

# 基于自由空间光的无人机通信网络关键技术与发展趋势

冯斯梦\*<sup>①</sup> 赵一迪<sup>①</sup> 董超<sup>①</sup> 吴启晖<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室 南京 211106)

**摘要:** 在当前电磁频谱拥堵和无线电干扰严重的情况下, 基于自由空间光(Free-Space Optical, FSO)的无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)通信网络作为推进空天地一体化进程的重要一环, 得到了学术界和工业界的广泛关注。与传统射频通信相比, FSO通信具有高数据传输速率、低时延和高安全性等优势。然而, FSO链路易受大气信道条件影响, 同时UAV高移动性、网络高动态性以及机载资源的有限性给FSO的稳定连接与可靠通信带来了巨大挑战。因此, 该文在介绍了FSO传输特性的基础上, 着重分析了提升基于FSO的UAV通信网络稳定性与通信质量的关键技术, 在此基础上, 归纳出高可靠、强智能、长续航的发展趋势, 以期为基于FSO的UAV通信网络发展提供参考与借鉴。

**关键词:** 空天地一体化; 无人机通信网络; 自由空间光通信

中图分类号: TN929.12

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2024)04-0001-12

DOI: 10.11999/JEIT230644

## Key Technologies and Development Trends of Free-Space Optical UAV Communication Network

FENG Simeng<sup>①</sup> ZHAO Yidi<sup>①</sup> DONG Chao<sup>①</sup> WU Qihui<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Considering the electromagnetic spectrum congestion and serious interference, the Free-Space Optical (FSO)-based Unmanned Aerial Vehicle (UAV) communication network constitutes an important part for the space-air-ground integration, attracting substantial attention from both academia and industry. Compared to radio frequency communication, FSO communication is benefited from high data rate, low latency and high security. However, the FSO link is susceptible to atmospheric environment, while the mobile UAV dynamics topology and limited resources bring further challenges. Therefore, this paper first introduces the FSO transmission characteristics and then focuses on the key technologies to enhance stability and quality of FSO-based UAV networks. Furthermore, the development trend of FSO-based UAV network, in terms of high reliability, strong intelligence and long endurance is analyzed.

**Key words:** Space-air-ground integrated; Unmanned Aerial Vehicle(UAV) communication network; FSO-based communication

## 1 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)移动

性和适应能力强, 具有动态部署、可灵活重构的优势, 在军事和民用场景具有广阔的应用空间, 吸引了学术界和工业界的广泛关注。目前的UAV通信网络多数基于射频(Radio Frequency, RF)技术, 然而, 由于RF频谱资源有限, 数据密集型应用程序和海量物联网设备的接入, 不同通信系统在频带内共存, 有限的带宽无法满足不断增长的频谱需求, 导致RF频谱资源的拥挤和争夺, 通信速率和通信质量无法得到保障<sup>[1]</sup>。针对上述问题, 自由空间光(Free Space Optical, FSO)通信被视为可行的解决方案引入到UAV通信网络。相比于RF链路, FSO通信具有更大的调制带宽, 能够实现更高的数据速率, 且FSO通信无需频谱许可, 具有较高的成本效

收稿日期: 2023-06-29; 改回日期: 2023-11-06; 网络出版: 2023-11-17

\*通信作者: 冯斯梦 [simeng-feng@nuaa.edu.cn](mailto:simeng-feng@nuaa.edu.cn)

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(62001219), 江苏省基础研究计划自然科学基金——前沿引领技术基础研究专项(BK20222013), 江苏省产业前瞻与关键核心技术重点项目课题(BE2021013-4)  
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China Youth Science Foundation Project (62001219), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province Basic Research Program-Frontier Leading Technology Basic Research Project (BK20222013), Jiangsu Province Industry Outlook and Key Core Technology Key Projects (BE2021013-4)

益和安全性<sup>[2,3]</sup>,因此,基于FSO的UAV通信网络被认为是解决超大带宽通信需求的有效手段。

结合UAV和FSO通信的优势,基于FSO的UAV通信网络能够快速建立,在无线电频谱拥堵的情况下提供高速、高带宽的通信服务,可以应用于军事、民用、科研等领域。在军事领域,基于FSO的UAV通信网络可以用于作战指挥、情报收集、目标跟踪等方面<sup>[4]</sup>。通过采用加密算法和自适应传输技术,可以保障通信的安全性和可靠性,提高战场指挥效率和作战效果。在民用领域,基于FSO的UAV通信网络可以用于应急救援、环境监测、智能交通、无人驾驶等方面。例如,在自然灾害发生时,UAV可以为通信基础设施损坏的地区提供通信快速恢复,将灾情信息实时传输到指挥中心,以支持救援决策和行动<sup>[5]</sup>。在科研领域,基于FSO的UAV通信网络可以用于地球观测、气象预报、空气质量监测等方面。例如,UAV可以搭载高分辨率摄像头和传感器,通过混合传输技术将地面图像和数据实时传输到地面站,以支持地球观测研究和应用<sup>[6]</sup>。

然而,FSO是基于视距链路传输,且通信质量易受大气湍流、大气衰减等信道条件的影响。同时,由于无人机平台的引入所带来的高移动性、机载资源的有限性以及网络环境的高动态性给FSO链路的稳定连接与可靠通信带来了更大的挑战,亟需对基于FSO的UAV通信网络性能提升关键技术进行梳理。因此,本文对基于FSO的UAV通信网络关键技术进行综述,通过分析该网络所面临的研究挑战,提出技术解决方案,并归纳总结出发展趋势。具体地,本文首先对基于FSO的UAV通信网络的组成与特点进行了介绍,在此基础上重点讨论了大气衰减、大气湍流、指向误差和到达角波动4种信道特征,对PAT (Pointing,Acquisition and

Tracking)瞄准捕获跟踪、多输入多输出、FSO/RF异构融合、中继传输、缓存辅助5种目前改善该网络的关键技术进行了探讨,最后通过分析归纳出基于FSO的UAV通信网络强智能、高可靠、长续航的发展趋势。

本文的结构安排如下:第2节介绍了基于FSO的UAV通信网络组成与特点,第3节讨论了基于FSO的UAV通信的信道特征,第4节分析了基于FSO的UAV通信网络的关键技术,最后,在第5节对未来的发展趋势进行了分析与预测。

## 2 基于FSO的UAV通信网络组成与特点

基于FSO的UAV通信网络得益于UAV平台的引入,将传统的FSO通信网络由地面向空域扩展,提高了网络的覆盖范围,实现了UAV通信网络与FSO通信的优势互补<sup>[7]</sup>。本节将着重介绍基于FSO的UAV通信网络组成,并对该网络的特点进行分析总结。

### 2.1 基于FSO的UAV通信网络组成

FSO通信指室外无线光通信,它的工作原理与光纤通信(Fiber Optical Communication, FOC)相似,利用激光二极管发出高速明暗闪烁的信号作为信息载体,不同之处在于FOC以光纤为传输介质,而FSO通信的激光信号在大气或真空中进行传输。基于FSO的UAV通信网络作为空天地一体化空基网络的重要组成部分,在其中承担着承上启下的作用,根据信源、信宿节点类型的不同,可以将其划分为无人机-无人机通信网络(UAV-to-UAV, U2U)、无人机-地面通信网络(UAV-to-Ground, U2G),网络组成如图1所示。

