

## Hybrid RF/FSO Transmission Technologies and Development Trends for 6G Space-Air-Ground Integrated Networks

WU Qihui<sup>1</sup>, FENG Simeng<sup>1\*</sup>, WANG Wanting<sup>1</sup>, FANG Zhenghao<sup>1</sup>, LIU Xiaoli<sup>1</sup>, LI Baolong<sup>2</sup>, DONG Chao<sup>1</sup>

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** To meet the demands for comprehensive three-dimensional coverage and massive connectivity in sixth generation of communication system (6G), establishing a space-air-ground integrated networks (SAGIN) has become a crucial development direction. However, both standalone radio frequency (RF) and free-space optical (FSO) communication technologies have inherent limitations, making it challenging for either to independently fulfill the future network's comprehensive requirements for ultra-high speed, ultra-high reliability, and wide-area dynamic access. Against this backdrop, integrating the complementary advantages of RF and FSO communications to build an intelligent and cooperative hybrid RF/FSO transmission network for SAGIN has become a key pathway to overcoming current technological bottlenecks. This paper provides a systematic review of domestic and international research advancements in this field, proposing an integrated optical and RF for cognitive software defined network architecture for SAGIN. It focuses on channel modeling methodologies for RF and FSO links applicable to heterogeneous space-air-ground environments, whilst conducting an in-depth analysis of core challenges including high-dynamic link precision alignment, intelligent allocation of heterogeneous resources, and robust transmission under extreme conditions. The paper then elaborates on key enabling technologies such as hybrid RF/FSO beam tracking, adaptive RF/FSO switching, parallel collaborative transmission, and scenario-specific link selection. Future research trends are also outlined, encompassing deep integration of intelligent algorithms, enhancement of cross-domain disturbance-resistant transmission, and holistic system performance optimization. Studies demonstrate that hybrid RF/FSO technology can significantly improve the overall performance of SAGIN. Nevertheless, its path towards large-scale application necessitates further in-depth research on cross-layer coordination mechanisms, dynamic resource management, and system-level performance evaluation.

### Highlights:

1. This paper proposes an integrated optical and RF for cognitive software defined network architecture, which integrates cognitive awareness, software-defined control, and heterogeneous RF/FSO transmission into a unified framework for efficient network management and dynamic optimization in SAGIN.
2. A systematic review is conducted on channel modeling, core challenges, and key technologies for hybrid RF/FSO SAGIN, and future research directions are identified.

**Key words:** 6G; space-air-ground integrated networks (SAGIN); hybrid RF/FSO communications

---

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (Nos.62471223, 62201275); Jiangsu Province Frontier Leading Technology Basic Research Project (No.BK20222013).

**Received:** 2026-01-09; **Revised:** 2026-03-11

**\*Corresponding author, E-mail:** simeng-feng@nuaa.edu.cn.

# 面向6G空天地一体化网络的光电融合传输技术与发展趋势

吴启晖<sup>1</sup>, 冯斯梦<sup>1</sup>, 王婉婷<sup>1</sup>, 方正皓<sup>1</sup>, 刘小利<sup>1</sup>, 李宝龙<sup>2</sup>, 董超<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 211106; 2. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 南京 210044)

**摘要:** 面向第六代移动通信(Sixth generation of communication system, 6G)网络全域立体覆盖与海量连接的需求, 构建空天地一体化的高效传输体系已成为重要发展方向。然而, 单一射频(Radio frequency, RF)或自由空间光(Free-space optical, FSO)通信技术均存在固有局限, 难以独立满足未来网络对超高速率、超高可靠与广域动态接入的综合要求。在此背景下, 融合RF与FSO通信的互补优势构建智能协同的空天地一体化光电融合传输网络成为突破现有技术瓶颈的关键路径。本文系统综述了该领域的国内外研究进展, 针对空天地一体化网络特征构建了基于光电融合的认知软件定义网络体系架构, 重点阐述了适用于空天地异构环境的RF信道与FSO信道建模方法, 深入剖析了高动态链路精准对准、异构资源智能分配、极端环境鲁棒传输等核心挑战。进而, 围绕光电融合波束跟踪、自适应光电切换、光电并行协同传输及场景化链路选择等关键技术进行了详细论述。最后, 展望了智能算法深度赋能、跨域抗扰动传输增强以及效能综合优化等未来发展趋势。研究表明, 光电融合技术能够有效提升空天地一体化网络的综合性能, 但其走向规模化应用仍需在跨层协同机制、动态资源管控及系统级效能评估等方面持续深化研究。

**关键词:** 6G; 空天地一体化网络; 光电融合通信

**中图分类号:** V1 **文献标志码:** A

**引用格式:** 吴启晖, 冯斯梦, 王婉婷, 等. 面向6G空天地一体化网络的光电融合传输技术与发展趋势[J]. 数据采集与处理, 2026, 41(2): 288-302. WU Qihui, FENG Simeng, WANG Wanting, et al. Hybrid RF/FSO transmission technologies and development trends for 6G space-air-ground integrated networks[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2026, 41(2): 288-302.

## 引言

面向第六代移动通信技术(Sixth generation of communication system, 6G)的演进, 构建具备超大带宽、超低时延、超高可靠与全域立体覆盖能力的无线通信系统已成为必然发展趋势<sup>[1-3]</sup>。在空天地一体化网络(Space-air-ground integrated networks, SAGIN)架构下, 实现天基、空基与地面网络的高效融合与智能协同对无线传输技术提出了前所未有的多维挑战。当前, 以射频(Radio frequency, RF)技术为核心的无线网络虽已广泛应用, 但面临频谱资源日趋紧张、难以独立承载未来海量连接与跨域协同传输需求的根本性局限。自由空间光(Free-space optical, FSO)通信技术凭借其频谱资源丰富、传输容量巨大、抗电磁干扰及保密性强等显著优势, 被视为突破传统RF容量瓶颈、构建空天地一体化高速传输链路的重要技术途径<sup>[4-5]</sup>。然而, FSO通信系统在实际部署中受限于严格的视距传输条件, 其性能易受大气湍流、恶劣天气等空间环境因素的显著影响, 且对高动态平台间的终端对准精度极为敏感, 制约了

其在空天地一体化场景中的规模化可靠应用。

为克服单一技术的固有限制,在SAGIN框架下融合RF与FSO通信的互补优势,构建协同智能的光电混合传输系统,正成为实现跨域高效连接与性能跨越式提升的关键方向[6]。RF链路在非视距覆盖、移动性支持与抗降雨衰减等方面具有良好鲁棒性,而FSO链路则可提供极高的传输带宽与极低的传播时延,特别适合星间、星地等远距离高速骨干传输[7]。研究表明,两种链路在空天地异构环境下的衰落特性呈现出显著的统计互补特征,例如在对流层浓雾天气导致FSO链路衰减严重时,RF链路仍可维持基本连通;而在强降雨影响高频段RF链路性能时,FSO链路所受干扰相对有限[8]。通过面向SAGIN的智能化链路管理、自适应切换与协同传输机制,可实现在复杂动态跨域环境下系统整体链路可用性与传输效率的显著提升。

