, et al. Performance analysis and experimental evaluation of modulating retroreflector and UAV based free space optical transmission systems[J]. *Optics Express*, 2024, 32(19): 33830-33851.
- [49] SAMY R, YANG H-C, RAKIA T, et al. Space-air-ground FSO networks for high-throughput satellite communications[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2022, 60(12): 82-87.
- [50] LUO X W, CHEN H H, GUO Q. LEO/VLEO satellite communications in 6G and beyond networks-technologies, applications, and challenges[J]. *IEEE Network*, 2024, 38(5): 273-285.
- [51] KO D E, SONG S, CHOI M, et al. Cloud shape and attenuation based UAV trajectory optimization for FSO communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(7): 9911-9926.
- [52] SHARMA P, SINGH D, SWAMINATHAN R. Performance analysis of UAV-based FSO communication over doubly inverted gamma-gamma turbulence channel[C]//2024 National Conference on Communications. Piscataway: IEEE, 2024: 1-6.
- [53] SHEN B, CHEN J J, XU G J, et al. Performance analysis of a drone-assisted FSO communication system over Málaga turbulence under AoA fluctuations[J]. *Drones*, 2023, 7(6): 374.
- [54] 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. Piscataway: IEEE, 2024: 421-425.
- [55] ELFIKKY A, SINGH M, BOGHADY A I, et al. Spatial diversity-based FSO links under adverse weather conditions: Performance analysis[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2024, 56(5): 826.
- [56] SALLOUHA H, SALEH S, DE BAST S, et al. On the ground and in the sky: A tutorial on radio localization in ground-air-space networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2025, 27(1): 218-258.
- [57] SUN L J, ZHANG Y C, OUYANG C S, et al. A portable UAV-based laser-induced fluorescence lidar system for oil pollution and aquatic environment monitoring[J]. *Optics Communications*, 2023, 527: 128914.
- [58] SHAN T, YUAN R Z, HE N, et al. Non-line-of-sight ultraviolet transmission coverage in non-precipitating, foggy, and rainy weather[J]. *Optics Express*, 2023, 31(23): 37703-37721.
- [59] XIAO H, FOUZDER T, RUAN J C, et al. Optical spectral modulation of CdSe/ZnS quantum dot-based UAV identification[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1-10.
- [60] SONG Z, ZHANG Y Q, XU M F, et al. High capacity turbulence-resilient free-space chaotic optical communication based on vector optical field manipulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(24): 8647-8654.
- [61] YOUSSEF A A, ELSANADILY S I. Enhancing free-space optical communication networks using generalized low density parity check codes[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111862.
- [62] WOHLGEMUTH E, LESNIK R, COHEN R, et al. Robust coherent free-space optical communication using ultrashort pulses and dynamic coherent all-optical matched filter[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(5): 2026-2038.
- [63] KHALIFA M A, ALI M, NAEEM M. Buoyant airborne turbines in B5G/6G wireless networks: Opportunities, challenges, applications, and future directions[J]. *Computers and Electrical Engineering*, 2023, 111: 108962.
- [64] LIU H S, QIN T, GAO Z, et al. Near-space communications: The last piece of 6G space-air-ground-sea integrated network puzzle[J]. *Space: Science & Technology*, 2024, 4: 0176.
- [65] ZHANG Y L, GAO X Z, YUAN H, et al. Joint UAV trajectory and power allocation with hybrid FSO/RF for secure space-air-ground communications[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(19): 31407-31421.
- [66] KAMATCHI K, PILLAPPAN K, ANGAYARKANNI V, et al. SLIPT enabled ground-to-UAV FSO communication for SAGNET in 6G-IoT systems[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025, 9(3): 1268-1279.
- [67] LE H D, NGUYEN T V, MAI V, et al. FSO-based HAP-assisted multi-UAV backhauling over F channels with imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(12): 19597-19612.
- [68] YAO W J, PAN X L, ZHANG Y T, et al. Measurements of the optical scattering properties of single suspended particles and implications for atmospheric studies: A review[J]. *Current Pollution Reports*, 2024, 10(4): 648-661.

