

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.06.002

面向低空经济的通信技术综述

丁旭辉¹, 卢琦¹, 张园园¹, 高晓铮², 李高阳³, 王嘉诚⁴,
杨凯², 安建平¹

(1.北京理工大学网络空间安全学院,北京 100081; 2.北京理工大学信息与电子学院,北京 100081;
3.北京航空航天大学生物与医学工程学院,北京 100191; 4.南洋理工大学计算与数据科学学院,新加坡 639798)

摘要: 随着低空经济的蓬勃发展,低空飞行运行规模持续扩大,对高效、可靠通信网络的需求日益迫切。现有通信技术难以满足低空经济在广域覆盖、高速移动和多样化业务上的苛刻要求,亟需构建与之匹配的新型专用网络体系。本文首先从低空通信的技术背景与独有挑战出发,分析了其高动态复杂信道建模、三维移动性管理、智能感知避障、多业务服务质量保障和频谱共享等方面的难点;其次,从网络体系架构演进和低空通信关键技术发展两个维度出发,系统阐述了空天地一体化组网、智能波束成形、动态资源管理等核心技术的原理与现状;最后,探讨了通感算一体化、智能内生安全等未来技术发展趋势,以期构建下一代低空通信网络提供理论参考和技术支撑。

关键词: 低空经济;低空通信技术;空天地一体化;通信感知一体化

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2025)06-1026-20

Review on Communication Technologies for Low-Altitude Economy

DING Xuhui¹, LU Qi¹, ZHANG Yuanyuan¹, GAO Xiaozheng², LI Gaoyang³,
WANG Jiacheng⁴, YANG Kai², AN Jianping¹

(1. School of Cyberspace Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. School of Biological and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
4. College of Computing and Data Science, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

Abstract: With the rapid development of the low-altitude economy, the scale of low-altitude aircraft operations continues to expand, and the demand for efficient and reliable communication networks is becoming increasingly urgent. Current communication technologies fail to meet the stringent demands of low-altitude applications in terms of wide-area coverage, high-mobility support, and diverse service provisioning. This stark disparity necessitates the development of a novel, dedicated network architecture. This paper begins by elucidating the technical background and unique challenges inherent to low-altitude communication, addressing critical issues such as the modeling of high-dynamic complex channels, three-dimensional mobility management, intelligent sensing for obstacle avoidance, quality-of-service assurance for heterogeneous

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3305904);国家自然科学基金(U23B2005,62301049,62201054,62371047);北京市自然科学基金(JQ23015);泰山学者人才工程(tsqn202211210)。

收稿日期: 2025-10-21; **修订日期:** 2025-11-17

作者简介: 丁旭辉,男,副教授,博士生导师,长期从事空天网络与安全通信等方面研究工作。

通信作者: 杨凯,男,教授,博士生导师, E-mail: yangkai@bit.edu.cn。

引用格式: 丁旭辉,卢琦,张园园,等. 面向低空经济的通信技术综述[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版),2025,57(6):1026-1045. DING Xuhui, LU Qi, ZHANG Yuanyuan, et al. Review on communication technologies for low-altitude economy [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(6): 1026-1045.

services, and efficient spectrum utilization. Subsequently, this paper provides a systematic exposition from two dimensions: The evolution of network architectures and the development of key technologies for low-altitude communication. It delves into the principles and state-of-the-art of core solutions, including space-air-ground-integrated networking, intelligent beamforming, and dynamic resource management. Finally, this paper outlines promising research directions, such as integrated sensing and communication (ISAC) as well as native intelligence and security, with the aim of offering a theoretical foundation and technical insights for constructing next-generation low-altitude communication networks.

Key words: low-altitude economy; low-altitude communication technology; space-air-ground integration; integrated sensing and communication (ISAC)

低空经济是以真高1 000 m以下(部分地区可延伸至3 000 m)空域为核心,进行各类开发、利用和保护活动的经济形态。在此空域范围内,航空器相较传统商业飞机与卫星平台具有更大的灵活性,然而其规模化应用也为空域管理、安全管控和可靠通信保障带来了全新挑战。在人工智能、5G通信、边缘计算等关键技术驱动下,应急救援、巡检安防和城市交通等典型应用飞速发展,共同将低空空域推向经济增长的新赛道^[1-2]。各国纷纷积极推进对低空空域的规范化管理和商业开发,挖掘低空空域的经济与社会价值。在低空经济的全球化发展浪潮中,中国与其他国家和地区呈现出“先后启程,殊途同归”的发展轨迹,其通信技术需求与研究范式也随之清晰^[3]。

在起步与探索期(2010年代中期以前),国外以消费级无人机引爆市场,技术研究聚焦飞行平台,通信多依赖Wi-Fi等近距离技术。同期,中国低空经济尚在孕育,政策空域管制严格,研究处于零星试点阶段。

进入规范与成型期(约2010年代末至2020年代初),以美国联邦航空管理局Remote ID规则和欧盟U-space框架为代表,国外着力构建法规体系,推动物流等行业应用,并探索第4代长期演进技术(4G long term evolution, 4G LTE)及专用数据链在低空通信的可行性^[4]。与此同时,中国自国务院、中央军委发布《关于深化我国低空空域管理改革的意见》后,低空管理改革进入快车道,以深圳为代表的城市率先开展无人机飞行管理试点,通信技术上开始验证4G网络在城市环境下的适应性^[5]。

近年的加速与融合期(2020年代中期至今),国内外发展形成共振,5G-Advanced已成为低空通信的研究核心,并因其巨大应用潜力,引发全球主要阵营间的标准争夺战,使其成为战略竞争的新焦点。美国、欧盟等主要经济体已将先进空中交通

(Advanced air mobility, AAM)和城市空中交通(Urban air mobility, UAM)纳入国家战略层面,通过设立专项计划、出台扶持政策等顶层规划,加速其产业化进程^[6]。中国则凭借“新基建”优势,在国家与地方层面密集出台低空经济产业政策,展现出强大的后发优势。在2024年全国两会期间,低空经济首次被写入政府工作报告,强调其作为国民经济新增长引擎的重要性。国内研究重点集中于如何利用全球领先的5G网络优势,结合网络切片、通感一体化等技术创新^[7],为无人机物流、电动垂直起降飞行器(Electric vertical take-off and landing, eVTOL)等规模化商业应用构建安全、可靠的通信底座,从而在低空通信技术的前沿探索中与国际先进水平并跑甚至领跑。

综上所述,国内外低空经济正从有限范围的行业应用,逐步迈向以UAM/AAM为代表的规模化、网络化运营新阶段。然而,作为其核心载体的低空飞行器,在实现大规模、高密度、超视距安全运行的过程中,始终面临一个最根本的制约瓶颈——如何构建能够提供高可靠、低时延、大带宽通信服务的空天地一体无缝网络。传统移动通信技术与近距Wi-Fi/专用数据链已难以满足未来立体化交通的动态复杂需求。因此,探索和发展适用于低空环境的新一代通信技术,已成为推动低空经济从概念走向成熟商业化不可或缺的基石^[8]。本文将从低空通信的技术背景出发,系统梳理其面临的核心挑战与现有解决方案,并对未来发展趋势进行展望。

1 低空通信技术背景与难题

1.1 低空通信技术背景

低空经济应用场景广泛,涵盖物流、交通、应急、测绘等诸多领域,其载体也从消费级无人机延伸至各类工业级无人机。该产业正深度融入百业千行,显著提升了社会生产与生活效率。空天地一体化等先进通信技术赋能低空经济高速发展,将无

人机等航空器与移动通信网络深度融合,可实现对设备的精准监控管理与航线的规范优化,从而促进空域资源合理利用,极大拓展应用边界^[9]。展望未来,5G-A乃至6G等新一代信息通信技术的不断发展,将加速推进以网络化、数字化、智能化为特点的低空智能网络建设,助力低空经济迈入新的发展阶段。为明确低空通信关键技术发展方向,需系统分析低空独特环境与核心业务需求,具体归纳如下。

(1)极致安全性:eVTOL逐步应用于城市空中交通,在城市低空形成交通网络,缓解地面交通压力。通信系统必须具备超高可靠性与超低时延的传输能力^[10],这是保障载人飞行安全的根本要求,通信中断是不可接受的。(2)广域连续覆盖性:飞行器在广域任务中常需跨越从城市到偏远地区的多样地形,导致通信链路频繁穿行于复杂的异构传播环境。此类动态变化使得信道响应呈现显著的非平稳随机过程特性,具体表现为难以准确建模与预测陡变^[11],对维持通信链路的可靠性构成严峻挑战。因此,需构建空地跨域协同的无缝覆盖网络,从而在整个飞行航迹中实现连续、稳定的通信连接,彻底杜绝信号中断。(3)三维移动性与高动态拓扑:通信终端在三维空间中进行高速运动,轨迹复杂多变(如悬停、爬升、高速平移),导致其与地面基站或其他飞行节点之间的相对位置、距离和角度持续快速变化。网络拓扑呈现出远超地面二维场景的极端动态特性^[12]。(4)业务需求多样化:低空通信需支持异构业务流的并发传输,既包括数据量小但需超低时延、超高可靠性的关键控制信令,也包括数据量大、传输速率高的多媒体业务数据。因此,未来网络需具备融合增强移动宽带(Enhanced mobile broadband, eMBB)、超高可靠低时延通信(Ultra reliable low latency communications, uRLLC)及海量机器类通信(Massive machine type communications, mMTC)的能力^[13],以应对不同业务在速率、时延和连接规模等方面的差异化需求。(5)网络密集化与频谱共享:未来低空空域中飞行器将实现规模化部署,驱动通信网络向高密度、超密集组网架构演进。同时,低空通信需与地面移动通信、航空移动通信及卫星通信等系统共享或动态协调使用频谱资源,从而对系统的干扰抑制能力和动态频谱管理机制提出了更高要求。

1.2 低空通信面临的难题

受限于低空独特的物理环境和动态多变的业务场景约束,低空通信实际部署与应用仍面临诸多

严峻挑战,精准信道模型预测、可靠网络架构设计、智能感知、动态频谱管理是其从理论验证迈向规模化商用所必须解决的问题。在明确系统特点与性能需求的基础上,亟须对低空通信面临的核心问题进行系统性梳理与剖析。下文将深入探讨当前技术发展中的主要瓶颈与挑战。

(1)高动态复杂信道下的可靠低时延传输挑战。低空环境虽以视距传播为主导,但仍受城市峡谷效应、植被遮挡及地形起伏等因素影响,传播环境复杂多变。与此同时,飞行终端的高速三维运动不仅扩展了其覆盖范围,也引入了更多干扰源,进一步增加了信道模型的复杂程度。在此背景下,核心挑战在于构建能够精确描述低空(尤其是城市峡谷环境下)信道特性的数学模型,准确刻画直射、非直射、多径、多普勒频移等关键传播特性,从而为通信协议与算法设计奠定坚实基础。系统性研究高机动性信道建模与预测技术,发展先进编码调制、智能重传机制以及多连接技术(如双发选收、多链路同步),结合利用边缘计算(Mobile edge computing, MEC)实现计算能力下沉^[14],有效降低端到端传输时延,从而共同保障控制信令与关键数据在复杂低空环境下的超高可靠与超低时延传输。