深入开展空间层、临近空间、对流层及近地等多重异构环境的空天地一体化光电混合传输机理、关键技术与组网方法研究,对构建高效、可靠、智能的下一代综合通信网络具有重要理论与工程价值。典型的SAGIN架构如图1所示。本文围绕空天地一体化场景,构建光电融合的认知软件定义网络(Integrated optical and radio frequency for cognitive software defined network, IOR-CSDN)体系架构,系统梳理SAGIN的光电信道建模方法,剖析融合系统在跨域部署中面临的核心技术挑战,总结关键使能技术的研究进展,并对未来发展趋势进行展望,以期为该领域的进一步研究与实践提供参考。

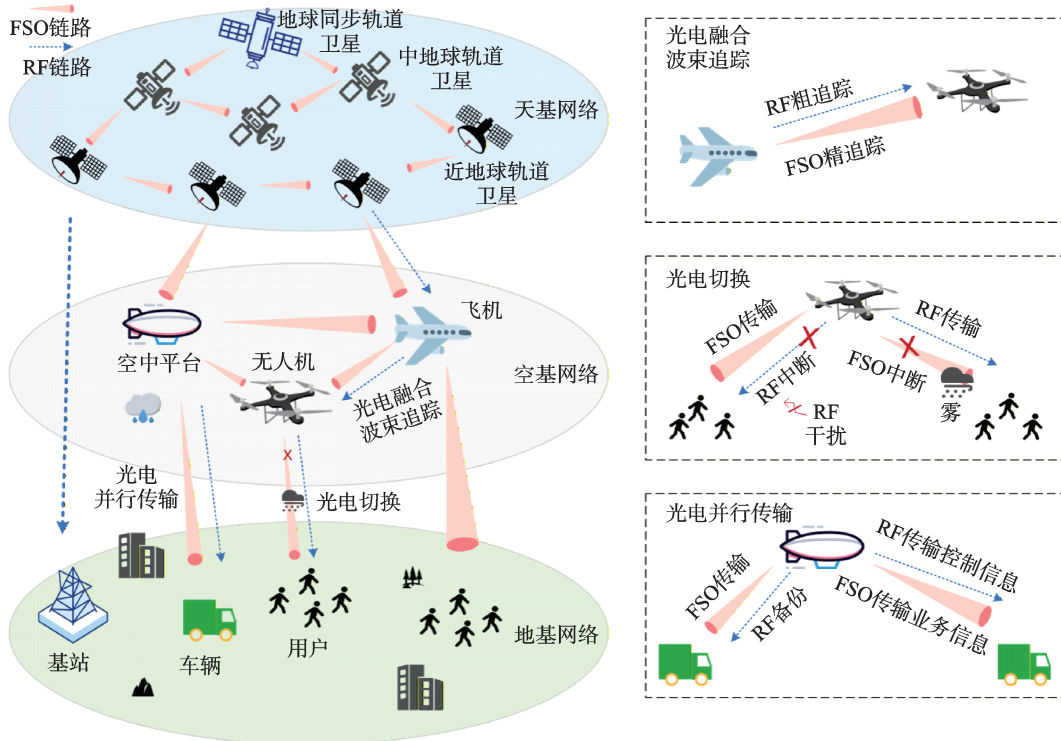


图1 SAGIN示意图  
Fig.1 SAGIN diagram

### 1 光电融合的认知软件定义网络体系架构

面向6G的SAGIN因其拓扑结构的动态演化与通信、计算资源的异构分布,对传统静态或完全分布式管理方法构成严峻挑战。天基、空基与地面网络间拓扑的快速变化,叠加异构资源的非均匀分布,

使得传统管理方法难以实现全局资源的高效协同。软件定义网络(Software defined network, SDN)通过控制平面与数据平面的解耦,并借助逻辑集中的可编程控制器实现对网络的统一管控,为上述问题提供了可行的技术基础<sup>[9-10]</sup>。在该架构中,控制功能集中于SDN控制器,其部署可灵活分布于地面基站、卫星或无人机等节点,以支撑网络的整体协同与优化<sup>[11]</sup>。然而,在SAGIN所特有的大规模、高动态、多域协同复杂场景下,传统SDN架构在感知实时性、决策适应性与传输可靠性方面仍面临局限。特别是空天地网络中节点运动速度快、拓扑变化频繁、信道条件异构且时变,要求控制平面不仅需具备集中式逻辑,更应拥有对物理层传输状态的深度认知与动态响应能力。为此,本文在SDN集中控制架构的基础上引入认知能力,并融合光电混合传输的技术优势,提出一种IOR-CSDN体系架构。该架构通过分层设计明确各模块的感知与协同职责,通过双链路机制保障感知信息与控制指令的可靠传递,并依托分布式控制实现节点间的动态协同,最终构建“环境感知-信息融合-全局决策-节点执行”的完整链路。

如图2所示,IOR-CSDN的体系架构采用三层网络结构,自上而下依次为应用层、控制层与数据层。应用层主要承载用户服务应用及功能扩展模块;控制层与数据层通过解耦网络数据转发与控制功能实现协同运作。该架构采用数控分离策略,使数据层仅负责执行控制层下发的规则与命令,无需感知网络拓扑或资源状态,从而显著提升网络处理效率。各层对应特定的感知功能模块与网络节点,通过职责划分与信息闭环,实现感知资源的高效协同。三层架构的协同逻辑体现于信息传递的精准性与链路功能的差异化设计。应用层的需求指令通过北向接口定向传输至控制层的任务解析模块;数据层的感知数据经由FSO高速业务链汇聚至控制层的态势融合模块;控制层的决策指令则通过RF高可靠控制链分发至数据层的执行模块。该架构进一步支持控制链与业务链的功能分离与智能切换,依据网络状态自适应选用光电融合链路,在保障控制指令高可靠传输的前提下,优先采用FSO链路提升业务数据传输效率,从而实现链路资源的动态优化配置。上述“需求-感知-决策-执行”闭环机制清晰界定了各感知模块与网络节点的职责分工,为协同感知动态系统模型的构建提供了结构基础,并为SAGIN在多域异构环境下的高效管控奠定了技术支撑。

## 2 面向SAGIN的光电信道模型

精确的信道表征是进行空天地一体化光电融合通信网络性能评估、协议优化及系统设计的理论基础,对保障网络性能至关重要。由于网络节点涵盖卫星、高空平台、无人机及地面终端,信号传输需经历深空、临近空间、对流层及近地等差异显著的物理环境,并受到大气、地形、平台动态等多种因素的复杂影响,因此针对RF与FSO建立准确、实用的信道模型,是进行可靠系统仿真与算法验证的关键前

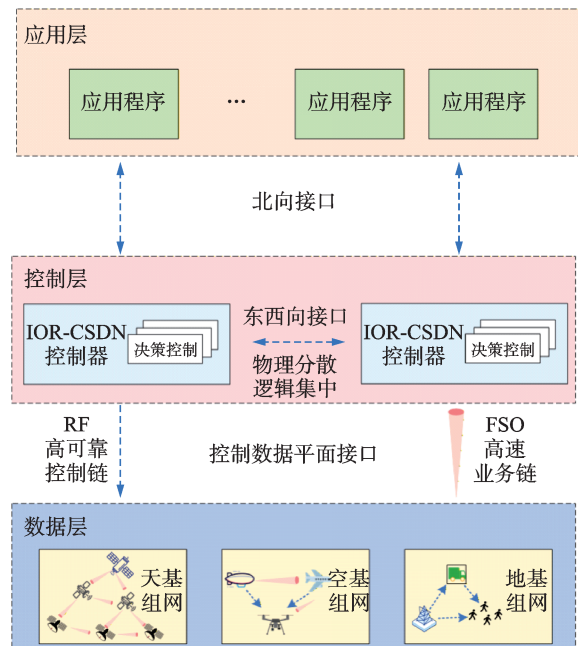


图2 IOR-CSDN体系架构

Fig.2 Architecture of IOR-CSDN

提<sup>[12]</sup>。本节将分别对RF信道与FSO信道的建模方法进行阐述。

## 2.1 RF信道模型

RF信道建模旨在刻画电磁波在空天地复杂介质中传播时所经历的衰减、畸变与起伏<sup>[13-14]</sup>。不同空天地链路的传播环境与影响因素差异显著,当前研究主要针对空-空、空-地、空-天这3类典型RF链路场景分别构建信道模型。

