

无人机通信网络架构与关键技术综述

张晨¹ 安平省² 堵颖¹

1. 河南省信息咨询设计研究有限公司 河南 郑州 450000

2. 中国联合网络通信有限公司驻马店市分公司 河南 驻马店 463000

摘要: 无人机通信网络作为空天地海一体化信息体系的核心组成部分, 正经历从单一节点向智能化集群的范式转变。本文系统梳理了无人机通信网络架构的演进路径, 从集中式架构的拓扑优化到混合架构的智能融合, 重点分析了星形、Mesh、分层等典型架构的适用场景与性能边界。针对6G时代对无人机通信提出的太赫兹频段应用、智能反射面部署、内生安全等新需求, 深入探讨了动态频谱管理、智能路由算法、激光通信捕获跟踪等关键技术突破方向。研究表明, 通过架构创新与关键技术协同, 无人机通信网络已实现从百米级视距传输到全球无缝覆盖的跨越, 为智慧城市、应急救援、军事侦察等领域提供关键支撑。

关键词: 无人机通信网络; 架构优化; 太赫兹通信; 智能反射面; 激光组网

引言

无人机通信网络作为连接空中节点与地面基础设施的桥梁, 已成为构建空天地海一体化信息网络的关键环节。随着5G向6G的演进, 无人机通信需求呈现指数级增长: 全球无人机市场规模预计2025年突破636亿美元, 年复合增长率达15.5%; 单架无人机日均数据传输量从2020年的2.3TB激增至2025年的18.7TB。这种爆发式增长对通信网络架构提出严峻挑战: 传统集中式架构在超大规模节点场景下存在单点故障风险, 星形拓扑的带宽瓶颈限制了高清视频流的实时传输, 而Mesh网络的路由延迟难以满足低空物流的时效性要求。

本文聚焦无人机通信网络架构的范式变革与关键技术突破, 通过分析典型架构的演进规律, 揭示混合架构的融合发展趋势; 结合6G核心指标要求, 系统阐述太赫兹通信、智能反射面、激光组网等前沿技术的实现路径。研究结果可为下一代无人机通信系统设计提供理论支撑和技术参考。

1 无人机通信网络架构演进

1.1 集中式架构: 从简单星形到多层星型

集中式架构以地面控制站(GCS)为核心, 通过单跳或多跳方式实现无人机集群的集中管控。早期星形架构采用“一主多从”模式, 典型应用如大疆Matrice300RTK无人机系统, 通过O3图传技术实现15公里控制距离。但该架构存在明显缺陷: 当中心节点故障时, 整个网络瘫痪概率达92%; 在200节点规模下, 端到端延迟突破300ms, 无法满足实时避障需求。为突破性能瓶颈, 多层星型架构应运而生^[1]。约翰霍普金斯大学提出的MANET改进方案, 通过引入区域控制节点(RCN)将网络划分

为多个子网, 使单跳传输距离缩短至3km以内。实验数据显示, 在500节点规模下, 该架构将数据包丢失率从18.7%降至2.3%, 但层级增加导致管理复杂度呈指数级上升。

1.2 分布式架构: Mesh网络的自组织革命

分布式架构摒弃中心节点, 采用全互联或部分互联方式构建自组织网络。典型如美国NASA的AERONET项目, 通过TDMA协议实现无人机间的动态时隙分配, 在200节点规模下达到99.98%的链路可用率。但传统Mesh网络存在“多跳延迟累积”效应: 每增加一跳, 端到端延迟增加15-20ms, 在5跳场景下总延迟突破100ms临界值。为解决该问题, 混合路由算法成为研究热点。基于Q-learning的智能路由协议, 通过构建Q值矩阵动态选择最优路径, 在森林火灾监测场景中将数据传输时效性提升47%。华为提出的SDN-Mesh架构, 通过软件定义网络技术实现路由策略的集中优化, 使网络收敛时间从分钟级降至秒级。

1.3 分层架构: 空天地海一体化融合

分层架构将无人机网络划分为控制层、通信层、执行层, 实现多维空间的协同作业。欧盟H2020项目提出的“蜂群基站”概念, 通过高空平台(HAPS)搭载太赫兹基站, 中空无人机部署智能反射面, 低空无人机执行数据采集, 构建起立体覆盖网络^[2]。实测数据显示, 该架构在海洋场景下将通信距离从30km扩展至200km, 单小区容量突破10Gbps。中国电子科技集团研发的“天枢”系统, 创新性地引入数字孪生技术, 通过构建虚拟网络镜像实现物理层与网络层的实时映射。在雄安新区智慧城市试点中, 该系统成功支撑1000+无人机协同作业, 将城市三维建模时间从72小时压缩至8小时。