(2)三维空间无缝覆盖与网络架构韧性挑战。飞行器在三维空间的高速移动导致频繁的跨基站切换,远距离任务更带来通信场景的持续变化。需着力研发新型对空覆盖天线技术,如灵活波束成形与大规模多输入多输出系统(Massive multiple-input multiple-output, Massive MIMO)^[15],以生成可精准跟踪高速目标的定向波束,开发面向三维空间的频谱分配策略与智能动态资源管理技术,优化网络架构和切换算法实现预测性无缝切换^[16]。推动制定适用于低空飞行器的移动性管理标准。在增强网络韧性方面,应构建“蜂窝网+卫星通信+自组网”融合架构,在地面网络失效时通过多链路冗余保障连接不中断,并强化通信安全与身份认证机制^[17],从而全面提升系统在复杂环境下的任务可靠性。

(3)高精度导航与智能感知避障挑战。精准定位与自主避障是低空飞行器(尤其是无人驾驶平台)安全运行的核心前提。发展5G-A/6G蜂窝网络定位、通信感知一体化及非地面网络定位等新型定位技术,构建空地协同感知网络,实现飞行器与地面设施间的实时感知数据交互^[18]。在此基础上,应进一步引入人工智能技术,实现复杂环境下

的实时感知、干扰预测与智能规避决策,从而全面提升低空飞行器的自主飞行与安全管控水平。

(4)多业务服务质量的一体化保障挑战。低空通信网络需承载的业务流在服务质量(Quality of service, QoS)需求上存在显著差异,甚至相互冲突,这对网络资源的一体化调度与智能管控提出了严峻挑战。该挑战的核心在于,如何设计统一的网络架构与动态资源分配机制,以同时满足 eMBB、uRLLC 和 mMTC 这3类典型业务的极端差异化需求。未来低空通信网络必须突破地面5G系统中切片隔离的静态模式,转向更智能、更动态的跨业务资源协同与干扰管理,实现从网络共存到网络融合的跃迁^[19],从而在一张物理网络中真正实现多业务服务质量的一体化保障。

(5)网络密集化与频谱共享干扰管理挑战。低空空域飞行器密度增大导致通信网络日益密集,同频干扰风险显著升高。需研究动态频谱共享与干扰协同管理算法,引入认知无线电技术,使系统能智能感知“频谱空穴”并动态接入,实现与地面移动通信、航空移动通信及雷达系统的和谐共存^[20]。同时需提升飞行器终端的抗干扰能力与断网自主运行能力,保障高密度场景下的通信质量与飞行安全。

2 低空通信体系架构

低空通信在信道复杂性、广域覆盖性、拓扑动态性、业务苛刻性和网络密集性等方面面临着一系列独特挑战。为系统性地应对这些挑战,需突破分散化思维,综合构建全局函数,以实现全局优化和持续演进。低空通信的网络体系架构作为系统设计的基础,定义了网络的组成要素、功能划分与交互机制,从根本上决定了系统的整体性能、资源效率与长期可演进能力。为应对广域巡航、城市密集交通等不同应用场景的差异化需求,目前业界逐步形成了多种具有明确适用性的架构范式。其中,集中式架构以稳定可靠的空对地(Air-to-ground, A2G)通信链路为核心,依托地面基站或云平台等网络基础设施,实现高效统一的空域管理;分布式架构以复杂动态的空对空(Air-to-air, A2A)通信链路为基础,强调飞行器节点的自组织与协同,增强在无网络覆盖条件下的自主生存能力;而混合分层架构则融合上述二者的优势,借助跨域资源的分级协同与智能调度,构建空天地一体化的融合通信体系,正逐步成为支持未来高动态、大规模低空通信的重要演进方向。

2.1 空对地链路与集中式控制架构

空对地通信链路是低空飞行器与地面终端或基础设施之间建立的无线数据传输通道,在整个系统中承担着核心的数据交互功能,其信道特性精准建模直接决定了系统性能上限与部署可行性。集中式控制是低空通信中最基础、最广泛应用的网络架构,其运行依赖于稳定可靠的空对地无线链路。该架构仿照传统蜂窝网,以地面控制站(Ground control station, GCS)作为中心节点,对无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)实施统一管理、指令控制和数据回传。集中式控制采用星型拓扑结构,所有UAV直接与中心节点通信,交互主要包括下行控制指令、上行遥测及任务数据^[21-22],如图1所示。该架构的优势在于管理简便、安全性高,但其整体性能与可靠性本质上受制于A2G链路的稳定性^[23]。GCS作为系统核心,在承担集中控制功能的同时,也可能成为性能瓶颈和单点故障源,其有效覆盖范围严格受制于A2G链路的最大通信距离。因此,构建精准的A2G信道模型成为设计与优化集中式控制系统的关键前提。

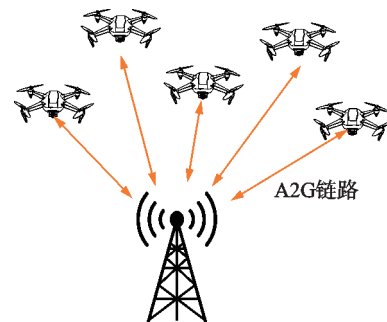


图1 集中式控制架构

Fig.1 Centralized control architecture

A2G信道建模在三维空间特性、高动态拓扑和独特传播环境等方面显著区别于传统地面移动通信,其模型构建需充分考虑低空通信的特殊性。具体而言,现代A2G模型普遍引入无人机高度、仰角、方位角等三维参数,以更准确地刻画空间几何关系。由于平台高速移动引起的多普勒频移与扩展效应,信道呈现明显的非平稳特性,成为时变建模的关键。在传播机制上,虽以视距传播为主,但仍受到城市峡谷、植被等地物影响,需结合具体环境进行精细化建模。文献[24-25]的奠基性研究表明,A2G路径损耗和阴影衰落与UAV-地面终端连线的仰角强相关,而非简单依赖于通信距离。Al-Hourani等^[26]进一步提出了一个包含仰角的解析模型,低仰角通信将遭遇显著的信号衰减。基于此类模型可知,在集中式架构中,远离中心节点或飞行高度过低的无人机易遭遇链路质量急剧恶化,

尤其是在城市峡谷环境中,建筑物遮挡易导致视距链路中断,进而引发控制链路失效。研究表明,存在一个最大化地面覆盖范围的最优 UAV 飞行高度^[26]。Cheng 等^[27]研究提出三维几何随机模型,通过闭合表达式描述了空-时-频相关函数与空-多普勒功率谱密度,为高机动性 MIMO 信道的统计特性建模提供了有效工具。集中式架构的管控算法可集成此模型,以动态规划 UAV 的飞行高度。

面对集中式架构中多无人机并发高清回传造成的上行拥塞与同频干扰现象,博弈理论作为一项分布式智能决策工具,可显著提升资源管理效率。该理论适用于大规模无人机通信网络,可结合平均场博弈、图博弈、Stackelberg 博弈、联盟博弈和势博弈等模型,实现对资源竞争的分布式协调^[28]。另一方面,地面控制站可基于数据优先级与新近度实施智能带宽管理,替代平均分配策略。通过数据导向和集中式智能决策,显著提高了带宽利用效率,避免了网络拥堵和资源浪费,尤其适合数据重要性差异大、无人机密度高的监控场景^[29]。

2.2 空对空链路 with 分布式自组织架构

空对空通信链路是低空飞行器之间直接建立的无线数据传输通道,为无人机集群协同(如编队飞行、协同感知)、多跳中继(扩展网络覆盖)和飞行自组织网络(Flying ad-hoc network, FANET)等高级应用提供基础,是构建空域感知网络的核心支撑。随着无人机应用场景向高可靠、低时延和大规模方向扩展,传统集中式控制架构的局限性日益凸显。在此背景下,分布式自组织网络成为一种重要解决方案。在该架构中,不存在固定中心节点,各无人机节点地位平等,通过 A2A 链路自发地组成一个多跳、动态的无线网络。节点可自动发现邻居,并建立和维护连接,数据包可通过多个中间节点转发,到达超出单跳通信范围的远端节点,极大地扩展了网络覆盖,如图 2 所示。分布式自组织网络采用完全分布式的控制结构,所有节点具有平等地位,不存在单一控制中心或关键节点。这种无中心化特性带来了显著的抗毁性优势,任何单个节点的故障或退出均不会导致全网瘫痪,极大地提高了系

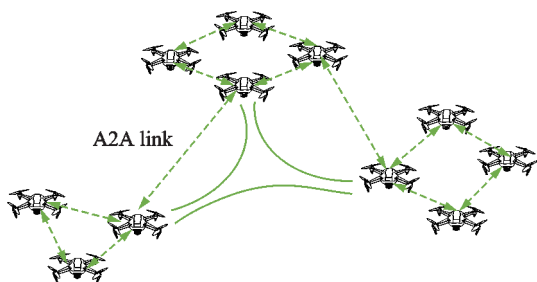


图 2 分布式自组织架构

Fig.2 Distributed self-organizing architecture

统的可靠性和生存能力^[30]。在低空通信环境中,无人机节点可能因能量耗尽、故障或外界攻击等原因频繁脱网,在此背景下,分布式架构的抗毁性优势得以充分凸显。

A2A 信道条件通常优于 A2G 链路,传播以视距为主,路径损耗更接近自由空间模型,但仍会受到其他飞行器遮挡、阴影效应及地面反射的影响。由于通信双方均处于高速运动状态,多普勒频移效应显著,时空相关性复杂,对接收机同步与解调构成挑战。Zhang 等^[31]提出了一个三维两球体几何随机模型,用于描述 UAV-MIMO A2A 信道,同时考虑了收发双方的局部散射和 3 种传播路径,推导了空间时间相关函数的闭合表达式,有效捕捉信道的空时相关性。传统的标准化模型将地面反射视为非视距场景最强分量,但近期研究表明低空环境屋顶镜面反射量往往强于其他非视距传播(Non line of sight, NLoS)分量,Hua 等^[32]提出一种准确的 A2A 信道模型,重点引入镜面反射量和机体遮挡效应,推导多项关键统计特性的闭式表达式,信道模型更贴合低空城市实际环境,为低空载人飞行器通信系统的设计、优化和部署提供理论依据。

无人机在三维空间中的快速移动导致网络拓扑高度动态,节点间相对位置、速度、方向持续变化,使得 A2A 链路的连通性、距离与质量均处于快速波动中,链路寿命短,拓扑变化速度远超地面自组织网络,成为 FANET 路由协议设计的主要挑战。Wu 等^[33]提出了一种结合扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman filter, EKF)移动性预测和离散粒子群智能优化算法的集中式路由方案,用于解决 FANET 中因节点高速移动导致的拓扑频繁变化、路由易失效等问题。Khan 等^[34]提出一种生物启发的混合聚类方案,核心创新在于融合了萤火虫群优化和磷虾群算法,并引入遗传算子(交叉与变异),有效解决了 FANET 中能量约束与拓扑动态性的矛盾。此外,抗干扰多路径路由协议通过协同考量链路质量、流量负载与空间距离,提升系统在恶意干扰环境下的鲁棒性^[35]。Singh 等^[36]提出了一种基于 Q 学习的数据转发方案,通过多参数奖励函数,使强化学习智能体在复杂的 FANET-IoT (Internet of things) 混合环境中自主选择最佳中继节点,从而协同优化能量消耗和信息丢失这两个关键目标。

2.3 空地一体化链路及混合分层架构

随着低空通信技术的快速发展和无人机应用广泛普及,单一的低空通信网络在覆盖范围、频谱资源和干扰管理等方面面临显著挑战。为应对上

述问题,空天地一体化网络通过融合天基(卫星)、空基(UAV、高空平台)、地基(地面蜂窝网络)等多维资源,构建了一个多维度的通信架构,以实现全域覆盖、无缝切换和高效资源利用,如图3所示。空天地一体化链路及混合分层架构是支撑低空经济发展的关键基础设施,其全域覆盖、异构融合、通感一体和服务差异化的特点,能够满足低空经济多样化应用场景的通信需求。混合分层架构通过多层次、跨域协同的设计,实现了通信、感知和计算资源的统一调度与优化配置。通感一体化信号处理、智能资源调度、高精度时空同步和安全加密等关键技术正在不断突破,为低空通信系统提供坚实支撑。本节将深入分析空天地一体化链路的特性、混合分层架构的设计原则、关键使能技术以及应用场景,为低空通信的系统级设计提供理论框架。