- [69] YANG Z R, GAO W J, HAN C. A universal attenuation model of terahertz wave in space-air-ground channel medium[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024, 5: 2333-2342.
- [70] MARDANI M, HOSEINZADEH S, GARCIA D A. Developing particle-based models to predict solar energy attenuation using long-term daily remote and local measurements[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 139690.
- [71] ARYA S, CHUNG Y H. A comprehensive survey on optical scattering communications: Current research, new trends, and future vision[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(2): 1446-1477.
- [72] BABICHEVA V E, EVLYUKHIN A B. Mie-resonant metaphotonics[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2024, 16(3): 539-658.
- [73] LIU J H, HAN J H, HUANG M J. Localization-of-light-induced stimulated Mie scattering: Laser pulse duration adjustment in a broad range[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2024, 89: 1852-1861.
- [74] FENG Y X, HE J Y, MA G, et al. Consistent assessment of microwave scattering and vertical dynamic characteristics in the precipitation environment over oceans[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, 17: 12408-12420.
- [75] WU H Y, KANG D P, DING J R, et al. Secrecy performance analysis in the FSO communication system considering different eavesdropping scenarios[J]. *Optics Express*, 2022, 30(23): 41028-41047.
- [76] AL-GAILANI S A, MOHD SALLEH M F, SALEM A A, et al. A survey of free space optics (FSO) communication systems, links, and networks[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 7353-7373.
- [77] MOHSAN S A H, KHAN M A, AMJAD H. Hybrid FSO/RF networks: A review of practical constraints, applications and challenges[J]. *Optical Switching and Networking*, 2023, 47: 100697.
- [78] TALEB F, ALFARO-GOMEZ M, AL-DABBAGH M D, et al. Propagation of THz radiation in air over a broad range of atmospheric temperature and humidity conditions[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13: 20782.
- [79] KIM S H, KIM J H, CHUN H Y, et al. Global response of upper-level aviation turbulence from various sources to climate change[J]. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 2023, 6: 96.
- [80] MOON W, KIM H. Standard deviation of fiber-coupling efficiency for free-space optical communication through atmospheric turbulence[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, 15(3): 7302507.
- [81] 吴加丽, 惠玉泽, 丁德强, 等. 非Kolmogorov大气湍流下部分相干光偏振状态对相干探测灵敏度的影响研究[J]. *电子学报*, 2023, 51(5): 1370-1380.
- WU J L, HUI Y Z, DING D Q, et al. The influence of polarization state of partially coherent beam on coherent detection sensitivity in non-Kolmogorov atmospheric turbulence[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(5): 1370-1380. (in Chinese)
- [82] WALSH S, SCHEDIWIY S. Adaptive optics LEO uplink pre-compensation with finite spatial modes[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(4): 880-883.
- [83] SHAKIR W M R, MAHDI A S, HAMDAN H, et al. Novel approximate distribution of the generalized turbulence channels for MIMO FSO communications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2024, 16(4): 7302715.
- [84] 张馨文, 李岳衡, 江雨薇, 等. GGD弱湍流环境含零视轴指向误差中继UWOC系统中断概率分析[J]. *电子学报*, 2023, 51(11): 3294-3304.
- ZHANG X W, LI Y H, JIANG Y W, et al. Outage analysis for relay-aided underwater wireless optical communication over GGD weak turbulence with pointing errors[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2023, 51(11): 3294-3304. (in Chinese)
- [85] ANBARASI K, HEMANTH C, SANGEETHA R G. A review on channel models in free space optical communication systems[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 97: 161-171.
- [86] WANG J Y, LI J, CHEN D L, et al. Performance analysis and verification of FSO based inter-ship communication systems on sea[J]. *Optics Communications*, 2024, 557: 130271.
- [87] SIKRI A, MATHUR A, KADDOUM G. Signal space diversity-based distributed RIS-aided dual-hop mixed RF-FSO systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2022, 26(5): 1066-1070.
- [88] MBEZI M T, SAMUEL E, IDELETTE SOM H J, et al. Temperature and wind velocity effects on bit error rate during free space optical link under Matrix Málaga turbulence channel[J]. *Sādhanā*, 2023, 48(2). DIO: 10.1007/s12046-023-02114-2.
- [89] EGURI S V K, RAJ A A B, SHARMA N. Survey on acquisition, tracking and pointing (ATP) systems and beam profile correction techniques in FSO communication sys-