### (1)空-空链路信道模型

在空-空链路场景中,信道特性主要受环境条件、空中节点相对运动状态、视距对准精度及地面反射等因素影响。随着低空智联网的快速发展,低空空域呈现出节点密集、运动模式复杂、障碍物随机分布等特征。在此环境下,低空无人机平台固有的姿态抖动、快速机动性以及由编队协同飞行所引发的动态拓扑变化,对通信链路的稳定性、时延与可靠性均构成显著影响。因此,当前针对空-空链路的信道建模研究,尤其侧重于无人机间链路的信道精细化表征,以支撑高动态环境下的可靠通信设计<sup>[15]</sup>。现有建模方法可分为确定性方法与统计方法两类。确定性方法通过引入特定环境参数因子来刻画衰落效应,例如在无人机集群网络场景中,文献[16]综合考虑了路径损耗、阴影衰落与多径反射这3类因素对链路衰落的影响,并据此选取了相应的模型参数。统计方法则侧重于对信道随机特性的数学描述,例如文献[17]提出了一种适用于任意仰角的双柱面广义边界层空间模型,用以表征无人机间链路的莱斯衰落信道,该模型能够有效捕捉无人机任意仰角及垂直运动引入的信道特征,适用于多种通信场景。

### (2)空-地链路信道模型

在空-地链路场景中,空中节点与地面节点间的通信通常以视距传播为主,其视距链路的建立概率高度依赖于具体的传播环境,尤其受地面障碍物分布密度及空中节点位置统计特性的共同影响<sup>[18]</sup>。现有研究针对不同环境与业务需求提出了相应的信道建模方法。例如,在面向密集地面用户服务的无人机正交频分多址网络场景中,文献[19]将空-地链路信道建模为多径莱斯块衰落信道,以刻画其同时存在的直射路径与多径分量。而在开阔的农村环境场景下,文献[20]通过实测数据分析,提出采用伽马分布来模拟由地形起伏与稀疏植被引起的大尺度阴影衰落,并验证了莱斯分布是该环境下表征小尺度衰落的最佳统计模型,从而为农村空-地链路的可靠设计与性能评估提供了依据。

### (3)空-天链路信道模型

在空-天链路场景中,信道建模需综合考虑空间传播、大气吸收及降雨等多重衰减机制。文献[21]在分析SAGIN中断概率与性能时,将无人机位置与方位角参数融合到空间传播衰落、大气吸收衰落和雨衰这3个衰减模型中,构建了无人机至卫星链路的综合信道模型。文献[22]在设计无人机辅助的海事低轨卫星通信网络时,分别对大尺度与小尺度衰落进行建模,其中大尺度衰落采用与欧氏距离相关的路径损耗模型,小尺度衰落则建模为Nakagami- $m$ 分布。

此外,为提升模型普适性,部分研究致力于构建适用于多场景的统一信道建模框架。例如,文献[23]采用广义衰落分布模型对均匀RF通信场景进行建模。该模型作为一个统一的数学框架,其特例涵盖了瑞利分布、Nakagami- $q$ 分布、Nakagami- $m$ 分布及威布尔分布等多种经典分布,能够通过调整参数灵活地模拟从轻度到深度的多种衰落条件,有效捕捉了多径衰落与轻度遮挡效应的综合影响,为跨场景的系统性能对比与鲁棒性设计提供了便利的理论工具。文献[24]则面向6G空天地一体化复杂场景,提出了一个通用大尺度衰落信道模型框架。该框架旨在系统整合从亚6GHz到太赫兹的宽频段电磁传播特性,为空基、天基与地基多重异构传播环境的统一建模与分析提供了方法论支撑。

## 2.2 FSO信道模型

FSO信号在传输过程中主要面临大气衰减、大气湍流以及指向误差三大核心挑战<sup>[25]</sup>。此外,在高

空平台、无人机等高机动性通信场景下,平台的快速运动与姿态抖动还会引入到达角波动等特殊影响因素,进一步加剧链路的不稳定性<sup>[26]</sup>。因此,建立精确的FSO信道模型是评估系统性能与设计鲁棒通信算法的前提。

### (1)大气衰减

在可见光和近红外波段,辐射穿透大气层时的物理特性具有相似性,因此大气能见度常被用作表征大气对FSO信号衰减程度的关键参数。大气衰减主要由大气分子的吸收和气溶胶的散射效应引起,影响能见度的粒子主要包括雾、霾、雨、雪以及污染、灰尘、烟雾等悬浮颗粒物。它们在一定程度上吸收FSO光能并导致光功率衰减,同时通过散射使FSO信号偏离原始传播方向,进一步造成接收功率下降。对于雨和雪这类粒子直径远大于FSO波长的天气现象,其对FSO链路的影响相对有限;然而,对于由微小粒子构成的雾和霾,由于粒子直径接近FSO波长,会引起强烈的散射效应,导致信号严重衰减,成为影响FSO链路可用性的主要天气因素。大气衰减的定量描述通常基于朗伯-比尔定律建立,该定律表明,在均匀介质中,FSO的衰减与传播距离呈指数关系,其表达式<sup>[27]</sup>为

$$h_t = \exp(-\zeta L) \quad (1)$$

式中: $L$ 表示时隙 $t$ 处的链路距离; $\zeta$ 表示大气衰减系数,它与大气的吸收和散射现象有关。不同天气条件下典型的衰减系数与能见度范围如表1所示,该表清晰地展示了天气状况对FSO链路损耗的显著影响<sup>[28]</sup>。

### (2)大气湍流

在晴朗天气条件下,大气衰减对FSO链路的影响通常微弱,但大气湍流效应则成为制约性能的核心因素<sup>[29]</sup>。当光束在大气中传播时,因大气局部温度、湿度和压力的随机变化,导致其折射率产生随机的空间与时间起伏,从而对光束的幅度和相位造成严重影响<sup>[30]</sup>。根据湍流涡旋尺度与光束尺寸的相对大小,大气湍流的影响可被划分为3类典型效应:当涡旋尺度大于光束尺寸时,光束整体会发生随机漂移,导致传播路径偏离理想直线,进而引发指向误差的缓慢变化;当涡旋尺度与光束尺寸相当时,湍流涡旋类似于一系列随机透镜,对光束产生聚焦与散焦作用,导致接收端光强发生快速随机波动,即光束闪烁效应,这将引起信噪比剧烈变化与信号的深度衰落;当涡旋尺度小于光束尺寸时,光束的不同部分受到独立的散射和衍射影响,导致光束波前发生畸变、相干性降低,并伴随光束扩散,使得接收光斑扩大、平均接收功率密度下降<sup>[31]</sup>。