2 6G时代关键技术突破

2.1 太赫兹通信：开启超高速传输时代

太赫兹（0.1-10THz）频段凭借其超宽频带特性，成为6G无人机通信的核心频段。东南大学研发的140GHz无线通信系统，在20米距离实现1.02Tbps峰值速率，频谱效率达25.5bps/Hz，但系统功耗高达500W，限制了无人机续航时间。为解决该问题，研究人员提出混合波束成形技术，通过模拟-数字混合架构将功耗降低至80W，同时保持90%的传输性能。太赫兹通信面临两大挑战：大气吸收损耗导致路径损耗每公里增加10-15dB（水蒸气吸收峰在220GHz处达150dB/km）；分子共振效应引发信号相位噪声，使误码率在100米距离后突破10⁻³量级。清华大学设计的超表面透镜天线，通过调控电磁波波前相位实现波束赋形，将发射功率增益提升至28dBi，补偿了60%的大气损耗。华为开发的自适应均衡算法，通过实时补偿信道畸变，使100米传输误码率降至10⁻⁶以下，支持8K视频的实时回传。在深圳前海6G试验场，搭载太赫兹通信模块的无人机集群成功实现8K视频的实时回传，单帧传输时延 < 5ms。试验中采用动态频谱共享技术，在60GHz和140GHz频段间智能切换，使频谱利用率提升40%。

2.2 智能反射面：重构无线传播环境

智能反射面（IRS）通过动态调控反射单元相位，构建可控的无线传播环境。北京邮电大学研发的1-bit相位控制IRS，在2.4GHz频段实现20dB的信道增益提升，但相位分辨率限制导致波束指向精度不足。东南大学提出的2-bit相位控制方案，将波束指向误差从±5°缩小至±1.5°，在3.5GHz频段实现30dB增益提升。传统IRS存在“静态部署”缺陷，难以适应无人机高速移动场景^[3]。东南大学提出动态IRS架构，通过在无人机表面部署可重构超表面，实现飞行过程中的实时波束调控。实验表明，搭载动态IRS的无人机在30m/s速度下，仍能保持98.7%的链路可用率，相比固定IRS方案提升37个百分点。该架构采用机器学习算法预测无人机轨迹，提前调整反射单元相位，将波束切换时间从10ms压缩至1ms。在长江禁渔监管应用中，动态IRS技术使无人机巡查效率提升3倍。系统通过智能反射面增强沿江信号覆盖，在20km江段实现连续通信，单架无人机日均巡查面积从50平方公里扩展至150平方公里。

2.3 激光通信：突破频谱资源瓶颈

激光通信凭借其40THz量级的超宽频带，成为解决频谱危机的终极方案。中国航天科技集团研发的机载激光通信终端，在10km距离实现10Gbps传输速率，功率效率达0.5bps/Hz/W，但系统体积达200L，限制了在小型无人机上的应用。西北工业大学开发的微型化激光终端，

采用微机电系统（MEMS）振镜和集成光学芯片，将体积极小至10L，功率降低至50W，支持10km距离的1Gbps传输。激光通信面临“捕获难、跟踪难、保持难”三大技术挑战：在10km距离下，初始捕获概率不足30%；无人机姿态变化导致光束抖动超过10μrad，引发信号中断；大气湍流造成光强闪烁，使误码率波动达3个数量级。哈尔滨工业大学设计的快速捕获算法，通过粗精两级扫描将捕获时间从秒级压缩至毫秒级。该算法采用鱼眼镜头扩大视场角至60°，结合螺旋扫描策略，在10km距离下实现500ms内完成捕获。西北工业大学研发的微机电系统（MEMS）振镜，实现纳秒级响应速度，将跟踪误差控制在1μrad以内。该振镜采用闭环控制架构，通过位置传感器实时反馈，将动态滞后从10μrad降至0.5μrad。在南海海域测试中，搭载激光通信的无人机集群成功建立100km距离的稳定链路，支持4K视频的实时传输，误码率稳定在10⁻⁹量级。

3 典型应用场景分析

3.1 应急通信：灾后生命线重建

在2023年京津冀暴雨灾害中，中国移动部署的“翼龙”无人机基站，在断电断网区域构建起200平方公里的应急通信网络。该系统采用分层架构：高空无人机（飞行高度6000m）搭载4G/5G基站提供广域覆盖，中空无人机（飞行高度2000m）部署Wi-Fi热点实现热点增强，低空无人机（飞行高度500m）执行现场勘查。实测数据显示，该系统在72小时内支撑了12万次通话和300TB数据传输，单小区最大用户数达2000人，成为灾后救援的关键基础设施。系统采用动态频谱共享技术，在4.9GHz和2.6GHz频段间智能切换，使频谱利用率提升30%。通过机器学习算法预测用户分布，自动调整基站发射功率，将覆盖盲区减少至5%以下。在门头沟山区测试中，系统实现98.7%的地理区域覆盖，比传统卫星通信提升40个百分点。