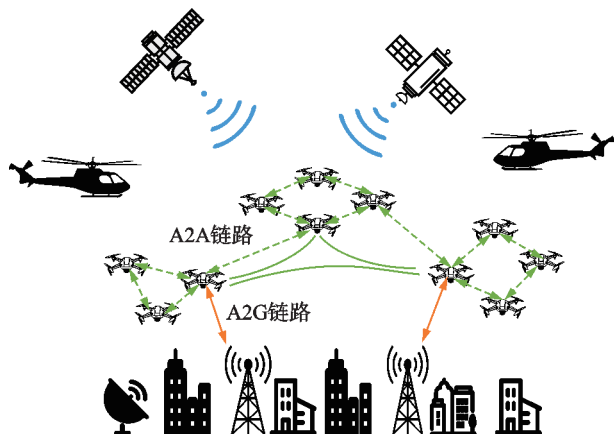


图3 空天地一体化链路及混合分层架构

Fig.3 Integrated space-air-ground link and hybrid layered architecture

空天地一体化网络的实现仍面临多项挑战。首先,异构网络融合是核心难点,涉及不同通信协议与技术标准的有机集成。其次,网络的复杂性要求具备先进的网络管理与控制能力,包括拓扑发现、性能监测与故障诊断等功能。在资源调度方面,有研究将资源分配问题建模为最小化最大响应时间的优化问题,并提出学习型协同粒子群优化算法,以实现在复杂约束下的高效自主调度^[37]。另有研究整合数字孪生与联邦强化学习,构建面向动态低空通信环境的智能资源管理框架,通过环境归一化建模增强网络泛化能力,并协同优化时延、能耗与资源效率等多重目标^[38]。此外,空天地网络的开放性与异构性也带来了严峻的安全挑战,需开展跨层安全机制设计。针对低空设备算力受限的特点,有研究提出协同加密与检测框架,将轻量级加密技术与高精度检测模型深度融合,为资源受限的无人机平台提供完整安全解决方案^[39]。

在系统阐述低空通信背景和典型架构的基础上,为切实提升其通信性能与可靠性,仍需进一步突破物理层传输与网络层管控的关键技术瓶颈。下文将分别从物理层、数据链路层、网络层3个维度,系统论述支撑低空通信系统实现高效、稳定与规模化应用的核心关键技术。

3 面向低空通信的物理层关键技术

低空通信网络作为构建“空天地海”一体化信息网络的关键组成部分,是支撑无人机物流、城市空中交通、应急通信等新兴应用的核心基础设施,其物理层面临高度动态的三维拓扑、复杂的信道传播特性、显著的多普勒频移等挑战。为应对这些挑战,一系列先进的物理层技术被广泛研究与应用,旨在提升系统容量、覆盖范围、传输可靠性及频谱效率。低空通信中的物理层技术包括波形与多载波设计、多天线与波束成形、信道建模与估计等技术,将相关技术汇总如表1所示。

表1 低空通信物理层技术汇总

Table 1 Summary of physical layer technologies for low-altitude communication

| 研究方向 | 挑战与难题 | 关键技术 |
|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 波形与多载波技术 ^[40-54] | 多普勒扩展显著 业务量分配不均 OFDM带外泄漏严重 | 基于滤波器的调制波形 基于变换域的调制波形 |
| 多天线与波束成形 ^[55-70] | 网络结构三维立体 用户位置与高度差异大 终端动态特征明显 | 大规模多输入多输出技术 波束成形技术 智能波束管理技术 |
| 信道建模与估计 ^[71-78] | 低空通信环境复杂动态 多径效应与阴影衰落 低空环境影响显著 | 三维信道建模与预测 高精度信道估计 |
| 频谱共享 ^[79-85] | 高频谱资源需求 频谱复用干扰抑制 | 频谱感知 动态频谱共享 |
| 通信感知一体化 ^[86-91] | 广域网络协同 多维度资源管理 | 分布式资源调度 复杂干扰与不确定性建模 |

3.1 波形与多载波技术

由于无人机和空中平台的高速移动性,低空通信信道呈现出快时变、多普勒扩展显著等复杂特征。传统正交频分复用技术(Orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)通过将宽带信道划分为若干窄带子载波来对抗多径衰落,并利用频域资源调度实现对用户需求的灵活适配,能较好地应对低空网络中业务量分布不均、负载快速变化的特点^[40];但该技术对多普勒频移敏感,无人机的快速移动会破坏子载波间的正交性;OFDM技术的高峰均比特特性会限制无人机的功率与传输距离。

因此,需要探索新的多载波技术以满足低空通信的特点及需求。目前阶段比较成熟的波形设计方案可以分为基于滤波器的调制波形和基于变换域的调制波形,具体包括滤波器组多载波(Filter bank multicarrier, FBMC)、通用滤波多载波(Universal filter multicarrier, UFMC)、滤波正交频分复用(Filtered-orthogonal frequency division multiplexing, F-OFDM)、正交时频空(Orthogonal time frequency space, OTFS)、仿射频分复用(Affine frequency division multiplexing, AFDM)等。

3.1.1 基于滤波器的调制波形

为了克服 OFDM 技术中的频谱泄露问题,FBMC 技术将每个子载波独立进行滤波,从而减少子载波间的干扰。Yadav 等^[41]对 FBMC 调制技术在 5G 移动系统中的有效性进行了研究,结果表明该系统在频谱效率和其他关键参数方面优于传统的 OFDM 系统。但 FBMC 对每个子载波单独滤波的操作会引入较高的复杂度且处理时延较大,不适用于对时延要求高的系统^[42]。UFMC 技术可以看作是 OFDM 与 FBMC 的折中方案^[43],该技术不再对单个子载波进行滤波,而是将整个频带划分为不同子频带并对每个子频带进行滤波,从而在频谱效率和计算复杂度之间实现平衡,使其可以用于各种高速宽带和低延迟应用,但 UFMC 不适用于更高速率的应用。广义滤波器组正交频分复用技术(General filter bank-orthogonal frequency division multiplexing, GFB-OFDM)^[44]用两级小点数快速傅里叶逆变换(Inverse fast Fourier transform, IFFT)代替传统大点数的 IFFT,结合多相滤波结构,实现了多子带信号的联合优化。同时,GFB-OFDM 能够根据具体业务需求和场景特点,灵活设置子带数量、带宽、子载波间隔以及滤波器长度等参数,在保障高频谱效率、灵活资源分配和大传输容量的同时,进一步降低系统的峰值平均功率比^[45]。此外,该多载波技术能够显著提高频谱利用率并抑制带外泄漏,满足超宽频带、超高速的需求,适合在低空通信复杂场景下的应用。F-OFDM 技术^[46]通过在子带中引入频谱整形滤波器有效抑制信号频谱泄漏,从而提升频谱利用效率,其核心优势在于允许滤波器长度超过循环前缀长度,在改善频谱局部性的同时将符号间干扰维持在可接受水平。在此基础上,Zhang 等^[47]进一步提出基于 F-OFDM 的异步多址接入方案,移动终端通过频谱整形滤波器抑制旁瓣泄漏,基站端则利用滤波器组消除多用户干扰,实现了低复杂度下的多用户通信。

3.1.2 基于变换域的调制波形

OTFS 调制在延时-多普勒域中采用二维调制设计方法,能有效提升系统在高速移动、短包传输和大规模天线等场景下的传输性能^[48]。该技术可以视为对码分多址与 FDM 技术的推广,兼具二者的优势,并能将时变多径信道转化为延时-多普勒域中的准静态信道^[49]。相较于 OFDM 系统,OTFS 可以获得更低的误块率,同时在高多普勒信道中表现出更好的鲁棒性。因此,该方案在车辆网络、无人机网络、毫米波通信、通感一体化等方向具有广泛应用前景。AFDM 调制将信息符号调制于 Chirp 信号上,并通过配置离散仿射傅里叶变换参数,使信道在离散仿射傅里叶变换域的冲激响应完整呈现其延时-多普勒特征,实现高移动性信道条件下的最优传输性能^[50]。在此基础上,Du 等^[51]提出了一种简化的 AFDM 系统,通过压缩参数配置增强与现有系统的兼容性,在保持通信性能同时降低整体实现复杂度。基于正交线性调频分频复用调制(Orthogonal chirp division multiplexing, OCDM)被认为是 OFDM 的更佳替代方案,该方案是一种基于离散菲涅尔变换的多载波调制技术^[52]。与 OFDM 中采用正交子载波相类似,OCDM 本质上由一组带宽相同且相互正交的 Chirp 信号构成。但相比 OFDM,OCDM 具备更好的抗干扰能力,对多普勒频移和多径衰落具有更好的稳健性,更适用于低空通信等高动态环境。Omar 等^[53]探究了不同类型无线干扰对 OCDM 性能的影响,研究表明其对时间突发干扰和窄带干扰都具有鲁棒性。Wan 等^[54]使用 OCDM 波形应用于毫米波无人机的通信感知一体化(Integrated sensing and communications, ISAC)系统中,并提出了一种集成 OCDM 与先进毫米波调频连续波雷达的整体波形设计,为资源受限的无人机提供了高能效的 ISAC 解决方案。

3.2 多天线与波束成形

低空通信环境相较于传统蜂窝网络环境有显著差异,其用户不仅包括地面终端,还涉及大量无人机和低空飞行器,因此网络覆盖范围呈现三维立体分布,用户位置和高度差异大,同时高速移动性和动态性特征明显。这些特点使得传统的二维天线架构与固定波束设计难以满足服务需求,从而引出了多天线与波束成形技术。

3.2.1 多天线技术

利用大规模天线阵列增加的空间自由度,Massive MIMO 技术能实现多用户并行传输,从而显著提高资源利用率并降低干扰^[55]。基站部署配置大规模天线阵列可以提供分集和阵列增益,使得

用户和基站间的功率效率也显著提升。Marzetta 等^[56]在理论上进一步奠定了 Massive MIMO 的基础,强调其在渐进极限下能够消除小区域干扰并显著提高系统容量。与地面环境相比,低空通信的典型问题是信号在空域快速扩散且干扰源分布更复杂。因此,Wang 等^[57]提出结合信道建模与能效优化的架构以适应空天地一体化环境,表明混合波束成形能够在大规模阵列规模与硬件复杂度之间实现良好折衷。为应对网络设备大规模接入带来的功耗急剧增加难题,具有低功耗、低复杂度、低成本特点的智能反射面(Intelligent reflecting surface, IRS)技术应运而生^[58]。根据 IRS 的结构特点,可以将其看作一个大规模无源天线阵列,每一个单元都可以通过相移来控制入射信号的反射,实时动态调整无线环境,相较于传统设备具有更低的功耗、更高的效率和可靠性。IRS 技术与 Massive MIMO 技术对比如图 4 所示。此外,IRS 可以提供额外的视距链路,使得通信系统具有更大的覆盖范围、更好的通信性能和更强的可靠性。Zhu 等^[59]提出了一种在毫米波段工作的 IRS 辅助 ISAC 系统,通过联合设计雷达信号协方差矩阵、通信系统的波束成形矢量和 IRS 相移,最大化了 ISAC 系统的传输速率。Jia 等^[60]提出了一种无人飞行器携带的 IRS,考虑最佳的 UAV 轨迹和 IRS 部署,提高了系统的遍历容量。Xie 等^[61]研究了由 IRS 辅助的无人机物联网传输系统,实现了最小化信息年龄和无人机能耗。Wei 等^[62]采用虚拟天线阵列与 IRS 联合波束成形和被动波束成形,优化系统的保密速率、最大旁瓣电平和总能耗。