基于FSO的UAV通信网络由发射、大气信道和接收3个部分组成,其中发射部分由调制器、驱

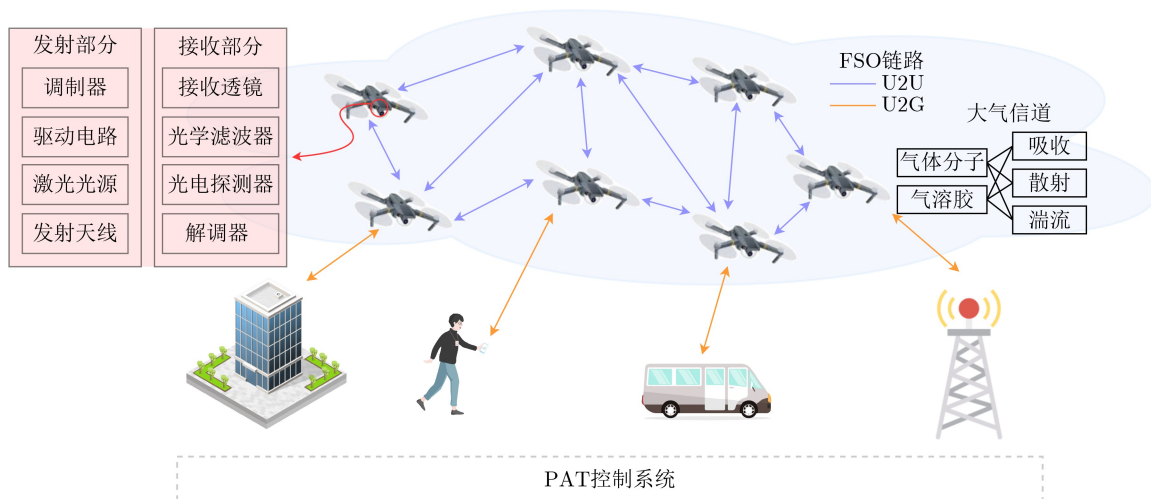


图1 基于FSO的UAV通信网络

动电路、激光光源和发射天线组成，主要功能为通过光电转换将电信号中的信息调制到光载波上，然后通过大气信道传播到接收透镜。由于FSO通信以大气为传播介质，大气中包含气体分子、气溶胶等粒子，同时存在云、雪、雾和雨等天气状况，受到粒子吸收和散射等因素的影响，会导致接收光信号的能量损耗，造成信号的严重衰减，因此，信道因素是制约FSO通信网络性能的关键。接收部分由接收透镜、光学滤波器、光电探测器和解调器组成，主要功能为将接收到的光信号转换为电信号，恢复传输的数据。由于FSO通信对收发端对准的精准度要求，一般还包含瞄准、捕获和跟踪(Pointing, Acquisition, and Tracking, PAT)控制系统<sup>[9]</sup>。PAT控制系统中包括粗跟踪、精跟踪结构及其伺服单元，主要功能为使发射天线对准接收透镜。

## 2.2 基于FSO的UAV通信网络特点

FSO通信需保持视距连接，由于障碍物的存在以及受到地理、行政区域的限制，传统地面基站的放置位置受到限制，难以构建视距链路。链路对收发机对准十分敏感，且光信号的传输受大气环境影响程度高，大气湍流的扰动会造成波前畸变、振幅起伏、闪烁和光束漂移，通信网络性能大幅下降。由于UAV具有动态部署、可灵活重构等优势，可以搭载无线通信设备作为空中平台，相比于传统地面通信，UAV平台可以根据用户位置的变化，自适应地调整其位置，从而减少路径损耗和干扰，显著提高通信基站的服务质量和覆盖范围，满足6G通信对超高速率、海量终端、高可靠低时延的需求。基于FSO的UAV通信网络综合了FSO通信和UAV网络的特点，具有以下优势：

(1)高频谱效率。基于FSO的UAV通信网络使用的光波位于可见光或红外光频段，具有较高的载波频率，可以提供更大的带宽以缓解射频频谱资源不足的困境，且光在大气中的传输速率极快，能够满足高速率、低延迟的通信需求。另外，FSO通信不需要频谱许可，能够实现通信链路快速建设和部署。

(2)高安全性。FSO通信使用红外光(3~300 THz)进行传输，在频段上与传统射频(300 kHz~300 GHz)通信不交叠，因此不受电磁干扰，且激光信号波束较窄，传播过程具有极强的指向性，不易被窃听或干扰，在安全要求较高的场景下具有更好的适用性。

(3)高灵活性。由于FSO通信基于视距链路，UAV具有高灵活性，可以在短时间内起飞并建立通信连接，不依赖于现有基础设施，能够实现按需快速部署，降低了建立视距连接的难度。且UAV

通信网络由多个无人机组成，可以协同工作以实现更广泛的覆盖范围和更高的通信容量<sup>[9]</sup>。

(4)低成本效益。FSO系统终端尺寸小、质量轻、价格低，便于安装和扩展，能够加装于现有的UAV、地面基站和通信卫星之上，无需铺设光缆以及建设大量的通信基础设施，可以实现低成本部署<sup>[10]</sup>。

## 3 基于FSO的UAV通信信道特征

搭载FSO收发设备的UAV平台在大气环境中移动，当FSO信号在大气中传输时，温度、湿度和压力的随机变化会导致大气湍流，大气中分子和粒子的吸收和散射现象会导致大气衰减，发射端和接收端的对准问题会导致指向误差。此外，由于大气的折射效应以及UAV受到气流的影响会产生更为强烈的抖动，到达角波动的影响不容忽视。上述4种因素相互关联，都会对基于FSO的UAV通信网络的系统性能造成严重影响。

### 3.1 大气衰减

大气信道中包含如气溶胶、灰尘、烟雾等悬浮微小颗粒和各种气体，还存在雨、雪、雾等天气情况，这些因素会使光束在传播时产生吸收和散射现象，导致光信号的衰减以及传输信号功率水平的降低，这种现象被称为大气衰减。大气吸收依赖于波长，波长范围具有最小吸收系数的范围称为大气传播窗口，大多数FSO通信系统设计用于780~850 nm和1520~1600 nm的窗口。在晴朗天气时，一些典型的分子吸收系数如表1。

大气散射会使光束的传播方向发生改变，造成原本传输方向上的能量减弱，散射过程取决于传播过程中遇到的粒子的半径，若粒子半径小于波长，则散射过程为瑞利散射；若粒子半径与波长大致相同，则散射过程为米氏散射；若粒子半径大于波长，则需要使用几何光学的衍射理论来解释散射过程。光信道中各种大气颗粒的大小和散射过程如表2。

### 3.2 大气湍流

在晴朗天气下，大气衰减对FSO通信的影响十分微弱，但大气湍流产生的影响不容忽视。光束穿过大气时，由于大气中温度、湿度和压力的随机变

表1 分子吸收系数表

波长(nm)	分子吸收(dB/km)
550	0.13
690	0.01
850	0.41
1550	0.01

化, 光束受到湍流的影响, 折射率会发生变化, 对光束的幅度和相位产生严重的影响。

根据湍流漩涡和光束尺寸的大小, 大气湍流效应可以分为3种类型, 如表3所示。当漩涡尺度大于发射机光束大小时, 会产生光束漂移现象, 漩涡以随机方式从原始路径整体偏转光束, 导致指向误差; 当漩涡尺度等于发射机光束大小时, 漩涡起到透镜作用, 使入射光束聚焦并导致接收机处的光辐射照度波动, 进而导致信噪比下降并伴有大幅度、随机的信号衰落, 这种现象称为光束闪烁; 当漩涡尺度小于发射机光束大小时, 光束的一小部分被独立衍射和散射, 导致接收功率密度降低以及接收光束的波前扭曲, 称为光束扩散。