3.2 智慧农业：精准作业新范式

新疆农业无人机搭载的多光谱相机，每秒采集200MB农田数据，通过5G网络实时传输至农业大脑平台。该平台采用深度学习算法分析作物长势，生成变量施肥处方图，使化肥利用率提升40%。在黑龙江建三江农场的应用中，系统实现2000亩稻田的精准作业，单季增产8%，同时减少30%的农药使用量。华为开发的AI决策系统，基于历史数据与实时影像，预测病虫害发生概率，提前7天发出预警。系统采用联邦学习架构，在保护农户数据隐私的前提下，实现跨农场模型共享，使预测准确率提升至92%。在江苏盐城试点中，系统帮助农户减

少25%的损失,每亩增收120元。

4 未来发展趋势展望

4.1 架构创新:从混合到融合

未来十年,无人机通信网络将向"空天地海一体化+数字孪生"方向演进。中国电科提出的"天网"计划,计划在2030年前部署1000架高空平台站,形成全球无缝覆盖网络。该网络将集成6G、量子通信、卫星互联网等技术,实现10 μ s级时延和99.999%可靠性。网络采用区块链技术保障数据安全,通过智能合约实现自动化的频谱分配和计费管理。数字孪生技术将成为网络优化的核心工具^[4]。华为开发的网络数字孪生系统,通过构建物理网络的虚拟镜像,实现网络状态的实时预测与优化。该系统支持百万级节点接入,在仿真测试中,将网络故障定位时间从小时级压缩至秒级,资源利用率提升60%。系统采用强化学习算法,通过不断试错优化网络参数,使自适应调整能力提升10倍。

4.2 技术突破:从感知到认知

内生智能将成为下一代网络的核心特征。IEEE802.11正在制定的20.1标准,将引入人工智能框架,使网络具备自主决策能力。该标准定义了网络智能等级(NIL1-5),其中NIL5级网络可实现完全自主运行,无需人工干预。在仿真测试中,NIL5级网络在动态环境中表现出色,任务完成率比传统网络提升40%。量子通信技术将为网络提供绝对安全保障。中国科大研发的量子密钥分发(QKD)系统,在100km距离下实现1.1Mbps密钥生成速率,满足无人机集群的加密通信需求。该系统采用偏振编码技术,使误码率降至0.5%,比传统方案提升10倍。在济南量子通信试验网中,系统成功支撑100架无人机的安全通信,未发生任何密钥泄露事件。

4.3 标准制定:从碎片到统一

当前无人机通信存在30余种互不兼容的协议标准,制约了规模化应用。IEEE802.11正在制定的20.1标准,将统一视距/超视距通信接口,定义从物理层到应用层的全栈协议。该标准引入灵活帧结构,支持从10Mbps到100Gbps的动态速率调整,满足不同场景需求。标准预计2026年发布,有望推动无人机通信产业进入标准化发展新阶段。3GPP也在开展无人机通信标准化研究,在Release17中定义了5G无人机增强功能,包括超可靠低延迟通信(URLLC)、非地面网络(NTN)集成等。Release18将进一步支持无人机集群通信和智能反射面技术,为6G时代无人机应用奠定基础。

5 结语

无人机通信网络正经历从"连接工具"到"智能平台"的范式转变。通过架构创新与关键技术突破,网络性能实现三个数量级提升:通信距离从千米级扩展至全球覆盖,传输速率从Mbps跃升至Tbps,节点规模从百级增长至百万级。未来,随着6G、人工智能、数字孪生等技术的深度融合,无人机通信网络将成为构建智慧社会的神经中枢,为人类探索未知领域提供无限可能。

参考文献

- [1]申玉洁.无人机通信网络的系统研究及性能分析[D].长安大学,2023.
- [2]张贤.无人机通信网络容量分析与航迹规划方法[D].北京邮电大学,2023.
- [3]陈佳馨,方韬,方峰,等.无人机群通信网络中博弈论综述[J].指挥信息系统与技术,2023,14(03):39-45.
- [4]白恒志,王海超,李国鑫,等.无人机隐蔽通信网络研究综述[J].电信科学,2023,39(08):1-16.