



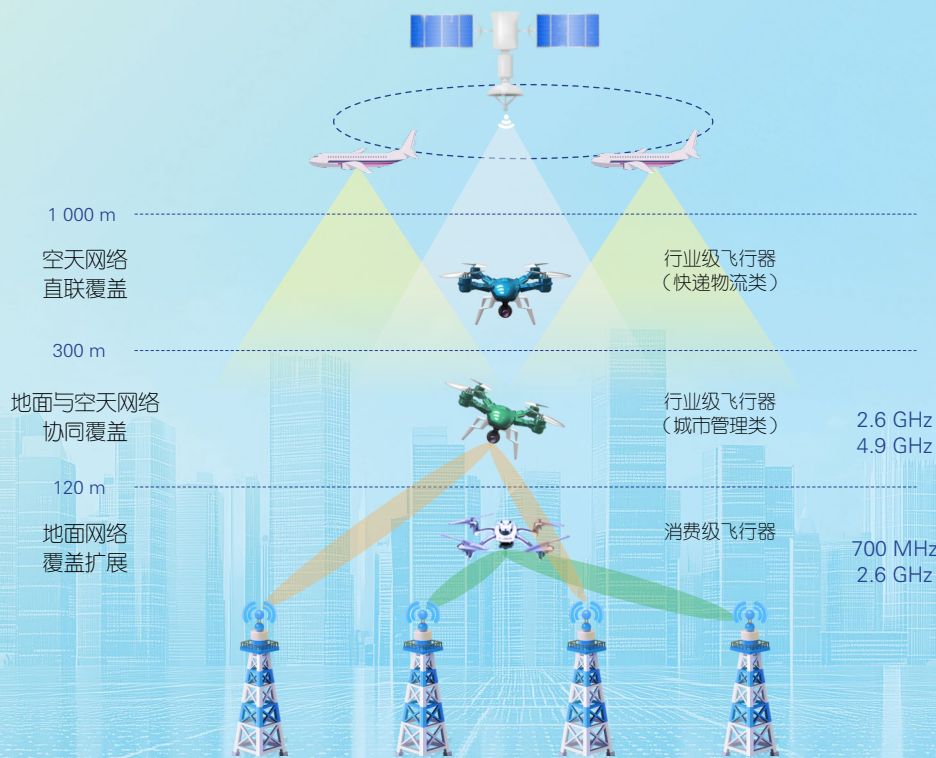
中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

<http://tech.zte.com.cn>

第 31 卷 · 总第 181 期 · 2025 年 2 月 · 第 1 期

专题：6G 立体覆盖技术



(封面图片详解见 P50)

ISSN 1009-6868



9 771009 686250



第二十七届中国科协年会学术论文专刊

《中兴通讯技术》第10届编辑委员会

顾问 侯为贵(中兴通讯股份有限公司创始人) 钟义信(北京邮电大学教授)
陈锡生(南京邮电大学教授) 糜正琨(南京邮电大学教授)

主任 陆建华(中国科学院院士)

副主任 李自学(中兴通讯股份有限公司董事长) 李建东(西安电子科技大学教授)

编委

陈建平	上海交通大学教授	唐雄燕	中国联通研究院副院长
陈前斌	重庆邮电大学教授、副校长	陶小峰	北京邮电大学教授
段晓东	中国移动研究院副院长	汪烈军	新疆大学教授、副校长
葛建华	西安电子科技大学教授	王翔	中兴通讯股份有限公司高级副总裁
管海兵	上海交通大学教授、副校长	王文博	北京邮电大学教授、副校长
郭庆	哈尔滨工业大学教授	王文东	北京邮电大学教授
洪伟	东南大学教授	王喜瑜	中兴通讯股份有限公司执行副总裁
江涛	华中科技大学教授	王耀南	中国工程院院士、湖南大学教授
蒋林涛	中国信息通信研究院科技委主任	王志勤	中国信息通信研究院副院长
金石	东南大学首席教授、副校长	卫国	中国科学技术大学教授
李尔平	浙江大学教授	邬贺铨	中国工程院院士
李红滨	北京大学教授	吴春明	浙江大学教授
李厚强	中国科学技术大学教授	向际鹰	中兴通讯股份有限公司首席科学家
李建东	西安电子科技大学教授	肖甫	南京邮电大学教授、副校长
李乐民	中国工程院院士、电子科技大学教授	解冲锋	中国电信研究院教授级高工
李融林	华南理工大学教授	徐安士	北京大学教授
李自学	中兴通讯股份有限公司董事长	徐子阳	中兴通讯股份有限公司总裁
林晓东	中兴通讯股份有限公司副总裁	续合元	中国信息通信研究院首席专家
刘健	中兴通讯股份有限公司高级副总裁	薛向阳	复旦大学教授
刘建伟	北京航空航天大学教授	杨义先	北京邮电大学教授
隆克平	北京科技大学教授	易芝玲	中国移动研究院首席科学家
卢光跃	西安邮电大学教授、校长	张杰	北京邮电大学教授
陆建华	中国科学院院士、清华大学教授	张平	中国工程院院士、北京邮电大学教授
马建国	中原工学院教授、学术副校长	张卫	复旦大学教授
毛军发	中国科学院院士、深圳大学校长	张宏科	中国工程院院士、北京交通大学教授
孟洛明	北京邮电大学教授	张钦宇	哈尔滨工业大学(深圳)教授、副校长
尼玛扎西	中国工程院院士、西藏大学教授	张云勇	中国联通云南分公司总经理
石光明	鹏城实验室副主任	赵慧玲	工业和信息化部信息通信科技委常委
史振威	内蒙古大学教授	郑纬民	中国工程院院士、清华大学教授
孙知信	南京邮电大学教授	钟章队	北京交通大学教授
谈振辉	北京交通大学教授	周亮	南京邮电大学教授、副校长
唐宏	中国电信IP领域首席专家	朱近康	中国科学技术大学教授
唐万斌	电子科技大学教授	祝宁华	中国科学院院士、南开大学教授