### 3.3 指向误差

高精度的光束指向是获得高性能的关键因素。由于发射端和接收端之间不能精确对准以及建筑物的摇晃而产生的光束偏差称为指向误差<sup>[1]</sup>, 如图2所示。当指向误差增大到一定程度时会导致信号大幅度衰落, 严重影响系统性能。指向误差的产生有多种原因, 包括由制造工艺导致收发端自身未对准产生的固定误差、由环境(风荷载、建筑的热膨

胀、微小地震等)以及UAV平台自身抖动导致的随机误差<sup>[12]</sup>。

### 3.4 到达角波动

到达角定义为光信号相对于接收孔径平面的入射角。到达角波动是基于FSO的UAV通信系统与传统的FSO通信系统的显著区别。由于UAV在大气中受到自然环境的影响, 相对于传统地面通信系统会产生更为强烈的随机抖动, 导致光信号丢失或在到达接收器时, 入射角角度发生随机变化, 如图3所示。到达角波动与指向误差都是对准误差, 区别在于指向误差的影响表现为光束在接收机上的漂移, 到达角波动在接收器的焦平面上则表现为光斑运动或图像舞蹈<sup>[13]</sup>。文献[14]引入了到达角波动的影响, 联合考虑大气湍流和位置进行了精确的信道建模, 并以最大化系统可用性为目标, 考虑了接收器和发射器可调参数的优化问题。增大接收机的视场, 可以减轻到达角波动的影响, 但同时也会导致背景噪声增大, 显著降低系统性能<sup>[2]</sup>。文献[15]详细分析了到达角波动的影响, 建立了一个接收机视场的优化问题, 得到了缓解到达角波动对系统性能影响的最优视场范围。文献[13]利用高斯近似改进了到达角波动引起链路损耗的理论模型, 提出了一种快速高效的自适应波束控制技术, 利用非机械式变焦透镜在收发端调整波束大小, 来同时减轻到达角波动和指向误差的影响。

## 4 基于FSO的UAV通信网络性能提升关键技术

基于FSO的UAV通信网络受到大气湍流、大气衰减、指向误差、到达角波动等因素的影响, 为了更好地评价网络性能, 一般采用平均误码率、中

表2 大气粒子散射过程表

类型	半径( $\mu\text{m}$ )	散射过程
空气分子	0.0001	瑞利
雾霾粒子	0.01~1	瑞利-米氏
雾滴	1~20	三重几何
雨	100~10000	几何
雪	1000~5000	几何
冰雹	5000~50000	几何

表3 大气湍流类型

条件	类型	特点
漩涡尺度大于发射机光束大小	光束漂移	漩涡以随机方式从原始路径整体偏转光束, 导致指向误差, 光束错开接收机区域。
漩涡尺度等于发射机光束大小	光束闪烁	漩涡起到透镜作用, 使入射光束聚焦并导致接收机处的光辐射照度波动。
漩涡尺度小于发射机光束大小	光束扩散	光束的一小部分被独立衍射和散射, 导致接收功率密度降低以及接收光束的波前扭曲。

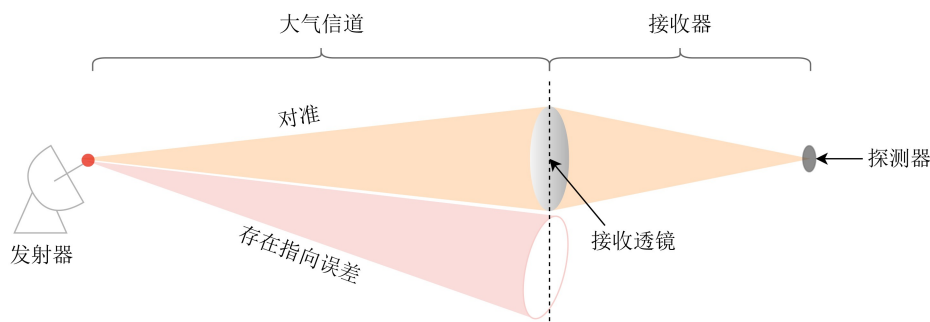


图2 指向误差示意图

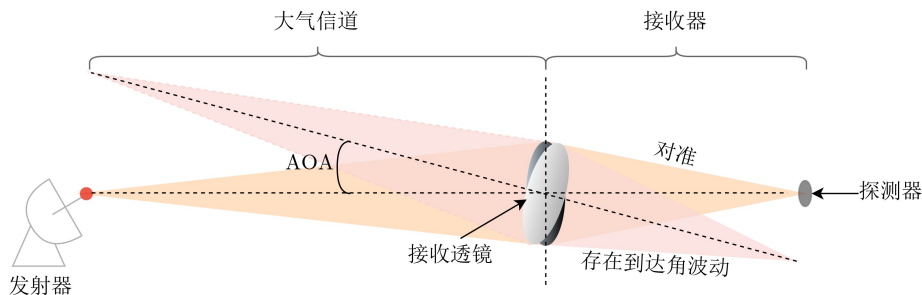


图3 到达角波动示意图

断概率、服务时间、吞吐量和遍历容量等性能指标来评价基于FSO的UAV通信网络的优劣。平均误码率体现了通信网络在一定时间内所传输数据的准确性。中断概率的一般概念为系统信噪比低于某一门限值时的概率，是衡量通信网络的常用度量准则<sup>[16]</sup>。中断概率越低，说明通信网络的可靠性和稳定性越高。在FSO通信中，中断概率有时也定义为光信号的入射功率小于接收器灵敏度的时间占传输总时长的百分比。此外，UAV的能量容量有限，且在飞行过程中很难为其充电或推进燃料，因此，在一些需要长时间运行提供服务支持的场景下(例如，交通监控、环境感知等)，UAV通信网络的服务时间也是衡量系统性能的重要指标之一。吞吐量表示在单位时间内传输的数据量，通常受到信道质量、调制方式、传输功率等因素的影响。遍历容量为通信网络能够同时处理和传输的最大数据量，相比于信道容量仅考虑了信道特性，遍历容量考虑到实际约束条件和性能优化等综合因素，是实际系统的有效容量。

#### 4.1 PAT瞄准捕获跟踪

由于激光信号具有窄波束特性，不精确的波束指向和跟踪将导致数据丢失或接收机处信号衰落，系统性能下降，因此，基于FSO的通信网络要求搭载发射端和接收端的两个平台上的光学元器件在通信过程中实时共视轴。而基于FSO的UAV通信网络对指向错误更加敏感，除了大气条件会对FSO信道造成影响外，UAV的飞行状态、由动态负载、机械振动和空气波动造成的UAV内部波动也会造成FSO收发机之间的指向不准。PAT系统作为无线光通信系统中不可或缺的一部分，在保证收发端光束精确对准、建立稳定光通信链路中发挥重要作用。在收发双方完成初始指向后，信号光和信标光经过合束镜后通过发射天线准直发射输出，由接收端的捕获装置开始扫描合成光束完成捕获工作；位于接收端的分束镜将经过接收端的光束分别引导至跟踪探测器和通信探测器；当光束照射在接收端探测器感光面上，在伺服机构的驱动下使收发两端视