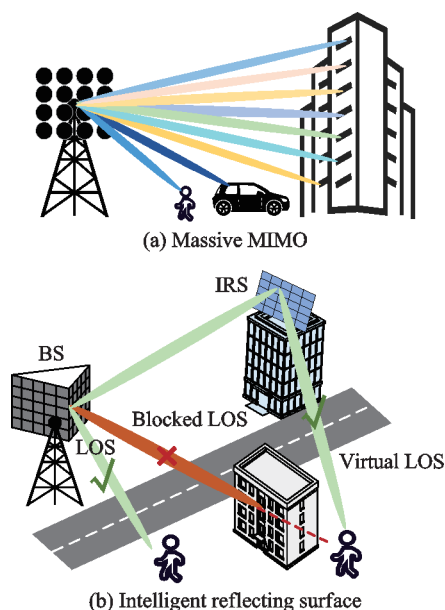


图 4 IRS 和 Massive MIMO 技术对比示意图

Fig.4 Comparison diagrams of IRS and massive MIMO technologies

3.2.2 波束成形技术

波束成形是一种通过调整天线阵列的辐射特性,以形成定向信号传输的技术。该技术可以根据具体需求对信号的空间分布进行精细控制,从而提高通信质量和频谱效率,目前已经广泛应用于第 5 代移动通信、第 6 代移动通信、卫星通信等领域^[63]。联合波束成形的无人机通信网络在覆盖范围和服务质量方面有明显优势,但在高速动态场景下,频繁的信道状态更新会导致较大的系统开销,对波束成形的实时性和鲁棒性提出了严峻挑战。Nam 等^[64]首次提出全维度 MIMO 的系统性概念,并通过实测与仿真表明,在垂直与水平双维度同时进行波束控制能够有效扩大小区容量与覆盖范围。随后,Xiang 等^[65]进一步面向无人机场景,研究了联合波束成形与三维阵列指向的优化问题,在多 UAV 干扰条件下可有效提升目标链路信噪比,同时降低对非目标用户的干扰泄漏。Zeng 等^[66]则从综述角度总结了 UAV 通信中的挑战,特别强调了三维波束成形在保障空地链路稳定性与服务公平性方面的重要性。Huang 等^[67]设计双无人机集群的协作波束成形方案,实现了海上复杂信道环境的可靠传输。这些研究表明,通过在三维空间内形成窄主瓣并灵活调整俯仰角度,基站能够更好地服务不同高度和轨迹的 UAV,从而显著改善空域利用效率。

3.2.3 智能波束管理

低空通信中无人机的高速移动和不可预测轨迹对波束稳定性提出了更高要求,单纯依赖静态波束设计难以应对快速时变的链路质量。智能波束管理通过结合机器学习和深度强化学习方法,对无人机轨迹和通信需求进行预测,并在此基础上实现波束的动态调整与快速切换,从而有效降低波束失配带来的性能损耗。Alkhateeb 等^[68]提出了一种基于深度学习的协调波束成形方法,利用神经网络在毫米波高机动场景中实现了对波束方向的快速预测,显著降低了反馈开销。Lim 等^[69]则提出了结合深度神经网络的波束跟踪算法,在高速移动条件下取得了比传统扩展卡尔曼滤波方法更优的波束对齐性能。与此同时,Krunz 等^[70]探索了基于强化学习的波束管理方法,能够在无人机轨迹和信道状态快速变化的情况下实现在线自适应学习与波束切换,从而有效降低链路中断率。这些成果表明,将人工智能方法引入波束管理,不仅提升了低空场景下的波束追踪精度,也在复杂环境中提高了系统的鲁棒性与稳定性。

3.3 信道建模与估计

由于低空空域环境的复杂性和动态性,低空信

道特性与传统蜂窝通信或卫星通信存在显著差异,低空飞行器常处于低高度、高机动和频繁切换的状态,导致信道呈现强非平稳性和快速时变特征。此外,低空信道具有较强的多径效应和阴影衰落,受到地形、建筑物及气象条件等因素显著影响^[66]。因此建立合理的低空信道模型对于系统设计与性能优化至关重要。

3.3.1 信道建模

低空信道建模需要考虑复杂的环境,动态变化的障碍物分布及电磁波的传播,构建能够反映信道特性的数学模型。基于几何的信道建模方法通过模拟无线电波在复杂环境中的传播路径,能够较为直观地反映出信道的物理特性。该方法适用于低空环境中多径效应和阴影衰落现象的分析,如针对城市低空场景,刘健明等^[71]提出的树木精细模型可以模拟城市树木环境中电磁波传播的特性。基于概率统计建模的方法则侧重于从统计学的角度描述信道的随机特性,可以较好地刻画信道的空间相关性和频率相关性。针对无人机感知信道的路径损耗特性,Al-Hourani等^[25]提出了一种高度依赖的路径损耗模型,揭示了空地链路损耗与飞行高度和环境特征的关系。综合自由空间、统计模型及基于测量的混合建模方法,Khuwaja等^[72]系统综述了无人机通信的信道建模方法。传统二维信道模型往往无法准确反映低空飞行器的俯仰角、偏航角等因素对信道传播的影响,因此三维建模方法被提出以更精确地刻画空间相关性和多径传播特性,第3代合作伙伴计划(3rd generation partnership project, 3GPP)在 TR 36.777 中提出了针对 UAV 的三维信道建模框架,能够捕捉低空环境下的角度扩展与高度相关效应^[73]。与此同时,基于人工智能的方法也被引入信道建模,如 Jagannath 等^[74]利用深度生成模型实现复杂传播环境下的三维信道重构与预测,展现出良好的泛化能力。

3.3.2 信道估计

信道估计的核心目标是从有限的观测数据中推断出信道的状态信息,但低空环境中飞行器速度快,信道动态特性显著,使得传统的导频辅助信道估计方法难以满足精度与时延的要求。经典的信道估计方法基于插值,其基本思想是利用已知的导频符号信息推测未知子载波或时隙的信道响应。对该类算法的改进集中在设计插值算法上,纪金伟等^[75]提出了一种基于 Voronoi 图的加权插值算法,通过划分 Voronoi 小区域计算权重系数,能够有效提高插值精度。基于压缩感知的信道估计方法适合于稀疏信道的估计问题,在低空网络中,由于设

备数量庞大且活跃性低,联合用户活性检测与信道估计可实现检测准确率和信道估计性能的同步提升^[76],Gao 等^[77]利用信道的稀疏特性设计的信号重构算法可以降低导频开销,有效提升高速场景下的估计精度。结合机器学习的信道估计方法也被广泛应用,如 Ye 等^[78]提出端到端的深度神经网络估计框架,有效提升了非线性和非平稳信道下的估计精度。

3.4 频谱共享

低空通信系统需兼顾高速率、低时延与高可靠性,其对频谱资源的需求远超传统地面蜂窝网络,静态固定的频谱分配模式已难以满足未来密集网络的需求。动态频谱共享与认知无线电技术被引入,旨在提升频谱利用效率,其核心是赋予低空通信节点“感知-学习-决策-适应”的智能。通过持续感知周围的无线环境,识别并利用蜂窝、专网、卫星等授权网络,自适应地选择最佳通信频段、功率和调制编码策略,以实现频谱资源的最优利用。

3.4.1 频谱感知

频谱感知主要通过对无线电信号进行采集、分析和评估,掌握可用频段的分布情况,实现对频谱资源的有效分配与管理,旨在利用有限的频谱资源满足日益增长的无线通信需求。随着无人机、物联网设备及其他低空飞行器的普及,低空频谱环境变得更加复杂多样。目前常用的理论模型包括能量检测法、匹配滤波器法及机器驱动的方法。能量检测以其易于实现的优点被广泛使用,但易受到噪声不确定性的影响,适用于信噪比较高的场景^[79]。匹配滤波器法借助已知信号特征进行精确匹配,在未知信号情况下表现较差。相比之下,机器学习方法能够自适应提取信号特征,展现出了更强的鲁棒性。如利用长短时记忆网络进行频谱信号的时间序列感知判断,可以在复杂噪声环境中实现稳定的频谱感知。Thilina 等^[80]提出了基于机器学习的新颖协作频谱感知算法,将无监督学习中的 K-均值聚类、高斯混合模型算法和有监督算法中的支持向量机和加权 K-最近邻算法用于协作频谱感知,充分利用群体智慧提升频谱感知性能实现了更高的检测结果。针对频谱数据挖掘的深度和广度不足等问题,Zhang 等^[81]提出了一种基于复合神经网络架构的频谱感知系统,提高了监测方法的智能化水平。

3.4.2 动态频谱共享

在低空通信网络中,无人机高机动性、灵活部署能力有效弥补了传统地面蜂窝网络覆盖范围的不足。但由于无人机依托空中链路进行通信,当其

与地面网络复用相同频段时,可能会对地面用户造成显著干扰。为实现低空网络中不同层级终端的频谱复用,研究者针对频谱共享问题开展了大量研究。Shang等^[82]利用多架无人机协同进行频谱感知,并结合深度学习对感知数据进行分类判别,从而提高频谱利用率并降低用户间干扰。Azari等^[83]提出了无人机通信链路和蜂窝地面用户上行链路的共享方案,对可用时频资源进行正交划分并通过功率调控实现两类链路在同一资源上的可控共享。利用了无人机机动性高的特点,Shen等^[84]通过机器学习算法将空间频谱访问利用机会概率描述为3层球状结构进行建模,从而实现频谱资源的分配与共享。Wei等^[85]结合随机几何分析无人机的网络覆盖性能,再利用优化理论计算无人机的最大传输能力和最优高度,从而实现无人机网络和地面网络之间的高效协作频谱共享。

3.5 ISAC 技术

作为6G的关键使能技术之一,ISAC为低空经济的发展提供了重要支撑,其核心思想是将传统上分离的通信与感知功能统一到一个系统框架中,通过共享频谱、硬件以及信号处理资源,实现通信与感知性能同步提升^[86]。在低空经济场景中,ISAC不仅可以为地面用户和无人机群体提供稳定可靠的高速通信服务,还能够利用通信信号的反射回波对低空空域进行实时监测,从而支持无人机入侵检测、电子围栏构建、飞行路径管理以及空域交通管制等关键任务。这种感知模式避免了冗余的传感器部署,使得设备形态更为简洁,系统运作更为高效,对于低空空域的大规模覆盖和动态监管尤为关键。

与传统研究主要聚焦于单小区场景不同,低空经济的发展需要依赖于大范围的空地一体化网络协同。网络级ISAC能够通过多基站联合探测、分布式资源调度和全局信息融合,实现对低空空域连续覆盖和高精度感知。例如,随机几何方法已被用于分析通信网络的覆盖概率^[87]、平均吞吐率和干扰特性^[88],其结果为无人机集群通信与空域监测提供了理论依据。同时,ISAC研究正逐步拓展到低空场景中的复杂干扰与不确定性建模,例如建筑遮挡对感知精度的影响^[89]、无人机机群密集场景下的通信与感知干扰^[90],以及MIMO架构下的波束成形策略^[91]。这些成果显示,通过跨层优化与联合设计,ISAC技术能够在保障通信服务质量的同时,提升对无人机目标的探测、定位与跟踪能力。