### (3)指向误差

在FSO通信系统中,维持发射机与接收机之间精确的对准是保障通信链路可靠性的前提。然而,这种对准状态极易受到多种因素破坏。指向误差定义为因收发两端未能精确对准,导致发射光束的中心轴线偏离理想路径,从而无法准确入射至接收端有效孔径内的角偏差或位移偏差,如图3所示。根据误差来源的特性,可将其主要归为两类:一为固定误差,源于设备制造、安装工艺或初始校准不完善导致的望远镜光轴固有偏差,此类

表1 不同天气条件下的衰减系数和能见度  
Table 1 Attenuation coefficient and visibility under different weather conditions

| 天气情况 | 衰减系数 $\zeta$ /<br>(dB·km <sup>-1</sup> ) | 能见度/km    |
|------|--|-----------|
| 十分晴朗 | 0.03~0.144                               | 50~150    |
| 晴朗   | 0.144~1.03                               | 10~50     |
| 轻霾   | 1.03~2.90                                | 4~10      |
| 阴天   | 2.9~6.3                                  | 2~4       |
| 雾    | 6.3~13.4                                 | 1~2       |
| 轻雾   | 13.4~28.2                                | 0.5~1.0   |
| 中雾   | 28.2~58.0                                | 0.25~0.50 |
| 重雾   | 58~392                                   | 0.04~0.25 |

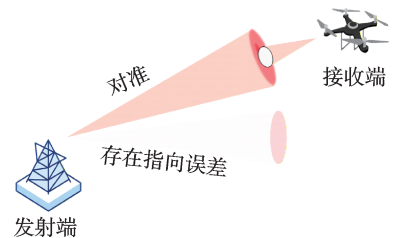


图3 指向误差示意图

Fig.3 Pointing error diagram

误差在短期内保持恒定<sup>[32]</sup>;二为随机误差,由外部动态环境因素(如风荷载、建筑物热膨胀、微小地震)或平台自身振动引起,导致望远镜位置与指向发生随机时变抖动<sup>[33]</sup>。指向误差的存在将引入严重的几何功率损耗,甚至导致链路中断,其统计特性常建模为服从瑞利分布或霍伊特分布的随机变量,是进行高动态场景下链路预算与系统可靠性分析时必须考量的关键因素。

#### (4)到达角波动

对于高空平台、无人机等动态节点构成的空天地链路,平台在自然环境因素(如阵风、大气湍流)影响下会产生比固定中继节点更为显著的随机姿态抖动。在此类场景中,仅考虑发射端的指向误差并不充分,必须同时计入接收端的到达角波动。到达角波动特指由于大气湍流引起的波前畸变以及发射端与接收端平台振动共同作用,导致光束到达接收透镜孔径时,其波前法线与接收光学轴线之间产生的随机时变夹角,如图4所示<sup>[34]</sup>。研究表明,在高动态条件下,到达角波动统计特性常建模为均值为零的正态分布。

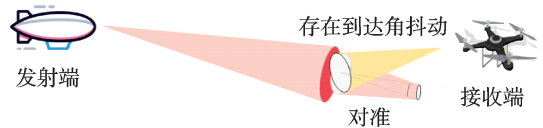


图4 到达角波动示意图<sup>[34]</sup>

Fig.4 Diagram of angle of arrival fluctuation<sup>[34]</sup>

### 2.3 性能评价指标

为综合评估空天地一体化光电融合通信网络的性能,需要采用一系列关键性能指标进行量化分析<sup>[35]</sup>。平均误码率是衡量系统传输可靠性的基本指标,其表达式为

$$P_e = E(P(e|\gamma)) \quad (2)$$

式中 $\gamma$ 表示瞬时信噪比。中断概率表征链路在动态信道条件下的稳健性,定义为

$$P_{\text{out}} = \Pr(\gamma < \gamma_{\text{th}}) \quad (3)$$

式中 $\gamma_{\text{th}}$ 表示维持可靠通信所需的最低信噪比门限。平均服务时间 $\bar{T}_s = \int_0^{\infty} t f_{T_s}(t) dt$ 反映了系统维持连续通信的能力,其中 $f_{T_s}(t)$ 为服务时间的概率密度函数。系统吞吐量综合了链路可用性与频谱效率,其表达式为

$$R = (1 - P_{\text{out}}) \cdot B \cdot \log_2(1 + \gamma) \quad (4)$$

式中 $B$ 为带宽。遍历容量从信息论角度给出了信道长期平均的最大可达传输速率上界,其表达式为

$$C = E(\log_2(1 + \gamma)) \quad (5)$$

这些指标为不同信道模型、调制编码方案、资源分配算法及网络架构的性能比较与优化提供了统一的度量标准。针对光电融合中继链路的联合性能评估,现有研究多聚焦于瞬时信噪比的分析。根据中继节点对信号的处理与转发机制,中继转发技术可分为放大转发与解码转发两类。在固定增益放大转发协议下,端到端瞬时信噪比<sup>[12]</sup>可表示为

$$\gamma_1 = \frac{\gamma_{\text{SR}} \gamma_{\text{RD}}}{\gamma_{\text{RD}} + c} \quad (6)$$

式中 $\gamma_{\text{SR}}$ 和 $\gamma_{\text{RD}}$ 分别表示发送端至中继链路、中继至接收端链路的瞬时信噪比,二者分别对应RF或FSO链路,可根据实际场景自适应选择,共同构成端到端的光电融合传输路径; $c$ 为与固定增益相关的参数。解码转发中继系统中,端到端瞬时信噪比则受限于两跳链路中较差的一跳,其表达式<sup>[36]</sup>可写为

$$\gamma_2 = \min(\gamma_{\text{SR}}, \gamma_{\text{RD}}) \quad (7)$$

综上,对空天地一体化光电融合网络系统端到端性能的统计行为进行量化分析,为融合通信网络的整体性能优化与方案设计提供了必要的理论支撑。

### 3 研究挑战

空天地一体化光电融合网络在实现全域可靠覆盖与超高速率传输方面面临系统性挑战,其根源在于网络拓扑的动态性、异构节点的多样性以及RF与FSO信道物理特性的显著差异。这些因素共同作用,对融合系统的稳定连接、服务质量和资源效率构成严峻考验。本节将从通信精确波束对准、动态链路可靠切换和光电协同资源分配3个方面,深入分析当前面临的核心技术挑战。

#### 3.1 光链路精确波束对准难

在光电融合系统中,尤其是在涉及高空平台、无人机等高速移动节点的空天地链路中,实现并维持FSO链路的精确波束对准是首要技术瓶颈。FSO通信要求严格的视距路径与亚毫弧度级的极窄波束对准精度。然而,平台自身的姿态抖动、振动,以及由大气湍流引起的光束漂移和扩展效应,会严重破坏这种精对准状态,导致链路瞬时中断或信噪比急剧恶化。对于动态拓扑的空天网络,不仅需要解决初始捕获问题,更需要实现快速、精准的持续跟踪。尽管可采用万向节、快速转向镜、自适应光学等机械或光学补偿装置,但这些方案往往带来系统复杂度、体积、重量和功耗的显著增加,且在高动态场景下的跟踪带宽与精度仍存在局限。此外,如何设计具备强环境适应能力的智能光电联合跟踪算法,使其能深度融合RF辅助信息并精准响应平台动态与信道变化,是实现高稳定、高可靠光电融合链路的核心挑战。