轴瞄准；最后根据接收端实时反馈的光斑信息，粗跟踪结构调整光束的方向令其垂直入射探测器中心，精跟踪结构进一步消除未经粗跟踪结构消除的跟踪残差，保证收发两端视轴实时瞄准<sup>[17]</sup>。提高PAT瞄准捕获跟踪系统的性能，可以减少指向误差和信道噪声干扰，降低误码率和中断概率<sup>[12]</sup>。

关于FSO通信的PAT系统的研究成果丰富，但用于地面FSO通信或星地通信的PAT系统重量大，成本高，无法满足UAV荷载要求。文献<sup>[18]</sup>分类讨论了目前利用FSO通信链路在UAV和地面基站之间实现视距链路对准的各种跟踪方法，包括视觉跟踪方法和波束跟踪方法，并提出适用于基于FSO的UAV通信网络的PAT设备重量、尺寸、灵敏度的要求，指出在系统中应用机器学习方法对UAV进行视觉跟踪来提高系统性能的理想。文献<sup>[19]</sup>设计了低成本、轻量级的基于云台的PAT系统，该系统在UAV处于低速且具有适当的光束发散角时，能够保证前传链路具有较低的指向误差。文献<sup>[16]</sup>提出专用于无人机FSO通信的基于四象限光电二极管(Quadrant PhotoDiode, QPD)的PAT系统，该系统不需要额外的信标光子系统，降低结构复杂度的同时保证了跟踪效率，仿真结果表明，该系统能够实现50 m及1.25 Gbit/s全双工无误码通信，相比于未配备QPD的PAT系统跟踪性能提高约4.25倍。

#### 4.2 多输入多输出

多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术是空间多样性技术的一种，广泛应用于无线通信中，通过利用多个天线进行数据传输，从而提高系统的容量和可靠性。FSO系统中的MIMO技术与RF通信相似，在发射端采用多个发射孔径或在接收端使用多个光电探测器，通过空间复用减轻湍流引起的衰落效应。当视距链路中存在障碍物对光信号产生遮挡影响时，采用该方案，可以减轻接收端和发射端的信号中断对整体系统性能的影响。另外，在一个地面基站上安装多个光源阵列，可以传输来自不同空间角度的地对空信号，其中每个角度与特定的光源相关，该阵列能够同时向处于

不同位置的运动UAV以及发射视场内多个空间分离的UAV进行数据传输,从而提高链路可靠性,在中央单元处选择合适的发射孔径,可以实现接收信号的最大化<sup>[20]</sup>。

文献[21]基于第2类修正贝塞尔函数分析了MIMO-FSO信道在Gamma-Gamma衰落模型下的传输性能,并推导了系统增益的闭合表达式。文献[22]研究了不同天气条件(晴空、霾和雾)对信道性能的影响,考虑了不同的FSO系统模型,如单输入单输出、多输入多输出、波分复用多输入多输出以及使用Gamma-Gamma模型提出的双多输入多输出模型。仿真结果表明,在FSO系统中采用双多输入多输出技术,在接收端仍能实现准确传输数据的同时,得到了不同距离的品质因子。文献[23]采用阵列天线 $4 \times 4$ 系统和 $8 \times 8$ 系统在不同天气条件下对MIMO-FSO模型进行仿真,以误码率和Q因子为性能衡量指标,对比了两个系统之间的差异,得到 $8 \times 8$  MIMO-FSO系统具有更好的性能。使用更多的天线数可以使数据流同时通过多条路径传播,文献[24]对现有MIMO系统进行了扩展,采用大规模阵列天线,通过改变传输范围和光功率在不同天气条件下对大规模FSO MIMO模型进行仿真,并与 $4 \times 4$ 系统和 $8 \times 8$ 系统的性能进行对比,该模型能够以极低的发射功率传输数据,且数据传输速率显著提高。天线数增加一倍,获得相似系统性能所需要的源功率减少一半,大规模天线阵列能够提高数据传输速率,但大规模天线阵列的实现同时带来了系统复杂度增加、成本效率低等问题,因此,天线规模与系统设计之间的权衡十分重要。文献[25]通过悬停UAV作为解码转发平台与地面中央单元及多个用户进行通信,在地面中央单元处部署多个发射透镜并应用传输透镜选择技术,采用FSO方式与UAV平台相连,UAV平台通过MIMO RF链路与地面用户进行下行通信,推导了瞬时信噪比的闭合表达式,仿真结果表明该方案能够显著提高系统中断性能。

### 4.3 FSO/RF异构融合

FSO对大气湍流的影响十分敏感,在雨、雪、雾等天气情况下光信号的传输质量显著降低。RF通信技术的传输距离和传输质量受环境影响较小,但它的传输速率较低。由于RF和FSO通信都具有各自的局限性,因此,考虑将RF与FSO技术结合使用,通过灵活部署FSO/RF的混合模式,来提高系统可靠性。

FSO/RF混合系统有多种模式,如图4所示,一种是使用与FSO并行的RF作为备份链路,当FSO信道失效时能够保持连通性,如文献[26]考虑850 nm FSO系统做主链路,40 GHz毫米波做备份链路情况下天气对通信效果的影响。在这种情况下,RF链路作为在恶劣天气条件下偶尔使用的备份链路,建立永久性的并行设备无疑增大了建设成本并造成了基础设施的冗余,因此,文献[27]提出使用UAV建立临时RF链路为地面基站提供用户卸载,以实现FSO链路因恶劣天气条件不可靠时最大化网络吞吐量。在卫星通信中,文献[28]提出卫星根据上下文感知传感器实时探测的天气情况,选择RF或FSO信道或同时使用两个信道来传输信息。当同时使用两个信道时,在地面基站处通过选择合并技术对接收信号进行处理以最大化系统性能。文献[29]中接收地面用户信息的UAV通过基于交换机的混合链路与卫星连接,以最大化系统容量。另一种模式是根据通信场景的信道状态条件选择通信方式,组成双跳异构通信网络,如文献[30]首先使用FSO通信将室外基站的信号传输到UAV平台,再使用RF通信将UAV发送的信号传输给室内用户。文献[31]中UAV平台利用FSO链路接收回程终端信息并采用RF链路转发至用户终端,考虑到双跳混合链路之间传输速率的不平衡问题,通过UAV轨迹和传输方案设计来获得地面终端的最大吞吐量。还有一些研究采取RF用于传输控制信号、状态反馈信号和数据备份等低速数据,FSO用于传输高速数据的方式。表4给出了UAV辅助的FSO/RF混合通信网络的相关研究。