4 面向低空通信的数据链路层及网络层关键技术

面向低空复杂通信环境,数据链路层与网络层的协同设计是提升系统整体性能的关键。数据链路层作为通信协议的底层基石,通过高效的介质访问控制(Medium access control, MAC)和链路调度,直接决定了信道资源的利用效率和链路可靠性。网络层则如同全局交通的规划者,负责在动态拓扑中为数据选择最优端到端路径。二者紧密耦合:链路层的稳定性是路由协议有效运行的前提,而网络层的路由决策又深刻影响着链路的负载与质量。低空环境的三维高动态性、复杂电磁干扰等独特挑战,使得传统的、孤立的层次设计范式难以适用。本章旨在打破严格的分层界限,综述面向低空通信的数据链路层与网络层关键技术,探讨如何通过跨层优化共同构建一个自适应、智能化的通信基础。相关技术范畴汇总如表2所示。

表2 低空通信链路层及网络层技术总结

Table 2 Summary of link and network layer technologies for low-altitude communication

| 研究方向 | 挑战与难题 | 关键技术 |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|
| 路由协议设计 ^[92-96] | 网络拓扑高动态 能量与计算资源 紧缺 | 基于拓扑的路由协议 基于地理位置的路由协议 基于预测的智能路由协议 |
| 三维 移动性 管理 ^[97-100] | 高可靠、低时延 通信需求 通信网络异构复杂 | 智能切换管理 位置管理 |
| QoS 管理 ^[101-108] | 空中节点高自由度 时变链路质量与时 延约束 | 边缘计算与卸载 无线资源分配 |
| 安全与 隐私 保护 ^[109-116] | 通信链路天然开放 集群网络资源强 受限 | 无人机身份认证技术 区块链辅助的加密技术 |
| 智能网络 管理 ^[117-119] | 多维资源协同调度 端到端服务质量 保障 | 流量预测与负载均衡 飞行轨迹与通信联合优化 |

4.1 路由协议设计

通信协议栈中网络层承担着全局路径规划的职责,其核心正是路由协议。低空通信网络,特别是FANET作为支撑低空经济的核心基础设施,其路由协议的设计直接决定了整个系统在命令控制、协同感知与数据回传等方面的性能。与传统移动自组织网络(Mobile ad-hoc network, MANET)和车载自组织网络(Vehicular ad-hoc network, VANET)相比,FANET的路由协议面临着:高动态拓扑、能量与计算资源约束、复杂信道环境等一系列更为严峻的挑战,为应对上述挑战,研究人员从不同维度提出了多种路由策略,其演进历程体现

了从通用到专用,从被动到智能的发展趋势。

4.1.1 基于拓扑的路由协议

这类协议通过周期性地交换控制消息来维护整个网络的拓扑信息图,所有路由决策都基于这张“网络地图”。由于基于全局或局部拓扑信息进行路由计算,所选路径通常是经过跳数、延迟等指标优化的较优路径。协议机制相对直观,易于理解和实现,是自组织网络路由研究的基础。但在高动态的 FANET 中,为保持拓扑信息实时性,需频繁洪泛 Hello 等控制消息,大量消耗带宽和节点能量。拓扑变化后,网络需要较长时间重新收敛到一致状态,在此期间路由信息可能不准确,导致数据包丢失。控制开销随网络规模扩大呈指数级增长,难以支撑大规模无人机集群。适用于节点移动性较低、网络拓扑变化缓慢、规模较小的低空应用场景^[92]。但研究者们并未放弃此类协议,而是致力于通过多种创新方法对其进行优化和改进,指出标准优化链路状态路由协议(Optimized link state routing, OLSR)在多点中继(MultiPoint relay, MPR)选择上的能量效率缺陷,并提出了一个切实可行的改进方案。该方案通过在 MPR 选择机制中引入剩余能量作为首要指标,并以覆盖度作为次要权衡指标,为设计更节能、更稳健的移动自组织网络路由协议提供了有价值的思路 and 方向^[93]。

4.1.2 基于地理位置的路由协议

此类协议利用节点实时位置信息进行路由决策,其核心思想是将数据包朝着目的地的方向转发,是 FANET 中一类至关重要且应用广泛的路由策略。基于地理位置的路由协议(Geographic opportunistic routing protocol, GORP)摒弃传统路由协议中维护复杂路由表或网络拓扑图的方式,转而利用全球定位系统提供的节点实时地理位置信息作为路由决策的唯一依据。无需洪泛路由请求或维护全网拓扑,极大地减少了控制开销,节省了宝贵的带宽和节点能量。路由决策仅基于本地地理位置信息,计算简单,几乎无延迟,能快速适应网络拓扑变化。每个节点独立做决策,无需中心节点干预,网络规模扩大时性能不会显著下降。但存在以下缺陷:当前节点发现自己比所有邻居都更靠近目的地,导致数据包无法继续转发。解决此问题通常需要依赖周边转发等恢复模式,算法复杂且可能产生环路。协议性能与定位系统的精度、可用性和可靠性强绑定。在全球定位系统信号受阻(城市峡谷、室内)或遭受欺骗干扰时,路由性能会急剧下降甚至完全失效。提出的 GORP 协议成功地将协作频谱感知与地理机会路由相结合,通过一种分布式的、智能化的方式,有效利用了认知无线电网路中

的时空频谱机会,显著提升了路由性能^[94]。

4.1.3 基于预测的智能路由协议

该协议核心是利用已知信息(轨迹、任务计划、运动模型)或人工智能算法预测网络未来状态,从而实现前瞻性的路由决策。能预测链路寿命和网络拓扑变化,提前计算并切换至更稳定的路径,显著减少路由中断和控制开销。通过优化长期性能指标(如吞吐量、时延),能提供更优的端到端 QoS。但预测算法和人工智能模型通常需要较强的计算能力,对资源受限的无人机节点构成挑战。创新性地使用高斯分布模型来理论推导无人机移动的概率密度函数,通过已知节点在当前时刻的位置和速度,可以预测其在未来一段时间内最可能出现的所有位置分布,而非一个单一的确切位置。这极大地增强了对不确定性的包容性。例如,时间间隔按需预测路由通过结合多个标准在确保可靠和高效数据传输的同时,解决路由交换过程中的高延迟和广播开销问题^[95]。通过移动性预测和虚拟路由的有机结合,成功地将无人机的高机动性从一种网络挑战转化为路由优化依据,为构建下一代低空物联网中稳定、高效、自适应的通信链路提供了坚实的技术基础^[96]。

4.2 三维移动性管理

移动性管理是一个典型的跨层设计问题,涉及协议栈的多个层次。其中保障链路级连接的连续性主要归属于数据链路层,而维持网络级会话的连续性则归属于网络层。本节将重点讨论数据链路层的移动性管理关键技术。低空通信网络中的移动性管理是确保 UAV 在高速移动、拓扑频繁变化的环境中保持无缝、可靠通信的核心技术。近年来,随着低空经济的迅猛发展,尤其是无人机在物流、巡检、安防等领域的规模化应用,其对通信网络的高可靠、低时延、无缝连续提出了极致要求。在此背景下,移动性管理成为保障 QoS 的核心环节。

4.2.1 智能切换管理

作为数据链路层(MAC 子层)的核心功能,智能切换管理旨在保障无人机在不同网络覆盖区之间迁移时的连接连续性,如城市空中交通中无人机沿固定航线飞行时,提前切换至最优基站。传统的基于瞬时信号强度测量的切换策略在高速移动、拓扑剧变的低空环境中暴露出严重不足,如乒乓效应、切换滞后、高丢包率等问题。为此,学术界与工业界将研究焦点转向了基于轨迹预测的智能切换,旨在通过前瞻性的网络资源调配,从根本上提升移动性管理性能。利用无人机的预定义飞行计划、实时导航数据及机器学习算法,预测其未来位置和移动轨迹,从而提前触发切换流程。将深度学习轨迹

预测技术与传统移动通信的切换管理流程相结合,采用了一个先进的深度学习模型来预测用户的未来轨迹,将预测结果集成到标准的LTE切换流程中,形成了新的决策机制。以解决无人机作为空中基站为地面用户提供覆盖时,因用户移动性而引发的切换不可靠、频繁和延迟等问题^[97]。提出了一种创新的基于深度学习轨迹预测的智能切换机制。利用神经网络预测用户的未来运动轨迹,并基于预测位置提前计算潜在的参考信号接收功率值,从而做出更前瞻、更准确的切换决策,避免不必要的测量上报和乒乓切换,成功地证明了人工智能技术在解决低空通信网络特定挑战中的巨大潜力^[98]。

4.2.2 位置管理

在低空通信网络中,位置管理作为移动性管理的使能基础,是一个支撑数据链路层和网络层的跨层功能。负责实时追踪与更新网络节点的位置信息,为移动性管理中的切换决策、路由优化和资源分配提供关键数据支撑。移动性管理的核心目标是保障节点在移动过程中的通信连续性与服务质量,而实现这一目标的前提是网络必须知晓节点的实时位置。位置管理主要分为分布式与集中式两种范式,二者与移动性管理存在深度耦合关系。在集中式位置管理中,由一个中心实体统一维护全网位置信息。无人机周期性地向中心发送位置更新,中心构建全局位置数据库并响应查询请求。中心基于全局位置视图,可为移动性管理提供最优切换目标选择、路由路径计算等决策。例如,GCS可综合所有无人机位置,指令某无人机切换到负载较轻的基站。移动性管理策略(如切换阈值、位置更新频率)由中心统一制定并下发,确保全网一致性。将任务分配与位置管理联合建模,统一通信与任务性能的权衡优化,实现通信性能与任务执行效果的最大化。设计高效启发式算法,结合粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)算法解决非确定多项式-难问题(Non-deterministic polynomial hard, NP-hard),为实时应用提供可行方案^[99]。提出了一种基于连续凸近似和交替优化的高效迭代算法,联合优化无人机的飞行轨迹和地面终端的位置信息,最大化所有地面终端中的最小保密速率,从而确保用户间的公平性。将通信平台(无人机)本身的位置作为一个核心的、可优化的变量。无人机不再是被动地根据用户位置提供服务,而是主动地、动态地调整其空间位置^[100]。

4.3 QoS管理

4.3.1 MEC与卸载

在网络层,通过智能的计算卸载与任务协同,

可以在系统层面优化资源利用,满足应用的端到端时延和可靠性需求,是实现高阶QoS管理的关键,其核心思想是如何在有限的无人机能量与计算能力、时变链路质量及严格的任务时延约束下将计算任务从无人机卸载到网络边缘服务器。与传统地面MEC不同,无人机辅助的MEC将空中平台作为移动计算节点或作为连接地面终端与地面边缘服务器的中继,具体场景如图5所示,进而引入了新的设计自由度与约束:一方面,无人机的轨迹、速度与位置直接影响通信链路质量与任务卸载延迟;另一方面,无人机本身的能量与计算资源有限,且服务对象通常是移动或时限紧迫的多媒体任务。典型工作将轨迹规划与卸载决策联合建模:Hu等^[101]在UAV-MEC场景中提出将无人机轨迹与用户卸载比例同时优化以最小化延迟/能耗,从而表明轨迹成为影响卸载时延和成功率的关键设计变量;He等^[102]提出了一个在线联合任务卸载、资源分配和无人机轨迹控制方法,使用Lyapunov优化框架将长期优化问题转化为每时隙实时优化问题。在此基础上,研究者还引入多UAV协作、任务依赖与虚拟化移动克隆等机制以提升任务完成率,Mei等^[103]提出的轨迹-资源联合优化框架则把虚拟化计算与空地资源耦合起来,进一步推进了在保证任务时延的同时进行资源高效调度的实现路径。Sun等^[104]提出一个分层架构,通过整合陆地-空中计算能力和无人机的灵活性来兼顾高能源效率和轨迹控制实时性的要求。此外,为满足uRLLC类严格QoS要求,近期研究集中于冗余、接入与重传策略以及UAV的快速位置或高度调整等机制,以在罕见事件下仍保持高可用性^[105]。