#### 3.2 光电链路频繁切换易中断

在空天地一体化动态网络中,节点的快速移动、大气条件的剧烈变化以及链路遮挡等因素,导致RF与FSO链路的信道状态呈现高度时变与突发衰落特性。为确保通信的连续性,系统需在RF与FSO链路间进行频繁切换。然而,频繁的链路切换本身构成挑战。首先,切换决策的时效性与准确性要求极高,过早或过晚切换均可能造成服务中断或性能损失,基于不准确的信道状态信息进行切换则会导致“乒乓效应”或误入劣质链路。其次,切换过程涉及信令交互、协议重配与上下文迁移,必然引入额外的时延与信令开销,在超可靠低时延通信场景下,此过程可能导致业务流的中断或关键数据包的丢失。设计能够快速准确感知异构信道状态、预测其短期变化,并实现无缝、低开销切换的智能机制,是保障端到端可靠性的关键。

#### 3.3 光电融合链路资源协同分配难

在光电融合网络中,RF与FSO链路在带宽、时延、覆盖范围及抗干扰能力上存在显著差异,构成了异构的通信资源池。如何根据动态变化的业务需求,包括对带宽、时延和可靠性的不同要求,并结合实时的链路状态信息,例如FSO链路的可用性以及RF链路的信噪比,进行智能化且高效的系统资源协同分配,是提升网络整体效能的核心问题。不恰当的链路分配策略将直接导致宝贵的频谱与硬件资源浪费,或形成影响整体性能的传输瓶颈。例如,将高容量的FSO链路分配给业务负载较低的低轨卫星节点,会造成其巨大的带宽潜力被闲置。相反,若将容量相对受限的RF链路分配给具有高吞吐量需求的业务节点,则会立即形成传输瓶颈,显著增加数据排队时延,甚至引发数据包丢失。此外,资源分配过程还需综合权衡负载均衡、系统能量效率以及网络总吞吐量等多个相互关联甚至存在冲突的优化目标。由于网络拓扑与业务流量模式均呈现高度动态性,该资源分配问题通常被建模为一个复杂的随机优化问题或在线序贯决策问题。这要求研究者设计出具有低计算复杂度、高环境适应性的智能资源管理算法,以期在动态不确定条件下实现网络资源效用的全局或近似全局最优。

### 4 SAGIN光电融合关键技术

为实现空天地一体化光电融合网络的高可靠、大容量与动态适应能力,亟须突破一系列核心使能

技术。这些技术旨在解决异构信道协同、动态资源调配及高效系统组网等关键问题,是融合系统从理论走向工程应用的重要基础。本节将重点阐述智能光电联合波束跟踪、自适应光电切换、光电并行传输以及面向场景的链路定制4项关键技术。

### 4.1 智能光电融合波束跟踪

在涉及高速移动节点(如低轨卫星、高空无人机)的空天地一体化动态场景中,实现并稳定维持FSO链路的精确波束对准是系统面临的首要技术挑战。单一的FSO捕获、跟踪与对准(Acquisition tracking and pointing, ATP)系统通常存在初始捕获过程耗时较长,以及在平台振动、大气湍流等扰动下动态跟踪精度难以保障的局限性。智能光电融合波束跟踪技术,通过融合RF链路覆盖广、鲁棒性强的优势,为FSO链路提供关键的引导与动态修正信息,其系统模型如图5所示。该技术核心在于构建一个RF与FSO深度协同的联合跟踪框架。首先利用宽波束RF信号快速完成对目标的粗捕获并获得初始角度估计。进而将此角度信息作为高精度FSO捕获跟踪与对准系统的先验引导,实现从快速粗对准到精密持续跟踪的平滑过渡,并最终达成链路的稳定锁定。例如,在无人机中继辅助的应急通信混合系统中,已成功验证了在无人机间利用ATP系统实现高精度FSO链路对准,将通信建立延迟控制在30 ms以内的可行性<sup>[37]</sup>。为进一步提升跟踪的鲁棒性与精度,相关研究将无迹卡尔曼滤波等先进融合算法引入混合跟踪系统,能够智能地协调RF的快速捕获能力与FSO的精密跟踪潜力,显著缩短了FSO链路的初始建立时间,并有效增强了在高机动性与强扰动环境下的跟踪稳定性<sup>[38]</sup>。另有研究则细化了该协同流程,利用RF链路进行持续的、但相对粗略的角度跟踪,并结合卡尔曼预测器,为FSO的精密光学跟瞄机构提供动态的预测指向指令,以主动补偿光束漂移,从而确保FSO链路在动态环境下的长期稳定<sup>[39]</sup>。智能光电融合波束跟踪技术,是充分发挥混合系统效能、突破FSO通信固有跟踪瓶颈、实现动态SAGIN高稳健连接的重要基础。

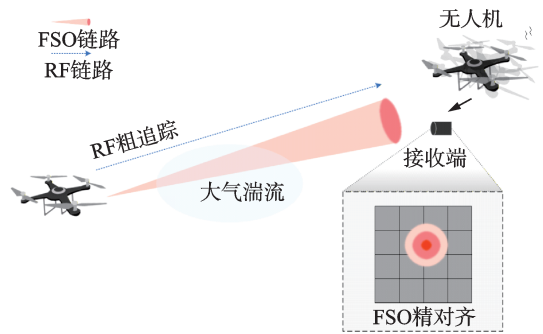


图5 智能光电融合波束跟踪系统模型

Fig.5 System model of intelligent RF-FSO fusion beam tracking

### 4.2 光电链路自适应切换

RF链路和FSO链路对大气环境的响应具有显著的互补特性。自适应光电切换技术的核心目标在于,依据实时感知的信道状态、动态变化的业务需求以及网络整体负载状况,智能化地选择最优传输链路或执行无缝切换,旨在最大化系统吞吐量、保障链路可靠性并优化整体能效。它的技术关键在于设计高效、精准的切换判决准则与执行机制,这依赖于对异构信道状态的精确估计与短期预测,如图6所示。传统切换策略多基于固定门限的信噪比较,难以适应SAGIN中复杂时变、非平稳的信道环境。当前研究前沿聚焦于引入机器学习与人工智能(Artificial intelligence, AI)算法,以实现更为精准和前瞻的自适应切换。例如,利用监督学习模型或循环神经网络,通过学

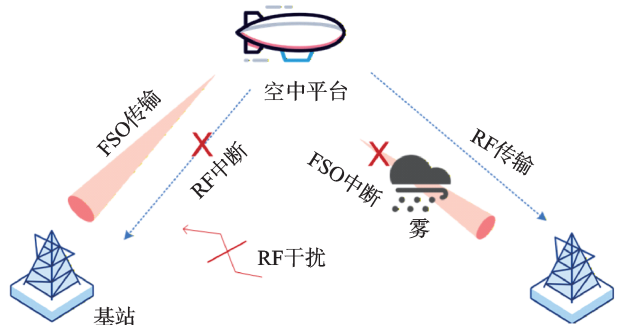


图6 自适应光电切换链路选择示意图

Fig.6 Schematic diagram of adaptive RF/FSO switching link selection

习信道衰落的历史与实时特征,预测未来短期内的链路质量,从而触发预防性切换以规避潜在中断。深度强化学习方法则将切换决策建模为序贯决策问题,通过与动态环境的持续交互学习最优策略,能够在满足差异化业务时延与可靠性约束的前提下,优化网络长期性能。文献[40]提出了一种基于强化学习的自适应调制与链路选择框架,使系统能够根据时变环境自主决策最佳的信息传输链路。文献[41]则利用深度学习模型预测RF与FSO链路的未来衰减状态,进而前瞻性地规划资源分配与链路选择策略,提升了动态云层条件下空天地网络的通信质量。此外,文献[42]提出了一种基于估计信道容量的新选择机制,通过实时评估光电两条链路的传输能力来进行切换决策,有效提升了系统吞吐量。这些智能化的自适应切换策略不仅提高了混合链路资源的利用效率与通信服务质量,也通过灵活的链路调度增强了对网络拓扑动态性与业务多样性的适应能力。