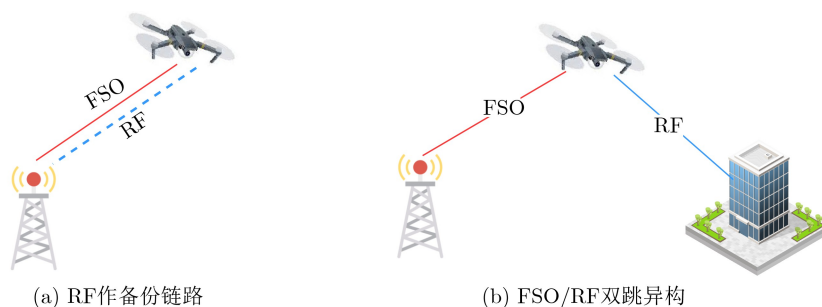


图4 基于FSO/RF混合的UAV通信网络

FSO/RF混合通信网络具有较高的灵活性，可以根据不同通信场景和需求进行选取和调整。实现高速可靠传输，需要对传输环境情况进行合理的预判，以选择合适的传输方式。文献[32]提出通过改进决策树方法对接收信号强度指示器的参数进行预测，根据预测参数进行RF和FSO之间的切换，为FSO/RF混合通信网络提供了可行性。天气情况是采用备份链路的FSO/RF混合系统通信方式选取的重要参考依据。文献[26]针对雾、雨、雪3种天气条件，分析了天气对FSO链路和RF链路的衰减影响，对混合通信网络的频率选取进行了研究，提出FSO和40GHz RF链路的组合在雾天表现出良好的效果。在根据通信场景选择通信方式的情况下，文献[30]提出在应急通信场景下，室内用户与UAV之间采用室内室外RF链路模型，室外基站与UAV之间采用空对地FSO链路模型，通过联合选址与资源分配优化算法对UAV的位置部署和功率分配进行联合优化，以在保证用户公平性并满足信息因果约束的同时达到系统最大吞吐量。在文献[33]中，UAV通过FSO链路与地面站通信，地面站通过RF方式为用户提供服务，作者提出一种应用于UAV FSO/RF

混合系统的自适应资源分配策略，分步解决用户资源分配、信道分配和功率分配，提高系统资源利用率并满足不同用户的数据速率需求。

#### 4.4 中继传输

FSO系统接收信号功率的随机波动随着传播距离的增加急剧增大，信源到信宿的距离越长，湍流导致的闪烁现象越明显，当链路距离超过几公里时，FSO系统的通信性能无法得到保证。因此，考虑通过在信源和信宿之间放置中继来减轻距离对FSO链路质量的影响，引发了关于中继辅助的FSO通信网络的相关研究<sup>[35]</sup>。如图5所示，使用UAV作为移动中继，与FSO通信技术相结合，可以根据信道环境动态地调整UAV的位置，减少位置限制对视距传输的约束，提高系统机动性，使其相比于传统地面固定中继更为灵活。FSO通信的激光信号在大气信道中传播受障碍物和大气湍流、雾、雨等环境的影响，导致信号衰减和中断，网络可靠性下降，而UAV中继可以通过航迹规划调整飞行高度和悬停位置，避开障碍物并选择最佳传输位置，降低中断概率，提高系统可靠性。此外，采用UAV中继可以扩展FSO通信的通信范围，并且由于UAV中继可以

表 4 UAV辅助的FSO/RF混合通信网络的系统模型

FSO/RF混合方式	文献	系统建模
备份传输	[27]	地面基站与宏基站通过FSO通信，在恶劣天气时采用RF通信。
	[28]	卫星根据传感器获得的天气状况选择RF或FSO链路，调整发射功率，与地面用户进行通信。
	[29]	用户向UAV发送信号，UAV通过基于交换机的混合FSO/RF链路和卫星连接。
双跳异构传输	[30]	室外基站通过FSO链路将信号传输给UAV，UAV通过RF将信号传输到室内用户。
	[31]	UAV利用FSO链路接收回程终端的信息，利用RF链路将信息转发到用户终端。
	[34]	固定信源到UAV采用FSO通信，UAV到固定目的节点采用RF通信。

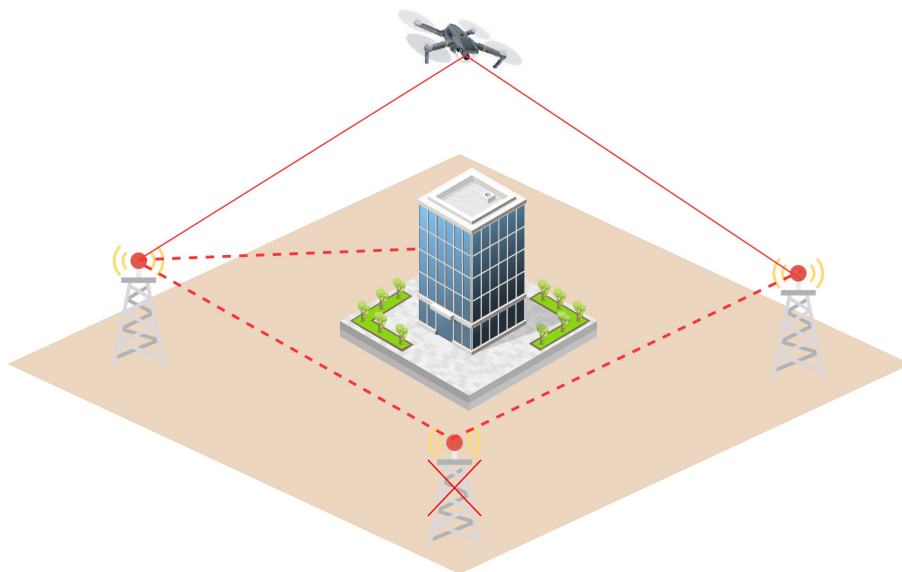


图 5 中继传输的基于FSO的UAV通信网络

根据实际需求快速灵活部署,因此采用UAV中继还能够提高网络的灵活性。

UAV需要根据实时的信道状态进行轨迹规划,以实现最佳的数据传输效果。对于单架UAV中继的FSO通信网络,UAV的部署位置对系统性能的好坏至关重要,而对于多UAV组网的FSO通信网络,则还需更多地考虑UAV之间的碰撞、干扰协作等因素的影响。文献[36]研究了可调参数对基于FSO的UAV通信网络性能的影响,推导出了中断概率最小时UAV中继的最优3维坐标和最优光束宽度,并证实了朝向波动强度、障碍物高度和位置等物理参数对UAV最优位置有显著影响。文献[37]在考虑信源和中继功率分配的约束条件下,通过迭代算法分别对功率分配和航迹规划进行优化,来实现最大化系统吞吐量。文献[38]在基于FSO的UAV通信网络中提出了一种考虑碰撞避免的多UAV航迹规划算法,通过图划分对UAV服务的地面终端进行划分,然后使用旅行商算法确定UAV经过地面终端的顺序,通过连续凸优化实现最小化UAV移动能量和最大化服务时间。文献[39]研究了在有限能量和FSO数据速率要求下飞行时间最大化的UAV轨迹问题,并采用二分法、序列规划和可行性检验算法寻求能量效率最大化和运行时间最小化的次优解,仿真结果表明,所提出的方案在服务时间方面表现出大约44.12%的增益。

#### 4.5 缓存辅助

UAV相对于用户和地面基站的位置以及UAV在悬停状态下的随机波动都会对FSO通信的质量产生影响,非缓存辅助中继从信源节点接收数据并立即转发到目的节点,而缓存辅助移动中继通过在UAV上添加缓存单元,对来自信源节点的数据进行存储和分发,如图6所示。由于与信源节点的距