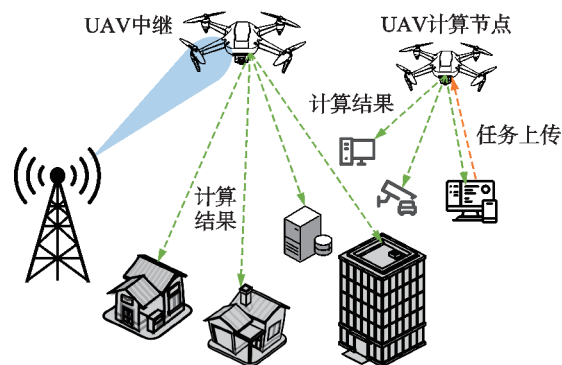


图5 无人机辅助的MEC

Fig.5 UAV-assisted MEC

4.3.2 无线资源分配

作为数据链路层的核心功能,无线资源分配通过时隙、频谱、功率等基础资源的联合调度优化,直接决定了链路的传输速率、时延和可靠性,是实现QoS保障的底层基石。由于UAV-ground链路多

为 LoS 且 UAV 可通过位置调整影响信道,研究提出通过将子载波/时隙分配、功率控制、波束成形与 UAV 位置联合设计来满足差异化 QoS 的目标。例如,在多用户卸载场景下引入非正交多址接入(Non-orthogonal multiple access, NOMA)/速率分拆多址(Rate splitting multiple access, RSMA)等多址手段并结合功率与速率分配,已被证明能提升吞吐与支持更多低时延任务^[106];另一方面,多 UAV 协同分担负载并通过波束空间复用可降低干扰、提升频谱效率,从而改善端到端的延迟与可靠性指标^[107]。实物层面,为实现端到端 QoS,越来越多的工作主张跨层联合,如物理层的波束和频谱分配、链路层的时隙调度和 MEC 层的卸载调度,并基于软件定义网络与 MEC 协同架构,实现全局资源的敏捷编排和快速重配置,以在动态场景下实现在线 QoS 保证^[108]。

4.4 安全与隐私保护

安全与隐私保护是构建可信低空通信系统的核心,其机制贯穿整个网络协议栈。在物理层中,安全主要通过信号处理算法来实现;而在数据链路层和网络层,则依赖于链路加密和密码学算法构建的身份认证、密钥管理等高级安全协议。低空通信网络具有高动态拓扑结构、节点移动性强、通信链路不稳定以及能量受限等特征,使得传统的安全机制难以适用。无人机网络是低空通信网络的重要组成部分,在多无人机协同及无人机与地面基站交互的过程中若缺乏高效可靠的认证机制,攻击者可通过伪装节点、恶意窃听或中间人攻击等手段入侵系统,造成数据泄露、任务干扰等。因此,构建适应低空通信特性的身份认证技术与密钥管理技术已成为低空通信的关键研究方向。本节将重点综述这些面向高层的安全关键技术。

4.4.1 无人机身份认证技术

身份认证是在网络层建立通信实体间信任关系的第一道防线。无人机通常在资源有限的环境中,通过无线通道按照预定任务要求进行远程控制或操作,其控制信息面临被泄露与篡改的风险。传统的认证机制主要包括对称密钥认证机制、非对称密钥认证机制以及轻量级密码协议。在对称密钥方案方面,研究普遍采用高级加密标准(Advanced encryption standard, AES)和 SM4 分组密码算法,其中 SM4 以结构简洁、实现高效、资源占用低等优点被认为更契合低功耗无人机设备^[109]。然而,此类算法在面对侧信道攻击和密钥泄露时仍存在安全隐患。ChaCha20-Poly1305 等新型流加密算法在特定硬件平台上表现出更高的运算效率,但其在间歇通信与丢包环境下的可靠性不足^[110]。非对称

加密机制主要基于椭圆曲线密码体制与公钥基础设施,能够有效提升认证的抗伪造与防篡改能力^[111],此类协议往往依赖中心化密钥分发或高算力设备,不利于无人机集群场景的扩展。针对无人机资源能效受限问题,在椭圆曲线密码基础上,Li 等^[112]提出无人机间双向认证的轻量级认证算法。借助物理不可克隆函数独特的随机性和不可复制性,Alladi 等^[113]将其应用于无人机身份认证中,可以有效防范克隆攻击和物理攻击,从而增强系统的整体安全性。除了上述基于密码学的认证方案,基于射频指纹的辐射源个体识别作为一种物理层认证技术,提供了新的思路。该技术不依赖于预共享密钥或数字证书,而是通过识别无人机通信电台硬件固有的唯一特征来实现身份认证,具有内在防克隆的潜力。尽管其核心特征提取属于物理层范畴,但其认证结果可直接为网络层的接入控制和安全提供关键依据,与传统密码认证机制形成有效互补,共同构建更坚固的低空通信安全防线^[114]。

4.4.2 区块链辅助的加密技术

近年来,区块链技术与人工智能模型逐渐成为面向无人机网络层认证研究的热点方法。区块链分布式账本和不可篡改特性能够消除中心化认证的单点失效问题,实现节点身份与交互记录的可追溯存储。Alladi 等^[115]构建了一种基于区块链的身份认证框架,用于实现无人机场景下的身份认证、数据传输安全等操作。Liu 等^[116]将区块链技术与无人机数据管理相结合,通过对节点标识进行加密,收集飞行数据并签名生成区块链证书实现无人机运行数据的可靠存储与安全防护。此外,结合公钥加密、椭圆曲线等技术,Ghribi 等^[117]将区块链应用于点对点无人机网络中,构建了去中心化的协作通信机制,确保网络通信的一致性与安全性。

4.5 智能网络管理与资源分配

在低空通信网络中,AI 驱动的智能网络管理正成为实现动态 QoS 保证的核心手段。首先,在智能路由与资源分配方面,多智能体强化学习和深度强化学习被用于动态频谱、功率与子载波分配,从而在信息不完备且信道高度时变的环境中实现分布式长期性能优化。具体而言,Cui 等^[118]提出的多智能体强化学习框架用于无人机网络的用户选择、功率和子信道自适应分配,以解决多 UAV 协同资源冲突问题并在通信与信息获取的长期回报上取得显著增益。在流量预测与负载均衡方面,基于时空深度模型的短时流量预测可为边缘侧的预测式资源预留和负载迁移提供可靠依据,已有工作采用卷积网络和时序网络提升小区级流量预测精度并将预测结果用于热点抑制与负载平衡决

策^[119]。在飞行轨迹与通信联合优化方面,研究表明将3D轨迹规划与无线资源分配联合建模可以在延迟、能耗和覆盖之间取得更好的权衡,相关工作通过能效/吞吐的轨迹优化、基于深度强化学习的在线轨迹—资源协同控制以及将多UAV协同纳入决策来提升端到端QoS表现^[120]。

5 总结与展望

低空经济作为国家战略性新兴产业,其发展高度依赖于高效、可靠、安全的通信技术支撑,当前研究已取得显著进展,但仍面临诸多挑战,未来发展前景广阔。本文系统综述了面向低空经济的低空通信技术研究现状与发展趋势。通过对低空通信体系架构、物理层关键技术和数据链路层及网络层关键技术的深入分析,揭示了这一领域从理论基础到技术实践的全貌。

5.1 问题总结

根据本文综述的面向低空经济的通信技术的发展趋势和研究内容,总结关键问题如下。

(1)理论模型与实际部署的差距:当前大多数研究基于完全已知的信道状态信息、规则的无人机运动模型的理想假设,而在实际低空环境中,信道快速时变、无人机机动性难以预测,导致理论性能与实际表现存在显著差距。如何设计对模型误差敏感、具有强韧性的算法,是一个关键挑战。

(2)跨层协同设计的统一框架:当前研究多是“零敲碎打”式的跨层优化,缺乏一个系统性的理论框架来指导如何联合优化物理层、MAC层、网络层甚至应用层参数。

(3)不同技术维度之间的权衡:现有研究在频谱效率、能耗、时延和安全性等目标之间存在难以调和的权衡。例如,追求极高的频谱效率可能导致功耗上升,影响无人机续航。未来的研究需要探索智能化的权衡策略,实现多目标联合优化。

(4)评估标准的全面性与真实性:当前技术的评估多依赖于仿真,且场景相对简单。一个开放性挑战是如何建立更贴近现实的测试平台和评估基准,包含真实的城市地理信息、电磁干扰环境等,以验证技术在实际场景中的有效性。

5.2 未来展望

空天地一体化架构打破了传统通信的维度限制,通过天基卫星的广域覆盖、空基平台的灵活中继与地基网络的精准服务,构建了立体多维的通信体系。这种架构创新不仅解决了低空飞行器的全域覆盖难题,更通过多层协同实现了资源利用的最优化。物理层与网络层的边界日益模糊,波束成形

与路由决策的联合优化、信道特性与移动性管理的深度耦合,标志着系统设计理念从分层独立向跨层协同的根本转变。智能技术已成为驱动发展的核心引擎,人工智能不仅赋能于各个技术环节,更重新定义了通信系统的运作范式。基于深度学习的信道预测突破了传统建模的局限,强化学习驱动的资源分配实现了动态环境的自主优化,数字孪生技术更是通过虚实映射为系统提供了全生命周期的验证能力。这种智能内生的特性使通信系统具备了自感知、自决策、自演化的能力,为应对低空环境的复杂性和不确定性提供了全新解决方案。依据低空经济发展需求和低空通信技术发展现状,可总结低空通信技术发展将呈现以下趋势:

(1)通感算一体化深度演进,通过资源共享和功能融合提升系统效率。

(2)智能算法与通信硬件协同设计,实现性能与功耗的最佳平衡,能量约束与性能需求的矛盾尚未根本解决,特别是在小型无人机平台上的能效优化仍需突破。

(3)安全隐私保护贯穿系统全生命周期,构建可信可靠的低空通信环境。安全防护体系仍需加强,以应对日益复杂的网络攻击和隐私泄露风险。

(4)统一标准制定,异构设备的互联互通缺乏统一标准,制约了大规模部署的应用。

参考文献:

- [1] 国务院.国家综合立体交通网规划[EB/OL].(2021-02-24).https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5593440.html.
- [2] 中科院地理科学与资源研究所.中国低空经济发展指数报告[EB/OL].(2025-04-30).http://www.lrsd.org.cn/sylb/202505/t20250507_833390.html.
- [3] 汤新民,顾俊伟,刘冰,等.低空监视技术及其发展趋势综述[J].南京航空航天大学学报,2024,56(6):973-993.
TANG Xinmin, GU Junwei, LIU Bing, et al. Review on low-altitude surveillance technology and its development trend[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2024, 56(6): 973-993.
- [4] 陈林,缪志强,王祥科,等.自主飞行器技术及其在低空经济中的应用综述[J].机器人,2025,47(3):470-496.
CHEN Lin, MIAO Zhiqiang, WANG Xiangke, et al. Overview on autonomous aircraft technology and its application to low-altitude economy[J]. Robot, 2025, 47(3): 470-496.
- [5] 周遂之.4G网络无人机控制的设计与实现[D].重庆:重庆邮电大学,2019.
ZHOU Suizhi. Design and implementation of UAV