- tems[J]. *Journal of Optical Communications*, 2024, 45(4): 881-904.
- [90] SHARMA K, GREWAL S K. Optimization of throughput for free space optical communication system in presence of atmospheric turbulence and pointing error[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2023, 14(4): 3423-3439.
- [91] MAI V V, KIM H. Beam size optimization and adaptation for high-altitude airborne free-space optical communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 7902213.
- [92] GUNASEKAR A, KUMAR L B, KRISHNAN P, et al. All-optical UAV-based triple-hop FSO-FSO-VLC cooperative system for high-speed broadband Internet access in high-speed trains[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 124228-124239.
- [93] MAHMOOD M, GHADAKSAZ M, KOC A, et al. Deep learning meets swarm intelligence for UAV-assisted IoT coverage in massive MIMO[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(5): 7679-7696.
- [94] TRAN T N, YU H, KIM T. Strategies for optimizing uplink spectrum efficiency in cell-free massive MIMO satellite-UAV network[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(22): 37154-37169.
- [95] ZEDINI E, ATA Y, ALOUINI M S. Improving performance of integrated ground-HAPS FSO communication links with MIMO application[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2024, 16(2): 7301214.
- [96] ZHOU X P, FENG P Y, LI J H, et al. Tensor-train decomposition-based hybrid beamforming for millimeter-wave massive multiple-input multiple-output/free-space optics in unmanned aerial vehicles with reconfigurable intelligent surface networks[J]. *Photonics*, 2023, 10(11): 1183.
- [97] SONG X K, ZHAO S H, WANG X, et al. Performance analysis of UAV RF/FSO co-operative communication network with co-channel interference[J]. *Drones*, 2024, 8(3). 10.3390/drones8030070.
- [98] ZHANG X W, ZHAO S H, WANG Y, et al. A weather-dependent UAV relay-assisted hybrid FSO/RF airborne communication system[J]. *Optics Communications*, 2024, 554: 130196.
- [99] XU G J, XU M Z, ZHANG Q Y, et al. Cooperative FSO/RF space-air-ground integrated network system with adaptive combining: A performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(11): 17279-17293.
- [100] GUO Z N, GAO W, YE H J, et al. A location-aware resource optimization for maximizing throughput of emergency outdoor-indoor UAV communication with FSO/RF[J]. *Sensors*, 2023, 23(5): 2541.
- [101] PARK H S, JEE J, PARK H. Outage probability analysis and joint optimization for UAV-aided FSO/RF systems with nonlinear power amplifiers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, 15(6): 7304913.
- [102] HAYAL M R, ELSAYED E E, KAKATI D, et al. Modeling and investigation on the performance enhancement of hovering UAV-based FSO relay optical wireless communication systems under pointing errors and atmospheric turbulence effects[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2023, 55: 625.
- [103] KHALLAF H S, HASHIMA S, RIHAN M, et al. Quantifying impact of pointing errors on secrecy performance of UAV-based relay-assisted FSO links[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2024, 11(2): 2979-2989.
- [104] 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.
- [105] XIAO Y, YE Z Q, WU M M, et al. Space-air-ground integrated wireless networks for 6G: Basics, key technologies, and future trends[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, 42(12): 3327-3354.
- [106] PERVEZ F, SULTANA A, YANG C G, et al. Energy and latency efficient joint communication and computation optimization in a multi-UAV-assisted MEC network[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(3): 1728-1741.
- [107] AL-ERYANI Y F, SALHAB A M, ZUMMO S A, et al. Protocol design and performance analysis of multiuser mixed RF and hybrid FSO/RF relaying with buffers[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2018, 10(4): 309-321.
- [108] AJAM H, NAJAFI M, JAMALI V, et al. Ergodic sum rate analysis of UAV-based relay networks with mixed RF-FSO channels[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 164-178.
- [109] SAXENA P, CHUNG Y H. Analysis of jamming effects in IRS assisted UAV dual-hop FSO communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(7): 8956-8971.
- [110] DENG Q, CHEN X H, LIANG X P, et al. Adaptive beam alignment and optimization for IRS-aided high-

speed UAV communications[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2023, 7(3): 1583-1595.

- [111] MONDAL S, SINGH K, LI C P, et al. Mixed FSO/active IRS-aided MISO NOMA communication with imperfect CSI and SIC[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 12(1): 623-636.
- [112] GUAN Y, ZOU S, PENG H X, et al. Cooperative UAV trajectory design for disaster area emergency communications: A multiagent PPO method[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(5): 8848-8859.
- [113] KOMATHI D, AARTHI G. Performance analysis of

UAV-based FSO communication system for real time traffic monitoring and management in smart cities[J]. IEEE Access, 2025, 13: 26236-26247.

- [114] 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: 757-771.
- [115] 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): 036116.

作者简介



吴旭阳 男, 1996年生, 河南舞钢人, 北京科技大学计算机与通信工程学院博士研究生。主要研究方向为自由空间光通信、强化学习。
E-mail: D202410412@xs.ustb.edu.cn



金建力 男, 1992年生, 河北衡水人, 北京科技大学计算机与通信工程学院副教授。主要研究方向为面向可见光通信、6G关键技术。
E-mail: jinjianli@ustb.edu.cn



王建萍 女, 1974年生, 河北保定人, 北京科技大学计算机与通信工程学院教授, 博士生导师。主要研究方向为可见光通信、人工智能。
E-mail: jpwang@ustb.edu.cn



路慧敏 女, 1978年生, 辽宁新民人, 北京科技大学计算机与通信工程学院教授。主要研究方向为可见光通信、光学器件设计。
E-mail: hmlu@ustb.edu.cn



陈丹阳 女, 1993年生, 河北张家口人, 北京科技大学计算机与通信工程学院副教授。主要研究方向为可见光通信及其多址接入关键技术。
E-mail: chendanyang@ustb.edu.cn