离是时变的,缓存辅助移动中继可以利用有利的信道条件,选择在靠近地面节点、传输信道质量好时接收或发送数据来降低中断概率,提升通信网络服务质量。

文献[31]打破传统中继辅助FSO通信网络中静止、非缓存中继的基本假设,通过使用较小尺寸的缓存器获得了较高的系统性能增益,验证了在基于FSO的UAV通信网络中使用缓存辅助来改善系统性能的假设。文献[40]分析了在基于FSO的UAV通信网络中使用UAV作为缓存辅助中继和非缓存辅助中继的端到端系统性能,揭示了缓存辅助能够补偿UAV不稳定性引起的随机波动对链路质量造成的影响。文献[41]进行了能够适应FSO传输特性的缓存辅助协作协议的设计,该协议能够在中断概率、平均分组时延和系统复杂度之间实现权衡,并验证了为FSO中继配备缓存器来提升系统性能是以牺牲时延为代价的。在FSO/RF混合通信网络中,缓存辅助能够解决双跳链路数据传输速率不均衡的问题。文献[29]在RF和FSO混合通信网络中,考虑到FSO链路和RF链路之间速率的不平衡,在UAV端使用了缓存辅助,并在缓存约束下,以最大化能量效率为目标进行了UAV航迹规划,综合考虑了多方面的性能提升方案。文献[42]在多用户FSO/RF混合通信网络中,提出一种通过虚拟MIMO系统实现复用增益的传输协议,通过在中继节点配备物理缓存器对用户数据进行时序存储,实现在中继到信宿链路达到最佳信道条件时进行传输。文献[43]在并行混合RF/FSO中继信道中根据中继是否配备缓存器进行了中继选择策略和最优时间分配策略的推导,在具有缓存辅助的情况下考虑了时延约束,以提高系统吞吐量为目标,根据所有可用的FSO和RF链路的瞬时信道状态信息选择接收/发送的最优中继。

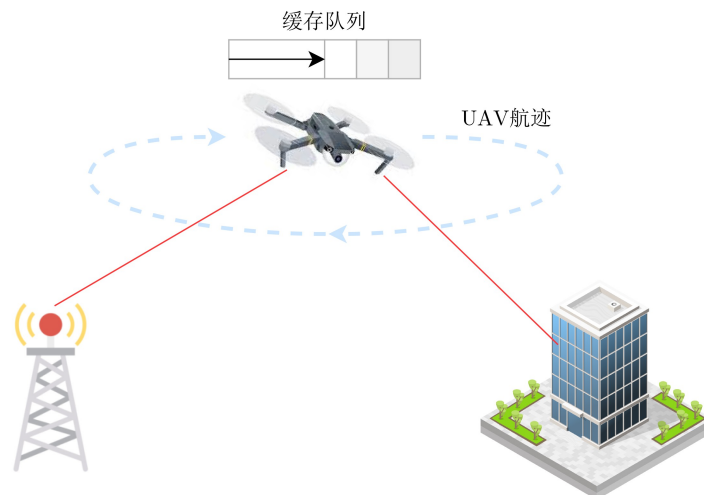


图6 缓存辅助的基于FSO的UAV通信网络



## 5 基于FSO的UAV通信网络发展趋势分析

随着物联网技术与生产生活的深度结合，海量终端设备的接入极大扩展了人们的通信需求。因此，提升用户体验、实现泛在覆盖、加速万物智联已成为下一代无线通信网络面向“全频谱”“全覆盖”“全应用”的建设目标。空天地一体化网络得益于高度融合、全域覆盖以及可持续发展等特点，作为下一代无线通信网络建设的重要支撑，已成为国家发展战略需求。基于FSO的UAV通信网络凭借其灵活组网、高速传输、强抗干扰等突出优势，成为空天地一体化的关键手段。然而，由于环境的高动态性对网络的自适应能力提出了更高的要求，UAV的高移动性提高了通信链路对准的难度，UAV机载资源的有限造成了对网络稳定性的挑战，基于FSO的UAV通信网络仍存在较大的发展空间。结合目前的研究现状以及面临的挑战，本文对基于FSO的UAV通信网络的发展趋势进行了分析。

### 5.1 环境高动态性对网络自适应能力的挑战

基于FSO的UAV通信网络在实际应用中将面临复杂的高动态环境，在这种情况下，通信系统仅在人为设计的程序范围内进行决策、解决预设情境中存在的问题，将存在较大的局限性。而现有文献中有关基于FSO的UAV通信网络的研究大多处于理论研究层面，尚未通过实验验证，关于系统性能的分析与优化建立在作者预设的场景中，环境变化与系统参数相对固定，系统不具备针对网络高动态性的自适应能力。针对上述系统局限性，具备自主决策及应对突发情况能力的“强智能”通信系统被视为有效的解决方案。

基于FSO的UAV通信网络的强智能主要体现在根据环境的变化进行自适应调控，例如，根据信道状态信息(Channel State Information, CSI)及信号传输预测对收发器的仰角、UAV中继的位置、轨迹等进行自适应调整以提高通信速率及通信服务质量。提高网络的自适应能力，首先需要具备对环境变化的判断能力。6G移动通信的诞生推动了通信感知一体化(Integrated Sensing and Communication, ISAC)发展，ISAC即在无线感知技术中将通信网络整体视为传感器，无需额外部署专用的传感器，利用环境中已有的无线信号(声、光、射频信号等)，在其完成本职工作(照明、通信等)的同时，通过信号的直射、反射和散射等物理现象，分析无线信号在传播过程中的变化，来感知行为和环境，提供高精度定位。该技术或可应用于基于FSO的UAV通信网络，通过环境感知获得CSI来预判环境

的变化，根据CSI进行环境重构，帮助提升通信性能，实现“感知辅助通信”。ISAC辅以高效、准确的软件算法，可以实现对UAV最优悬停位置、收发器仰角等可调参数的自适应调整，以提高通信网络的稳定性。软件算法层面，神经网络在模型训练方面的能力近来已经在大模型文本生成方面得到了广泛的认可，通过正确的训练和调优，神经网络在通信自适应调控算法方面取得大幅进展毋庸置疑。但基于FSO的UAV通信网络的数据变化快，获取难度高，模型训练困难，因此可以结合小样本学习方法以获得更具泛化能力的模型。由于基于量子力学原理的人工智能算法能够以指数级的速度解决决策树问题，提高UAV自主决策的响应速度，因此，利用量子计算的指数加速特性，量子人工智能算法也具备为对基于FSO的UAV中继自适应调控技术赋能的潜力。此外，在大规模多UAV集群协同中继通信场景下，应用UAV作为多智能体，借助FSO技术与其他UAV进行交互，通过信息共享获得调整自身行为的策略，进行自主路径规划、资源分配、群体调度和决策，被视为实现更加全面、智能的通信覆盖的可行方案。

### 5.2 无人机高移动性对视距链路对准的挑战

FSO通信具有窄波束特性，对收发端视距链路的对准提出了较高的精度要求，但大气湍流、指向误差以及到达角波动的存在，导致了视距连接的不稳定。目前广泛采取的方式为通过更加精密的PAT系统来提升对准精度。然而，UAV的高移动性以及机身的物理振荡提高了激光信号对准的难度，增大了链路中断的概率，造成了网络连接的不可靠，而基于FSO的UAV通信在军事领域以及民用应急通信等领域的应用需求对网络的可靠性提出了较高的要求，因此，基于FSO的UAV通信网络急需达成“高可靠”发展目标。