### 4.3 光电并行协同传输

为突破单一链路传输的性能上限,光电并行协同传输技术致力于探索RF与FSO链路同时承载数据流的协同机制,旨在通过获取空间分集增益、实现功能分离或载波聚合,进一步提升系统在容量、可靠性或能效方面的综合性能,如图7所示,其主要技术模式包括协同分集传输与控制数据平面分离传输。

(1) 协同分集与编码传输。该模式将同一数据流经过信道编码后,同时在RF与FSO链路上进行传输,在接收端对两路信号进行合并解码,其核心优势在于利用两条链路衰落的统计独立性获得显著的分集增益,从而极大地增强了传输的可靠性,特别适用于对误码率有极致要求的控制信令或关键数据的传输。文献[43]通过实验验证了在并行运行的毫米波与FSO链路上同步聚合流量,能够有效提升回程链路的稳健性与可用性。文献[44]则针对星空同学网络的平行光电链路,研究了在复杂天气条件下的功率分配优化问题,旨在提升系统的能源效率。

(2) 控制面与用户面分离架构映射。受控面与用户面分离网络架构思想的启发,可将对时延敏感、数据量较小的控制信令(如链路维护、信令交互、切换指令)承载于覆盖能力强、连接稳健的RF链路上传输;而将大数据量的用户面业务数据流承载于高容量的FSO链路上。这种基于功能分离的并行传输模式,能够确保网络控制平面的高可靠性与强健性,同时充分发挥FSO链路在用户平面的超高带宽优势,是应对未来海量数据业务增长、实现网络资源高效利用的有效架构。通过这种方式,系统能够在保障网络基本连接与控制功能的基础上,最大化数据传输能力。

### 4.4 面向场景的光电链路定制

SAGIN是一个涵盖星间、星地、空地及地面等多层次链路的复杂异构系统,其不同层级链路的传输距离、传播环境和应用场景均存在显著差异,如图8所示<sup>[45]</sup>。因此,必须依据特定场景的物理约束与特定业务的性能指标要求,对RF与FSO链路进行智能化的选择与优化组合,从而构建出满足端到端服务质量的最优传输路径。该问题的核心在于实现分层、异构的链路优化配置。具体而言,在空间骨干层(如卫星之间、卫星与高空平台之间),由于大气影响微弱、传输距离极远且对传输容量有极高需求,通常优先选择FSO链路来构建高速、大容量的骨干传输网络。在空地基接入层(例如低轨卫星对地、高空

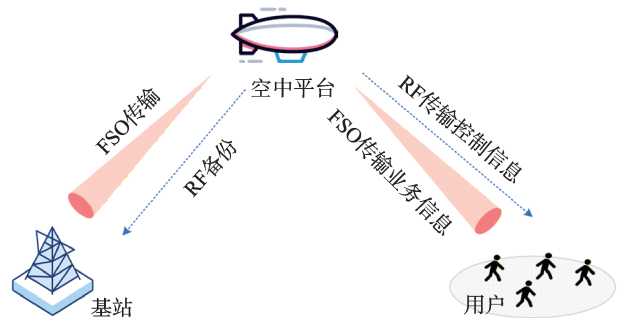
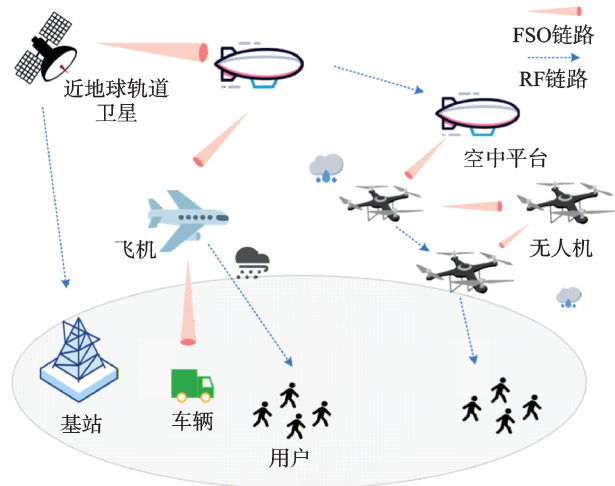


图7 光电并行协同传输示意图

Fig.7 Schematic diagram of parallel RF and FSO co-transmission

平台对地、无人机对用户),则需进行综合权衡与智能决策。当无人机或高空平台作为中继节点时,其与上级卫星节点或地面核心网网关之间的馈电链路,通常对传输容量和时延有严格要求,故宜采用高带宽的FSO链路;而中继节点与众多地面移动或固定用户之间的最后1公里接入链路,由于面临用户分布分散、移动性高、易受地形地物遮挡等挑战,则更适宜采用具备广域覆盖和非视距传输能力的RF链路。为实现上述智能化的链路选择,相应的选择算法必须能够有效集成并分析距离、实时天气条件、节点移动性、业务需求特征、节点剩余能量等多维度的动态信息。在此基础上,通过构建精确的优化模型或设计高效的启发式策略,动态规划出全局或局部最优的异构链路组合方案与端到端路由,以最终实现网络整体吞吐量、时延、可靠性及资源利用效率等综合性能指标的全局优化。

图8 SAGIN光电链路定制系统模型<sup>[45]</sup>Fig.8 System model of SAGIN hybrid RF/FSO link<sup>[45]</sup>

## 5 未来发展趋势分析

空天地一体化光电融合通信技术正从关键技术点的突破验证,逐步迈向体系化构建、智能化演进与规模化应用的新阶段。未来研究不仅需持续探索物理层性能的极限,更应着眼于在复杂的工程约束与现实的网络条件下,寻求通信效能、系统鲁棒性、部署成本及运维复杂性之间的全局最优平衡。

### 5.1 智能算法深度赋能的自主网络

AI与机器学习正从辅助工具演变为驱动未来网络范式变革的核心引擎。以深度强化学习、联邦学习、生成式AI及数字孪生为代表的先进智能技术,将被深度集成至网络的感知、决策、控制与优化全流程,为解决当前面临的高动态链路精准对准难、链路频繁切换易中断、异构资源协同分配复杂等关键挑战提供系统化支持。在物理层,AI将用于实时感知与高精度预测时变的大气信道状态与平台动态,实现自适应的编码调制、智能波束成形与精准的功率控制。在网络层,基于AI的网络编排与资源管理将实现对全域异构资源的协同调度与动态切片,以满足海量差异化业务的端到端服务质量需求。特别是,量子启发算法与量子强化学习等新兴交叉方向,有望为解决传统方法难以处理的高维、非线性、非凸的联合优化问题提供新途径,为超大规模动态网络环境下的实时最优决策提供革命性工具。