- control in 4G network[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [6] 中国市长协会. 城市空中交通国际经验及对我国的启示[EB/OL]. (2025-09-01). <https://www.citieschina.org.cn/show/id/a1750213374101.html>.
- [7] 赵川斌, 张腾宇, 冯源, 等. 面向低空无人机的通感一体化关键技术及原型验证研究[J]. 物联网学报, 2025, 9(2): 27-38.
ZHAO Chuanbin, ZHANG Tengyu, FENG Yuan, et al. Key technologies and prototype validation research of integrated sensing and communications for low altitude UAV[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2025, 9(2): 27-38.
- [8] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向6G的无人机通信综述[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 781-789.
CHEN Xinying, SHENG Min, LI Bo, et al. Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 781-789.
- [9] 安建平, 李建国, 于季弘, 等. 空天通信网络关键技术综述[J]. 电子学报, 2022, 50(2): 470-479.
AN Jianping, LI Jianguo, YU Jihong, et al. Key technologies of space-air-ground communication networks: A survey[J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2): 470-479.
- [10] 刘畅, 呼志远, 刘海宁, 等. 低空飞行器物理层通信安全: 技术发展现状、挑战与未来发展[J]. 移动通信, 2025, 49(8): 34-41.
LIU Chang, HU Zhiyuan, LIU Haining, et al. Physical-layer communication security for low-altitude aerial vehicles: Status, challenges, and future development[J]. Mobile Communications, 2025, 49(8): 34-41.
- [11] BAE J H, KIM Y S, HUR N, et al. Study on air-to-ground multipath channel and mobility influences in UAV based broadcasting[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence. Jeju, South Korea: IEEE, 2018: 1534-1538.
- [12] CHEN Y Q, YI D, ZHANG H T, et al. Temporal correlation and joint coverage for finite 3-D UAV networks with blockage effects[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(12): 2615-2619.
- [13] TIAN M Q, LI C L, HUI Y L, et al. On-demand multiplexing of eMBB/URLLC traffic in a multi-UAV relay network[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(6): 6035-6048.
- [14] SUN Z M, SUN G, WU Q Q, et al. TJCCT: A two-timescale approach for UAV-assisted mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(4): 3130-3147.
- [15] WON J, KIM D Y, LEE J W. Joint optimization of location, beam, and radio resource for an aerial base station with controllable directional antennas[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(16): 27571-27583.
- [16] FAN X C. Intelligent radio spectrum management and dynamic spectrum allocation algorithm[C]//Proceedings of 2024 International Conference on Power, Electrical Engineering, Electronics and Control (PEEEEC). Athens, Greece: IEEE, 2024: 836-841.
- [17] 武燕燕, 吴松. 低轨卫星辅助的低空智能网架构分析及设计[J]. 电信科学, 2025, 41(3): 27-37.
WU Yanyan, WU Song. Architecture analysis and design for low earth orbit satellite-assisted low-altitude intelligent network[J]. Telecommunications Science, 2025, 41(3): 27-37.
- [18] SUN G, XIAO J, LI J H, et al. Aerial reliable collaborative communications for terrestrial mobile users via evolutionary multi-objective deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2025, 24(7): 5731-5748.
- [19] PRATHYUSHA Y, SHEU T L. Resource allocations for coexisting eMBB and URLLC services in multi-UAV aided communication networks for cellular offloading[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(5): 6658-6671.
- [20] KHADEM M, ANSARIFARD M, MOKARI N, et al. Dynamic fairness-aware spectrum auction for enhanced licensed shared access in UAV-based networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2025, 73(5): 3076-3092.
- [21] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2334-2360.
- [22] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(2): 1123-1152.
- [23] AL-HOURANI A, GOMEZ K. Modeling cellular-to-UAV path-loss for suburban environments[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(1): 82-85.
- [24] SAFWAT N E, NEWAGY F, HAFEZ I M. Air-to-ground channel model for UAVs in dense urban environments[J]. IET Communications, 2020, 14(6): 1016-1021.
- [25] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments[C]//Proceedings of 2014 IEEE Global Communications Confer-

- ence. Austin, USA: IEEE, 2014: 2898-2904.
- [26] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569-572.
- [27] CHENG X, LI Y R. A 3-D geometry-based stochastic model for UAV-MIMO wideband nonstationary channels[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 6(2): 1654-1662.
- [28] CHEN J X, CHEN P, WU Q H, et al. A game-theoretic perspective on resource management for large-scale UAV communication networks[J]. China Communications, 2021, 18(1): 70-87.
- [29] CHRIKI A, TOUATI H, SNOUSSI H, et al. UAV-GCS centralized data-oriented communication architecture for crowd surveillance applications[C]//Proceedings of 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Tangier, Morocco: IEEE, 2019: 2064-2069.
- [30] 方堃, 茹乐, 于云龙, 等. 低空多无人机自组网数据可靠传输的跨层方法[J]. 计算机工程, 2017, 43(3): 140-146.
- FANG Kun, RU Le, YU Yunlong, et al. Cross-layer method for reliable data transmission in low-altitude UAVs ad hoc network[J]. Computer Engineering, 2017, 43(3): 140-146.
- [31] ZHANG Y, ZHOU Y X, JI Z J, et al. A three-dimensional geometry-based stochastic model for air-to-air UAV channels[C]//Proceedings of 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference. Victoria, Canada: IEEE, 2020: 1-5.
- [32] HUA B Y, HAN L W, DENG Q Z, et al. AAV air-to-air channel: Statistical properties and experimental verification[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(13): 25790-25803.
- [33] WU Q H, ZHANG M, DONG C, et al. Routing protocol for heterogeneous FANETs with mobility prediction[J]. China Communications, 2022, 19(1): 186-201.
- [34] KHAN A, AFTAB F, ZHANG Z S. BICSF: Bio-inspired clustering scheme for FANETs[J]. IEEE Access, 2019, 7: 31446-31456.
- [35] PU C. Jamming-resilient multipath routing protocol for flying ad hoc networks[J]. IEEE Access, 2018, 6: 68472-68486.
- [36] SINGH A, DIXIT Y, HEGDE R M. Information loss minimization in FANET-aided rechargeable IoT networks using Q-learning[C]//Proceedings of 2023 National Conference on Communications. Guwahati, India: IEEE, 2023: 1-6.
- [37] SUN L, WAN L T, WANG X P. Learning-based resource allocation strategy for industrial IoT in UAV-enabled MEC systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(7): 5031-5040.
- [38] CONSUL P, BUDHIRAJA I, GARG D, et al. A hybrid task offloading and resource allocation approach for digital twin-empowered UAV-assisted MEC network using federated reinforcement learning for future wireless network[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2024, 70(1): 3120-3130.
- [39] LI J, SUN L M, LIN C, et al. SED-UAV: A synergistic framework of lightweight chaotic encryption and multi-scale feature detection for secure UAV applications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025(99): 1.
- [40] 田旋旋, 胡念平. 基于 OFDM 的无人机雷达通信一体化设计方法[J]. 信号处理, 2020, 36(10): 1714-1720.
- TIAN Xuanxuan, HU Nianping. Design method of radar-communication integration using OFDM signals for UAVs[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(10): 1714-1720.
- [41] YADAV S P. Filter bank multicarrier modulation techniques for 5G and beyond wireless communication systems[J]. European Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2022, 6(2): 18-24.
- [42] NOORAZLINA M S, SULONG S M, SAID M S M, et al. Design of MIMO F-OFDM system model for PAPR reduction in the growth of 5G network[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1793(1): 012067.
- [43] LI L M, WANG Y, DING L Q. On the bit error probability of OFDM and FBMC-OQAM systems in Rayleigh and rician multipath fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, E102.B(12): 2276-2285.
- [44] 肖荣建, 辛雨, 魏艺璇, 等. 适用于天地一体化的 GFB-OFDM 波形性能分析[J]. 移动通信, 2023, 47(7): 71-78.
- XIAO Rongjian, XIN Yu, WEI Yixuan, et al. Performance analysis of GFB-OFDM: A waveform for space-terrestrial integrated networks[J]. Mobile Communications, 2023, 47(7): 71-78.
- [45] XIN Y, HUA J, BAO T, et al. Generalized filter bank orthogonal frequency division multiplexing: Low-complexity waveform for ultra-wide bandwidth and flexible services[J]. Entropy, 2024, 26(11): 994.
- [46] ABDOLI J, JIA M, MA J L. Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems[C]//Proceedings of 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Stockholm, Sweden: IEEE,

- 2015: 66-70.
- [47] ZHANG X, JIA M, CHEN L, et al. Filtered-OFDM-enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks[C]//Proceedings of 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). San Diego, USA: IEEE, 2015: 1-6.
- [48] HADANI R, RAKIB S, TSATSANIS M, et al. Orthogonal time frequency space modulation[C]//Proceedings of 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. San Francisco, USA: IEEE, 2017: 1-6.
- [49] HADANI R, RAKIB S, MOLISCH A F, et al. Orthogonal time frequency space (OTFS) modulation for millimeter-wave communications systems[C]//Proceedings of 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Honolulu, USA: IEEE, 2017: 681-683.
- [50] BEMANI A, KSAIRI N, KOUNTOURIS M. AFDM: A full diversity next generation waveform for high mobility communications[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. Montreal, Canada: IEEE, 2021: 1-6.
- [51] DU J M, TANG Y Q, YIN H R, et al. A simplified affine frequency division multiplexing system for high mobility communications[C]//Proceedings of 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Dubai, United Arab Emirates: IEEE, 2024: 1-5.
- [52] OUYANG X, JIAN Z. Orthogonal chirp division multiplexing[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(9): 3946-3957.
- [53] OMAR M S, MA X L. Performance analysis of OCDM for wireless communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(7): 4032-4043.
- [54] WAN Z W, GAO Z, HÉLIOT F, et al. Orthogonal chirp division multiplexing waveform design for 6G mmWave UAV integrated sensing and communication [C]//Proceedings of 2024 International Wireless Communications and Mobile Computing. Ayia Napa, Cyprus: IEEE, 2024: 622-627.
- [55] LU L, LI G Y, SWINDLEHURST A L, et al. An overview of massive MIMO: Benefits and challenges [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, 8(5): 742-758.
- [56] MARZETTA T L, LARSSON E G, YANG H, et al. Fundamentals of massive MIMO[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2016.
- [57] WANG C X, HUANG J, WANG H M, et al. 6G wireless channel measurements and models: Trends and challenges[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(4): 22-32.
- [58] PAN C H, REN H, WANG K Z, et al. Multicell MIMO communications relying on intelligent reflecting surfaces[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(8): 5218-5233.
- [59] ZHU Z Y, LI Z, CHU Z, et al. Resource allocation for IRS assisted mmWave integrated sensing and communication systems[C]//Proceedings of ICC 2022—IEEE International Conference on Communications. Seoul, South Korea: IEEE, 2022: 2333-2338.
- [60] JIA H C, ZHONG J, JANARDHANAN M N, et al. Ergodic capacity analysis for FSO communications with UAV-equipped IRS in the presence of pointing error[C]//Proceedings of 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT). Nanning, China: IEEE, 2020: 949-954.
- [61] XIE W W, SUN G, LI J H, et al. IRS-enabled wireless power transfer and data collection in UAV-assisted IoT[C]//Proceedings of GLOBECOM 2024 IEEE Global Communications Conference. Cape Town, South Africa: IEEE, 2024: 3237-3242.
- [62] WEI L, KANG H, SUN G, et al. IRS-assisted UAV secure communications via joint collaborative and passive beamforming[C]//Proceedings of 2024 20th International Conference on Mobility, Sensing and Networking. Harbin, China: IEEE, 2024: 298-305.
- [63] 袁昕, 刘向南, 梁琰, 等. 面向通感一体化网络能效优化的波束赋形方案[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(1): 126-132.
- YUAN Xin, LIU Xiangnan, LIANG Yan, et al. A energy efficient beamforming scheme for integrated sensing and communication networks[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(1): 126-132.
- [64] NAM Y H, NG B L, SAYANA K, et al. Full-dimension MIMO (FD-MIMO) for next generation cellular technology[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(6): 172-179.
- [65] XIANG L, PEI F C, KLEIN A. Joint optimization of beamforming and 3D array steering for multi-antenna UAV communications[C]//Proceedings of 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Dubai, United Arab Emirates: IEEE, 2024: 1-6.
- [66] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [67] HUANG J W, WANG A M, SUN G, et al. Dual AAV cluster-assisted maritime physical-layer secure communications via collaborative beamforming[J].

- IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(9): 12589-12607.
- [68] ALKHATEEB A, ALEX S, VARKEY P, et al. Deep learning coordinated beamforming for highly-mobile millimeter wave systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 37328-37348.
- [69] LIM S H, KIM S, SHIM B, et al. Deep learning-based beam tracking for millimeter-wave communications under mobility[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(11): 7458-7469.
- [70] KRUNZ M, AYKIN I, SARKAR S, et al. Online reinforcement learning for beam tracking and rate adaptation in millimeter-wave systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2024, 23(2): 1830-1845.
- [71] 刘健明, 陈鹏, 杨永钦, 等. 基于MW-FDTD与树木精细模型的树林电波传播研究[J]. 电波科学学报, 2025, 40(3): 559-566.
- LIU Jianming, CHEN Peng, YANG Yongqin, et al. Research on electromagnetic wave propagation in forest based on MW-FDTD and refined tree model[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2025, 40(3): 559-566.
- [72] KHUWAJA A A, CHEN Y F, ZHAO N, et al. A survey of channel modeling for UAV communications [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 2804-2821.
- [73] MURUGANATHAN S D, LIN X Q, MÄÄTTÄNEN H L, et al. An overview of 3GPP release-15 study on enhanced LTE support for connected drones[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2021, 5(4): 140-146.
- [74] JAGANNATH J, POLOSKY N, JAGANNATH A, et al. Machine learning for wireless communications in the internet of things: A comprehensive survey [J]. Ad Hoc Networks, 2019, 93: 101913.
- [75] 纪金伟, 高雷涛, 周云, 等. 一种适用于低空多径环境的MIMO-OFDM信道估计新方法[J]. 西安邮电大学学报, 2025, 30(3): 11-19.
- JI Jinwei, GAO Leitao, ZHOU Yun, et al. A new channel estimation method for MIMO-OFDM in low-altitude economic communications[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2025, 30(3): 11-19.
- [76] 甄立, 钟升, 苏景瑞, 等. 一种低空物联网GFRA用户活跃性检测与信道估计算法[J]. 西安邮电大学学报, 2025, 30(3): 20-29.
- ZHEN Li, ZHONG Sheng, SU Jingrui, et al. A user activity detection and channel estimation method for GFRA in low-altitude IoT[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2025, 30(3): 20-29.
- [77] GAO Z, DAI L L, HAN S F, et al. Compressive sensing techniques for next-generation wireless communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(3): 144-153.
- [78] YE H, LI G Y, JUANG B H. Power of deep learning for channel estimation and signal detection in OFDM systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(1): 114-117.
- [79] SITHAMPARANATHAN K, GIORGETTI A. Cognitive radio techniques: Spectrum sensing, interference mitigation, and localization[M]. Boston, USA: Artech House, 2012.
- [80] THILINA K M, CHOI K W, SAQUIB N, et al. Machine learning techniques for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(11): 2209-2221.
- [81] ZHANG L, ZHAO M, TAN C, et al. Research on spectrum sensing system based on composite neural network[C]//Proceedings of 2020 2nd International Conference on Advances in Computer Technology, Information Science and Communications. Suzhou, China: IEEE, 2020: 22-26.
- [82] SHANG B D, MAROJEVIC V, YI Y, et al. Spectrum sharing for UAV communications: Spatial spectrum sensing and open issues[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2020, 15(2): 104-112.
- [83] AZARI M M, GERACI G, GARCIA-RODRIGUEZ A, et al. Spectrum sharing strategies for UAV-to-UAV cellular communications[C]//Proceedings of 2020 IEEE Global Communications Conference. Taipei, China: IEEE, 2020: 1-6.
- [84] SHEN F, DING G R, WANG Z, et al. UAV-based 3D spectrum sensing in spectrum-heterogeneous networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5711-5722.
- [85] WEI Z Q, ZHU J L, GUO Z J, et al. The performance analysis of spectrum sharing between UAV enabled wireless mesh networks and ground networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 21(5): 7034-7045.
- [86] WANG Y X, SUN G, SUN Z M, et al. Toward realization of low-altitude economy networks: Core architecture, integrated technologies, and future directions [J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2025, 11(5): 2788-2820.
- [87] OLSON N R, ANDREWS J G, HEATH R W. Coverage and rate of joint communication and parameter estimation in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2024, 70(1): 206-243.
- [88] AL-HOURANI A, EVANS R J, KANDEEPAN S, et al. Stochastic geometry methods for modeling auto-

- motive radar interference[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(2): 333-344.
- [89] SUN Z Z, YAN S, JIANG N, et al. Performance analysis of integrated sensing and communication networks with blockage effects[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(11): 16876-16891.
- [90] MENG K T, MASOUIROS C, PETROPULU A P, et al. Cooperative ISAC networks: Performance analysis, scaling laws, and optimization[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2025, 24(2): 877-892.
- [91] SALEM A, MENG K T, MASOUIROS C, et al. Rethinking dense cells for integrated sensing and communications: A stochastic geometric view[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024, 5: 2226-2239.
- [92] BANI M, DAMER N A. Flying ad-hoc networks: Routing protocols, mobility models, issues[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2016, 7(6): 162-168.
- [93] PRAJAPATI S, PATEL N, PATEL R. Optimizing performance of OLSR protocol using energy based MPR selection in MANET[C]//*Proceedings of 2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*. Gwalior, India: IEEE, 2015: 268-272.
- [94] HE Y, WANG Y T, GUO Y Z, et al. Spectrum sensing based geographic opportunity routing protocol in cognitive radio network[C]//*Proceedings of 2025 28th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*. Compiegne, France: IEEE, 2025: 2502-2507.
- [95] FENG H Z, WANG J J, CHEN J R, et al. Time-slotted on-demand predictive routing for UAV networks[C]//*Proceedings of 2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Milan, Italy: IEEE, 2025: 1-6.
- [96] JIANG M L, ZHANG Q X, FENG Z Y, et al. Mobility prediction based virtual routing for ad hoc UAV network[C]//*Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. Waikoloa, USA: IEEE, 2019: 1-6.
- [97] HU B, YANG H Z, WANG L, et al. A trajectory prediction based intelligent handover control method in UAV cellular networks[J]. *China Communications*, 2019, 16(1): 1-14.
- [98] YANG H Z, HU B, WANG L. A deep learning based handover mechanism for UAV networks[C]//*Proceedings of 2017 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*. Bali, Indonesia: IEEE, 2017: 380-384.
- [99] KIM D Y, LEE J W. Joint mission assignment and location management for UAVs in mission-critical flying ad hoc networks[C]//*Proceedings of 2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence*. Jeju, South Korea: IEEE, 2018: 323-328.
- [100] LI Z Y, CHEN M, PAN C H, et al. Joint trajectory and communication design for secure UAV networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(4): 636-639.
- [101] HU Q Y, CAI Y L, YU G D, et al. Joint offloading and trajectory design for UAV-enabled mobile edge computing systems[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 1879-1892.
- [102] HE L, SUN G, SUN Z M, et al. QoE maximization for multiple-UAV-assisted multi-access edge computing via an online joint optimization approach[J]. *IEEE Transactions on Networking*, 2025: 3581531.
- [103] MEI H B, YANG K, LIU Q, et al. Joint trajectory-resource optimization in UAV-enabled edge-cloud system with virtualized mobile clone[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 7(7): 5906-5921.
- [104] SUN Z M, SUN G, WU Q Q, et al. TJCCT: A two-timescale approach for UAV-assisted mobile edge computing[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2025, 24(4): 3130-3147.
- [105] ZENG Y, WU Q Q, ZHANG R. Accessing from the sky: A tutorial on UAV communications for 5G and beyond[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(12): 2327-2375.
- [106] EL HABER E, ALAMEDDINE H A, ASSI C, et al. UAV-aided ultra-reliable low-latency computation offloading in future IoT networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, 69(10): 6838-6851.
- [107] ZHANG X C, ZHANG J, XIONG J, et al. Energy-efficient multi-UAV-enabled multiaccess edge computing incorporating NOMA[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(6): 5613-5627.
- [108] XU B, KUANG Z F, GAO J, et al. Joint offloading decision and trajectory design for UAV-enabled edge computing with task dependency[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 22(8): 5043-5055.
- [109] LIU Y P, WU N, ZHANG X Q, et al. A new compact hardware architecture of S-Box for block ciphers AES and SM4[J]. *IEICE Electronics Express*, 2017, 14(11): 20170358.
- [110] DE SANTIS F, SCHAUER A, SIGL G. ChaCha20-Poly1305 authenticated encryption for high-speed embedded IoT applications[C]//*Proceedings of Design,*

- Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). Lausanne, Switzerland: IEEE, 2017: 692-697.
- [111] 蹇奇芮, 陈泽茂, 武晓康. 面向无人机通信的认证和密钥协商协议[J]. 计算机科学, 2022, 49(8): 306-313.
- JIAN Qirui, CHEN Zema, WU Xiaokang. Authentication and key agreement protocol for UAV communication[J]. Computer Science, 2022, 49(8): 306-313.
- [112] LI T, MA J F, FENG P B, et al. Lightweight security authentication mechanism towards UAV networks [C]//Proceedings of 2019 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA). Daegu, South Korea: IEEE, 2019: 379-384.
- [113] ALLADI T, NAREN, BANSAL G, et al. SecAuth-UAV: A novel authentication scheme for UAV-ground station and UAV-UAV communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15068-15077.
- [114] 张可欣. 基于射频指纹的辐射源个体识别方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- ZHANG Kexin. Research on individual identification method of radiation source based on RF fingerprint [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [115] ALLADI T, CHAMOLA V, SAHU N, et al. Applications of blockchain in unmanned aerial vehicles: A review[J]. Vehicular Communications, 2020, 23: 100249.
- [116] LIU R, CHEN X F, ZOU Y Z, et al. Research and application UAV operation data trusted storage technology based on blockchain[C]//Proceedings of 2020 IEEE 2nd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology. Weihai, China: IEEE, 2020: 30-35.
- [117] GHRIBI E, KHOEI T T, GORJI H T, et al. A secure blockchain-based communication approach for UAV networks[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Electro Information Technology. Chicago, USA: IEEE, 2020: 411-415.
- [118] CUI J J, LIU Y W, NALLANATHAN A. Multi-agent reinforcement learning-based resource allocation for UAV networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(2): 729-743.
- [119] WANG X, ZHOU Z M, XIAO F, et al. Spatio-temporal analysis and prediction of cellular traffic in metropolis[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(9): 2190-2202.
- [120] ZHANG W Q, WANG Q, LIU X, et al. Three-dimension trajectory design for multi-UAV wireless network with deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(1): 600-612.

(编辑:张蓓)