智能反射面(Intelligent Reflecting Surface, IRS)在无线通信中已经体现出了广泛的应用价值，例如，当用户之间无法达成视距链路时通过IRS制造出反射链路使用户仍能接收到信号、在远距离信号传输过程中通过IRS增强传输效果。将基于FSO的UAV通信网络与IRS相结合，通过IRS机械转轴自适应地控制反射光束的方向，能够实现更精确的对准，放宽系统对光束对准的要求，增强系统的可靠性。此外，上文提到的ISAC技术可以通过环境感知提供接收透镜的高精度定位，也能够对视距链路的对准起到辅助作用。

### 5.3 无人机机载资源有限对网络稳定的挑战

UAV的承载能力十分有限，自身及其载荷的

质量和体积都会影响电池能耗,进而影响UAV中继的续航能力,UAV中继的切换将导致通信链路的短暂中断,而基于FSO的UAV通信网络需要UAV中继保证长时间稳定传输,对机载激光通信荷载和能耗都提出了较高的要求。因此,“长续航”将成为基于FSO的UAV通信网络的发展趋势。

实现长续航的解决思路大致可以分为两个方向,即减轻UAV荷载以减小能耗以及在通信过程中对UAV赋能。减轻UAV荷载可以通过对激光通信设备进行轻小型化设计以节省搭载空间、减小UAV飞行能耗,同时可以提高UAV姿态调整的轻巧性,降低中断概率。轻小型化设计可以从UAV的整机结构设计、光路设计、结构材料以及机载激光通信系统一体化集成设计方面着手研究。例如,通过拓扑优化在给定负载情况、约束条件对给定区域内材料分布进行优化。为UAV赋能则可以通过配备太阳能电池,在悬停辅助通信过程中通过太阳能充电来提高续航能力。此外,激光无线能量传输技术被视为解决轻小型UAV续航问题的潜在解决方案,该技术通过激光器将电能转换成激光并由光学系统准直照射到激光电池上,激光电池将激光光能转换成电能。由于FSO通信同样利用激光作为传输媒介,收发端及UAV中继已经配备有激光收发设备及PAT系统,激光无线能量传输可在复用现有设备的基础上进行添加与改进,降低硬件成本同时减小荷载空间。同时,设计UAV节能飞行控制算法,通过航迹规划以及对飞行速度和姿态的控制,最大限度地减少飞行阻力和能耗也可作为实现长续航目标的一种思路。

综上所述,针对基于FSO的UAV通信网络所面临的环境高动态性对网络自适应能力的挑战、无人机高移动性对视距链路对准的挑战、无人机机载资源有限对网络稳定的挑战,我们分析出基于FSO的UAV通信网络强智能、高可靠以及长续航3个发展趋势,并提供了相应的技术预测。

## 6 结束语

基于FSO的UAV通信网络是未来通信技术的一个重要研究方向,大气信道环境以及激光信号的对准是影响该网络性能的两个主要因素。本文对提高网络性能的相关关键技术进行了梳理与概括,PAT系统和MIMO技术可以降低对准要求对网络传输性能的影响,FSO/RF混合系统、UAV中继、缓存辅助则可以降低大气信道条件对信号传输质量的影响。最后从高可靠、强智能和长续航3个角度进行了展望,为今后的研究提供参考和借鉴。