### 5.2 极端动态环境下的超高鲁棒性传输

为将SAGIN的服务范围扩展至深海、深空、低空密集区域及高对抗性等严峻环境,未来系统必须在更为恶劣与不稳定的物理条件下,持续保障通信链路的可用性、服务质量与安全性。特别是随着低空经济的快速发展,低空环境呈现出飞行器密集、机动性高、障碍物多变等特征,对通信链路的稳定性、低时延与高安全提出了更为苛刻的要求。这要求发展具有更强环境适应能力的抗损伤与抗扰动传输技术。在对抗物理层损伤方面,需研发针对大气湍流、强散射等复杂效应优化的新型联合编码调制技术,深化空间-时间-频率等多维分集技术的融合利用,并推动自适应光学、相干接收与智能信号处理算法的工程化集成,实现对信道畸变的动态监测与主动补偿。尤其需解决在恶劣天气、复杂遮挡下,RF

与FSO链路因信道特性突变而导致的频繁切换及其引发的业务中断、时延抖动与可靠性下降等问题。在对抗动态失配方面,应重点发展超快速、高稳定的捕获与跟踪技术,以攻克高动态节点间波束精确对准的难题。通过融合惯性、视觉、激光雷达及RF等多源信息的智能复合跟瞄系统,可显著提升初始对准速度与持续跟踪精度。进一步结合知识图谱对扰动模式进行建模,并驱动模型预测控制、强化学习等智能算法,能够实现对高速机动与强抖动所致链路失配的自适应抑制与精准补偿,从而确保极端动态环境下的高可靠连接。

### 5.3 面向效能最优的跨层协同设计

在追求高性能高可靠的同时,必须系统性地权衡由系统复杂度、能耗与成本激增所带来的工程可行性问题。未来核心趋势是从“性能优先”转向“效能最优”的系统工程范式,即在多重约束下通过跨层协同设计实现全局效用最优。这要求在架构、协议、硬件3个层面进行协同创新。在架构层面,需探索支持软硬件解耦的柔性可重构平台,提升基础设施复用率。在协议层面,应研发低开销的轻量化传输与资源管理机制。在硬件层面,需重点推动光电异质集成等先进工艺,特别是在FSO通信链路的精密光学对准子系统中,发展低功耗、高可靠、小型化的光束控制与稳定机构(如微机电系统反射镜、液晶光学相控阵、快速转向镜及其驱动电路),并实现其与RF前端、基带处理单元的高密度异构集成,从而在硬件层面根本性地降低系统的体积、重量、功耗与综合成本。同时,需构建覆盖性能、可靠性、能效、成本及可制造性等多维度的量化评估体系,以科学引导从核心技术研发到规模化产业落地的全链条创新。

## 6 结束语

空天地一体化光电融合技术是构建未来6G全域高速网络的核心方向。本文在构建IOR-CSDN的体系架构基础上,系统综述了其信道模型、关键挑战与技术方案,表明通过RF与FSO通信的智能融合能有效提升系统容量与鲁棒性。然而,该技术迈向实用仍面临跨层优化、动态适配及效能平衡等挑战。未来需加强智能算法与网络架构的深度融合,发展低复杂度、高可靠的系统解决方案,以推动其从理论创新走向规模部署,为6G泛在连接奠定基础。

### 参考文献:

- [1] 吴启晖,董超,贾子晔,等.低空智能组网与控制理论方法[J].航空学报,2024,45(3):6-23.  
WU Qihui, DONG Chao, JIA Ziyue, et al. Networking and control mechanism for low-altitude intelligent networks[J]. *Acta Aeronaut et Astronaut Sinica*, 2024, 45(3): 6-23.
- [2] 冯斯梦,张云弈,刘凯,等.低空混合障碍下无人机协同多智能体航迹规划[J].电子与信息学报,2025,47(5):1291-1300.  
FENG Simeng, ZHANG Yunyi, LIU Kai, et al. Collaborative multi-agent trajectory optimization for unmanned aerial vehicles under low-altitude mixed-obstacle airspace[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2025, 47(5): 1291-1300.
- [3] 金永光,叶方伟,卢晓珍,等.区块链赋能的低空智能组网[J].数据采集与处理,2024,39(1):2-14.  
JIN Yongguang, YE Fangwei, LU Xiaozhen, et al. Low-altitude intelligent network empowered by blockchain[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2024, 39(1): 2-14.
- [4] 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 Simeng, ZHAO Yidi, DONG Chao, 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.
- [5] FENG S, LI N, LIU K, et al. A cross q-learning assisted resource allocation for user-centric optical wireless communication networks[J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2025, 9(4): 2264-2278.

- [6] NAFEES M, HUANG S, THOMPSON J, et al. Backhaul-aware UAV-aided capacity enhancement in mixed FSO-RF network[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024, 5: 4400-4416.
- [7] LIU X, GU C, GUO K, et al. Robust beamforming and outage performance of uplink multiuser satellite-aerial-terrestrial networks with mixed RF-FSO channels[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(4): 1-8.
- [8] ASHRAFZADEH B, SOLEIMANI-NASAB E, KAMANDAR M, et al. A framework on the performance analysis of dual-hop mixed FSO-RF cooperative systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(7): 4939-4954.
- [9] GENKOV D, RAYKOV T, SLAVOV M, et al. Architecture of an application for software defined network[C]//Proceedings of 2025 International Conference Automatics and Informatics (ICAI). Piscataway: IEEE, 2025: 482-487.
- [10] KHAN N, ALQASMI A K S, KHAN Z, et al. SDN-enabled UAV-ITS: Challenges, solutions, and future prospects[C]//Proceedings of 2025 IEEE 102nd Vehicular Technology Conference (VTC2025-Fall). Piscataway: IEEE, 2025: 1-6.
- [11] BIJLWAN V P, KUMAR N. Deep reinforcement learning in software defined networking: A survey, research challenges, and future perspectives[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2026, 28: 4624-4653.
- [12] AREZUMAND H, ZAMIRI-JAFARIAN H, SOLEIMANI-NASAB E. Outage and diversity analysis of underlay cognitive mixed RF-FSO cooperative systems[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(10): 909-920.
- [13] JIANG Y, LI Z, ZHANG J, et al. THz/FSO hybrid channel propagation loss model for space-air-ground integrated network [C]//Proceedings of 2025 6th Information Communication Technologies Conference (ICTC). Piscataway: IEEE, 2025: 68-72.
- [14] GODDEMEIER N, WIETFELD C. Investigation of air-to-air channel characteristics and a UAV specific extension to the rice model[C]//Proceedings of 2015 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE, 2015: 1-5.
- [15] 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]//Proceedings of 2025 11th International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). Piscataway: IEEE, 2025: 735-738.
- [16] LIM R Y H, LIM J M Y, LAN B L, et al. Failure-prediction-activated packet rebroadcasting for packet loss mitigation in unmanned aerial vehicle swarm networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2026. DOI: 10.1016/j.res.2026.112331.
- [17] ZENG L, LIAO X, MA Z, et al. Three-dimensional UAV-to-UAV channels: Modeling, simulation, and capacity analysis[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(6): 10054-10068.
- [18] YANG L, GUO D, LIU Y, et al. Joint trajectory and power optimization for UAV-assisted communication networks[C]//Proceedings of 2024 10th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Piscataway: IEEE, 2024: 2542-2547.
- [19] PARK J C, KIM M, KANG K M, et al. Low-complexity algorithm for minimum rate maximization in UAV-enabled OFDMA networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2025, 14(10): 3359-3363.
- [20] LYU Y, WANG W, CHEN P. Fixed-wing UAV-based air-to-ground channel measurement and modeling at 2.7 GHz in a rural environment[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2025, 73(4): 2038-2052.
- [21] TAN J, TANG F, ZHAO M, et al. Outage probability, performance, and fairness analysis of space-air-ground integrated network (SAGIN): UAV altitude and position angle[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2025, 24(2): 940-954.
- [22] SENADHIRA N, DURRANI S, GUO J, et al. Design and performance analysis of UAV-assisted maritime-LEO satellite communication networks[J]. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2025, 6: 4667-4688.
- [23] PREMANAND R, VISHWAKARMA N, SINGH R, et al. RIS-enhanced hybrid THz/RF systems for 6G networks over generalized fading[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2026. DOI: 10.1109/TVT.2026.3652998.
- [24] PAN Y, XIN L, CHANG H, et al. A general 6G large-scale fading channel model for multiple frequency bands and scenarios [C]//Proceedings of 2025 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE, 2025: 1-6.
- [25] SAIDI H, HAMDI N. On the effect of misalignment fading in DF dual-hop hybrid FSO/RF system using MPPM coding method under GG channel turbulence model[C]//Proceedings of 2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE, 2018: 566-570.

- [26] 吴旭阳, 王建萍, 陈丹阳, 等. 基于自由空间光的无人机通信研究进展及展望[J]. 电子学报, 2025, 53(8): 3026-3046.  
WU Xuyang, WANG Jianping, CHEN Danyang, et al. Research progress and future prospects of free-space optical communication for UAVs[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(8): 3026-3046.
- [27] SAMY R, YANG H C, RAKIA T, et al. Hybrid SAG-FSO/SH-FSO/RF transmission for next-generation satellite communication systems[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(11): 14255-14267.
- [28] 柯熙政, 席晓丽. 无线激光通信概论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004: 241-245.  
KE Xizheng, XI Xiaoli. Introduction to wireless laser communications[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2004: 241-245.
- [29] MISRA A, SAINATH B. Deep fade event probability analysis of FSO channels with strong and weak turbulence[C]// Proceedings of 2025 IEEE Photonics Conference (IPC). Piscataway: IEEE, 2025: 1-2.
- [30] KHAN A N, SAEED S, NAEEM Y, et al. Atmospheric turbulence and fog attenuation effects in controlled environment FSO communication links[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(24): 1341-1344.
- [31] JOHARI S, SUNDHARAM V. Performance analysis of an earth-satellite intensity modulated FSO link in the presence of turbulence and varying path loss[C]// Proceedings of 2017 7th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT). Piscataway: IEEE, 2017: 38-43.
- [32] 张智永, 周晓尧, 范大鹏. 光电探测系统指向误差分析、建模与修正[J]. 航空学报, 2011, 32(11): 2042-2054.  
ZHANG Zhiyong, ZHOU Xiaoyao, FAN Dapeng. Analysis, modeling and correction of pointing errors for electro-optical detection systems[J]. *Acta Aeronaut et Astronaut Sinica*, 2011, 32(11): 2042-2054.
- [33] ARNON S. Effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless-communication systems[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(2): 129-131.
- [34] SHARMA P, R S, ELAMASSIE M. Comprehensive performance analysis of aerial-platforms-enabled mixed FSO/RF communication with NOMA framework[C]// Proceedings of 2025 IEEE 36th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE, 2025: 1-6.
- [35] 陆榕榕. 基于 UAV 的 FSO 通信系统性能分析及优化[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.  
LU Rongrong. Performance analysis and optimization for UAV-based FSO communication systems[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [36] ERDOGAN E, ALTUNBAS I, KURT G K, et al. The secrecy comparison of RF and FSO eavesdropping attacks in mixed RF-FSO relay networks[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 1-8.
- [37] ZHOU W, WU T, SONG S, et al. Development and field testing of a robust UAV relay-assisted hybrid FSO/RF system for emergency communications[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2026. DOI: 10.1109/JLT.2026.3659563.
- [38] SUN Z, DENG X, MA W, et al. Intelligent RF-FSO fusion for high-mobility beam tracking based on reservoir computing enhanced UKF[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2026. DOI: 10.1109/LPT.2025.3636938.
- [39] SUN Z, DENG X, MA W, et al. Fusion-aware beam tracking for robust high-mobility RF-FSO communication[C]// Proceedings of 2025 13th International Conference on Intelligent Computing and Wireless Optical Communications (ICWOC). Piscataway: IEEE, 2025: 159-162.
- [40] MOOLCHANDANI J, SAHU S, CHOLE V, et al. Hybrid RF/free-space optical links with RL-based adaptive modulation for 6G backhaul[C]// Proceedings of 2025 Optical Communication, Photonics, Telecommunications, and Intelligent Machine Applications (OPTIMA). Piscataway: IEEE, 2025: 700-705.
- [41] SONGSRIBOONSIT N, RODRIGUES T K, KAWAMOTO Y, et al. Deep learning-assisted network slicing in hybrid RF/FSO SAGINs under dynamic cloud conditions[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2026. DOI: 10.1109/TVT.2026.3653199.
- [42] HASSAN H, ALTHUNIBAT S, MILLER S, et al. A new selection mechanism for hybrid FSO/mmWave systems[J]. *Optics Communications*, 2026. DOI: 10.1016/j.optcom.2026.132875.
- [43] ALQURASHI F S, XU J, GOIRIZ L B, et al. Enhancing wireless backhaul networks with parallel FSO-mmWave systems: Experimental analysis and availability assessment[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2025, 6: 10219-

10228.

- [44] LI X, LI Y, ZHAO S, et al. Performance analysis of parallel free-space optical/radio frequency transmissions in satellite-aerial-ground integrated network with power allocation[J]. *Photonics*, 2024. DOI: 10.3390/photronics11121162.
- [45] KUMAR R, SHUKLA M K, KUMAR V, et al. UAV-enabled SAGIN: Investigating multi-RIS systems for mixed FSO-RF communication[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2026, 62: 1107-1118.

作者简介:



吴启晖(1970-),男,教授,博士生导师,研究方向:认知信息论、电磁空间频谱智能管控、天地一体化信息网络和无人机集群智能通信,E-mail: wuqihui@nu-aa.edu.cn。



冯斯梦(1993-),通信作者,女,副研究员,硕士生导师,研究方向:无线光通信技术、无人机通信网络、天地一体智能信息网络,E-mail: simeng-feng@nuaa.edu.cn。



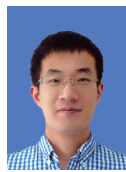
王婉婷(2002-),女,硕士研究生,研究方向:激光通信、无人机通信网络。



方正皓(2002-),男,硕士研究生,研究方向:激光通信、无人机通信。



刘小利(2002-),女,硕士研究生,研究方向:轨迹规划、无人机通信网络。



李宝龙(1989-),男,副教授,硕士生导师,研究方向:物联网、无线光通信、可见光通信。



董超(1980-),男,教授,博士生导师,研究方向:无人机蜂群自组织网络、空天地一体智联网、边缘网络智能、无人机协同智能应用。

(编辑:王静)