## 参考文献

- [1] GUO Wenjing, ZHAN Yueying, TSIFTSIS T A, *et al.* Performance and channel modeling optimization for hovering UAV-assisted FSO links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(15): 4999–5012. doi: [10.1109/JLT.2022.3176352](https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3176352).
- [2] SINGH D and SWAMINATHAN R. Comprehensive performance analysis of hovering UAV-based FSO communication system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(5): 7352013. doi: [10.1109/JPHOT.2022.3205704](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3205704).
- [3] JANJI S, SAMORZEWSKI A, WASILEWSKA M, *et al.* On the placement and sustainability of drone FSO backhaul relays[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(8): 1723–1727. doi: [10.1109/LWC.2022.3178546](https://doi.org/10.1109/LWC.2022.3178546).
- [4] CHLESTIL C, LEITGEB E, SCHMITT N P, *et al.* Reliable optical wireless links within UAV swarms[C]. Proceedings of 2006 International Conference on Transparent Optical Networks, Nottingham, UK, 2006: 39–42. doi: [10.1109/ICTON.2006.248491](https://doi.org/10.1109/ICTON.2006.248491).
- [5] ZENG Yong, ZHANG Rui, and LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(5): 36–42. doi: [10.1109/MCOM.2016.7470933](https://doi.org/10.1109/MCOM.2016.7470933).
- [6] SHAKHATREH H, SAWALMEH A H, AL-FUQAHA A, *et al.* Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 48572–48634. doi: [10.1109/ACCESS.2019.2909530](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530).
- [7] XU Guanjun, ZHANG Ning, XU Maozhe, *et al.* Outage probability and average BER of UAV-assisted dual-hop FSO communication with amplify-and-forward relaying[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(7): 8287–8302. doi: [10.1109/TVT.2023.3252822](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3252822).
- [8] LI Jia, LIU Jingchong, LU Qi, *et al.* Optical communication using subcarrier PSK intensity modulation through atmospheric turbulence channels[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(6): 1267. doi: [10.1109/TCOMM.2007.901509](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2007.901509).
- [9] CHOI M, SONG S, KO D E, *et al.* Trajectory optimization for FSO based U-IoT backhaul networks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2023, 10(4): 2030–2044. doi: [10.1109/TNSE.2023.3239060](https://doi.org/10.1109/TNSE.2023.3239060).
- [10] BASHIR M S and ALOUINI M S. Energy optimization of a laser-powered hovering-UAV relay in optical wireless backhaul[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(5): 3216–3230. doi: [10.1109/TWC.2022.3216797](https://doi.org/10.1109/TWC.2022.3216797).
- [11] SAXENA P and 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. doi: [10.1109/TVT.2023.3246817](https://doi.org/10.1109/TVT.2023.3246817).
- [12] BORAH D K and VOELZ D G. Pointing error effects on free-space optical communication links in the presence of atmospheric turbulence[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(18): 3965–3973. doi: [10.1109/JLT.2009.2022771](https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2022771).
- [13] MAI V V and KIM H. Beam size optimization and adaptation for high-altitude airborne free-space optical communication systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(2): 7902213. doi: [10.1109/JPHOT.2019.2901952](https://doi.org/10.1109/JPHOT.2019.2901952).
- [14] DABIRI M T, SADOUGH S M S, and KHALIGHI M A. Channel modeling and parameter optimization for hovering UAV-based free-space optical links[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(9): 2104–2113. doi: [10.1109/JSAC.2018.2864416](https://doi.org/10.1109/JSAC.2018.2864416).
- [15] MA Yang, WANG Jinyuan, WANG Junbo, *et al.* Outage performance analysis and parameter optimization of hovering UAV-based FSO system[C]. 2020 IEEE International Conference on Communications, Dublin, Ireland, 2020: 1–6. doi: [10.1109/ICC40277.2020.9149422](https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149422).
- [16] DABIRI M T, KHANKALANTARY S, PIRAN M J, *et al.* UAV-assisted free space optical communication system with amplify-and-forward relaying[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(9): 8926–8936. doi: [10.1109/TVT.2021.3098389](https://doi.org/10.1109/TVT.2021.3098389).
- [17] LIANG Jingyuan, CHEN Ruidong, YAO Haifeng, *et al.* Research progress of acquisition, pointing and tracking in optical wireless communication system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(8): 210439. doi: [10.12086/oe.2022.210439](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210439).
- [18] ABDELFAH R, ALSHAER N, and ISMAIL T. A review on pointing, acquisition, and tracking approaches in UAV-based fso communication systems[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(9): 571. doi: [10.1007/s11082-022-03968-2](https://doi.org/10.1007/s11082-022-03968-2).
- [19] SUN Xiang, ZHANG Tianrun, SHAO Sihua, *et al.* Low cost ATP system design for free space optics based drone assisted wireless networks[C]. Proceedings of 2022 IEEE Globecom Workshops, Rio de Janeiro, Brazil, 2022: 891–896. doi: [10.1109/GCWkshps56602.2022.10008619](https://doi.org/10.1109/GCWkshps56602.2022.10008619).
- [20] PARK S, YEO C I, HEO Y S, *et al.* Tracking efficiency improvement according to incident beam size in QPD-based PAT system for common path-based full-duplex FSO terminals[J]. *Sensors*, 2022, 22(20): 7770. doi: [10.3390/s22207770](https://doi.org/10.3390/s22207770).
- [21] JAHID A, ALSHARIF M H, and 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. doi: [10.1016/j.jnca.2021.103311](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2021.103311).
- [22] BAYAKI E, SCHOBBER R, and MALLIK R K. Performance analysis of MIMO free-space optical systems in gamma-gamma fading[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2009, 57(11): 3415–3424. doi: [10.1109/TCOMM.2009.11.080168](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2009.11.080168).
- [23] SINGH P K, SINGH Y, KOLEKAR M H, *et al.* Recent Innovations in Computing: Proceedings of ICRIC 2020: Vol. 701[M]. Singapore: Springer, 2021: 73–84. doi: [10.1007/978-981-15-8297-4](https://doi.org/10.1007/978-981-15-8297-4).
- [24] HASAN S M A, AHMED S, and NAZRUL ISLAM A K M. Simulation of a massive MIMO FSO system under atmospheric turbulence[C]. The 5th International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology, Dhaka, Bangladesh, 2021: 1–6. doi: [10.1109/ICEEICT53905.2021.9667905](https://doi.org/10.1109/ICEEICT53905.2021.9667905).
- [25] MICHAELIDIS E T, BITHAS P S, NOMIKOS N, *et al.* Outage probability analysis in multi-user FSO/RF and UAV-enabled MIMO communication networks[J]. *Physical Communication*, 2021, 49: 101475. doi: [10.1016/j.phycom.2021.101475](https://doi.org/10.1016/j.phycom.2021.101475).
- [26] NADEEM F, KVICERA V, AWAN M, *et al.* Weather effects on hybrid FSO/RF communication link[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, 27(9): 1687–1697. doi: [10.1109/JSAC.2009.091218](https://doi.org/10.1109/JSAC.2009.091218).
- [27] NAFEES M, HUANG S J, THOMPSON J, *et al.* Backhaul-aware user association and throughput maximization in UAV-aided hybrid FSO/RF network[J]. *Drones*, 2023, 7(2): 74. doi: [10.3390/drones7020074](https://doi.org/10.3390/drones7020074).
- [28] YAHIA O B, ERDOGAN E, KURT G K, *et al.* A weather-dependent hybrid RF/FSO satellite communication for improved power efficiency[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2022, 11(3): 573–577. doi: [10.1109/LWC.2021.3136444](https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3136444).
- [29] KONG Huacong, LIN Min, ZHANG Jian, *et al.* Ergodic sum rate for uplink NOMA transmission in satellite-aerial-ground integrated networks[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(9): 58–70. doi: [10.1016/j.cja.2021.10.039](https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.10.039).
- [30] GUO Zinan, GAO Wei, YE Haijun, *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. doi: [10.3390/s23052541](https://doi.org/10.3390/s23052541).
- [31] LEE J H, PARK K H, KO Y C, *et al.* Throughput maximization of mixed FSO/RF UAV-aided mobile relaying with a buffer[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(1): 683–694. doi: [10.1109/TWC.2020.3028068](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3028068).
- [32] LAPČÁK M, OVSEŇÍK L, ORAVEC J, *et al.* Investigation of machine learning methods for prediction of measured values of atmospheric channel for hybrid FSO/RF system[J]. *Photonics*, 2022, 9(8): 524. doi: [10.3390/photonics](https://doi.org/10.3390/photonics)

- 9080524.
- [33] ZHU Pengfei, ZHANG Jiawei, GAO Zhengguang, *et al.* Adaptive resource allocation in FSO/RF multiuser system with proportional fairness for UAV application[J]. *Optical Switching and Networking*, 2019, 33: 41–48. doi: [10.1016/j.osn.2018.12.003](https://doi.org/10.1016/j.osn.2018.12.003).
- [34] LU Rongrong, MA Yang, LIN Shenghong, *et al.* Energy-efficient trajectory optimization for UAV-based hybrid FSO/RF communications with buffer constraints[J]. *Entropy*, 2021, 23(12): 1596. doi: [10.3390/e23121596](https://doi.org/10.3390/e23121596).
- [35] FAWAZ W, ABOU-RJEILY C, and ASSI C. UAV-aided cooperation for FSO communication systems[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2018, 56(1): 70–75. doi: [10.1109/MCOM.2017.1700320](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700320).
- [36] DABIRI M T and SADOUGH S M S. Optimal placement of UAV-assisted free-space optical communication systems with DF relaying[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(1): 155–158. doi: [10.1109/LCOMM.2019.2949274](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2019.2949274).
- [37] JIANG Xu, WU Zhliu, YIN Zhendong, *et al.* Power and trajectory optimization for UAV-enabled amplify-and-forward relay networks[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 48688–48696. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2867849](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2867849).
- [38] 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. doi: [10.1109/JSAC.2021.3088665](https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3088665).
- [39] LEE J H, PARK K H, KO Y C, *et al.* A UAV-mounted free space optical communication: Trajectory optimization for flight time[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(3): 1610–1621. doi: [10.1109/TWC.2019.2955475](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2955475).
- [40] 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. doi: [10.1109/OJCOMS.2020.2969492](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.2969492).
- [41] ABOU-RJEILY C and FAWAZ W. Buffer-aided relaying protocols for cooperative FSO communications[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2017, 16(12): 8205–8219. doi: [10.1109/TWC.2017.2759107](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2759107).
- [42] 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. doi: [10.1364/JOCN.10.000309](https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000309).
- [43] NAJAFI M, JAMALI V, and SCHOBBER R. Optimal relay selection for the parallel hybrid RF/FSO relay channel: Non-buffer-aided and buffer-aided designs[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(7): 2794–2810. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2686868](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2686868).
- 冯斯梦: 女, 副研究员, 研究方向为无线光通信技术、无人机通信网络、天地一体智能信息网络等。
- 赵一迪: 女, 硕士生, 研究方向为无线光通信技术、无人机通信网络等。
- 董超: 男, 教授, 研究方向为无人机蜂群自组织网络、空天地一体物联网、边缘网络智能、无人机协同智能应用等。
- 吴启晖: 男, 教授, 研究方向为认知科学与应用、认知信息论、天地一体化智能信息网络、电磁空间频谱认知智能管控等。

责任编辑: 马秀强