目次

中兴通讯技术 (ZHONGXING TONGXUN JISHU)
第 31 卷 总第 181 期 2025 年 2 月 第 1 期

中文核心期刊 中国科技核心期刊 第三届国家期刊奖百种重点期刊 信息通信领域产学研合作特色期刊 中国知网、万方数据、重庆维普等数据库收录期刊 1995 年创刊

卷首特稿 ▶	01 对 AI 加持网络重构的思考.....	邬贺铨
热点专题 ▶	6G 立体覆盖技术	
	04 专题导读.....	李建东, 刘俊宇
	06 通感赋能低空覆盖网络技术.....	胡文豪, 何振耀, 徐甜甜, 许威
	13 面向 6G 立体覆盖扩展的即插即用接入机制.....	刘睿, 韩书君, 许晓东
	20 面向 6G 动态场景的可移动去蜂窝网络覆盖性能分析.....	翟浩雅, 郑家康, 章嘉懿, 艾渤
	28 面向网络化通信感知一体化的立体覆盖方法.....	杨文彬, 邱裕鹤, 苏郁
	39 面向 6G 典型场景的高能效立体覆盖技术研究.....	张吉发, 黄香港, 赵楠
名家视点 ▶	48 面向低空经济的无线覆盖扩展技术思考与展望.....	盛敏, 陈旭晖, 马兴业, 赵晨曦
企业视界 ▶	53 通感低空覆盖关键技术与组网.....	林旭, 刘涛, 张诗壮, 施嵘
技术广角 ▶	58 基于 X86 通用硬件平台的高性能 5G 核心网 UPF 实现.....	
	李勇, 马建伟, 应晓冬, 娄方亮, 蔡茹馨
	63 智能实时音视频网络的总体设计.....	陈俊江, 申光

《中兴通讯技术》2025 年热点专题名称及策划人

1. 6G 立体覆盖技术

西安电子科技大学教授 李建东
西安电子科技大学教授 刘俊宇

2. 智算网络

中国移动研究院副院长 段晓东
清华大学教授 李丹
电子科技大学教授 虞红芳

3. 6G 网络安全

北京航空航天大学教授 刘建伟
北京航空航天大学教授 王璟璟

4. 面向 6G 的高时效智能机器通信技术

中国工程院院士、北京邮电大学教授 张平
北京邮电大学副教授 秦晓琦

5. 网络中的 AI 技术

中国电信研究院教授级高工 解冲锋
北京邮电大学教授 孟洛明
清华大学教授 崔勇

6. 新一代光传输技术

上海交通大学教授 陈建平
中国联通研究院副院长 唐雄燕

MAIN CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL
Vol. 31 No. 1 Feb. 2025

Guest Paper ▶

01 Reflections on AI-Empowered Network Reconstruction WU Hequan

Special Topic ▶

6G Integrated 3D Coverage Technology

04 Editorial LI Jiandong, LIU Junyu

06 Integrated Sensing and Communication-Empowered Low-Altitude Networks Technology
..... HU Wenhao, HE Zhenyao, XU Tiantian, XU Wei

13 Plug-and-Play Access Mechanism for 6G 3D Coverage Extension
..... LIU Rui, HAN Shujun, XU Xiaodong

20 Coverage Performance Analysis of Movable Cell-Free Networks for 6G Dynamic Scenarios
..... ZHAI Haoya, ZHENG Jiakang, ZHANG Jiayi, AI Bo

28 Three-Dimensional Coverage Method for Networked Integrated Sensing and Communication
..... YANG Wenbin, QIU Yuhe, SU Yu

39 High Energy-Efficiency Three-Dimensional Coverage Technology for 6G Typical Scenarios
..... ZHANG Jifa, HUANG Xianggang, ZHAO Nan

Expert View ▶

48 Reflections and Prospects of Wireless Coverage Expansion Technologies for Low-Altitude
Economy SHENG Min, CHEN Xuhui, MA Xingye, ZHAO Chenxi

Enterprise View ▶

53 Key Technologies and Networking in ISAC for Low-Altitude Coverage
..... LIN Xu, LIU Tao, ZHANG Shizhuang, SHI Rong

Research Papers ▶

58 High-Performance 5GC UPF Based on X86 Hardware Platform
..... LI Yong, MA Jianwei, YING Xiaodong, LOU Fangliang, CAI Rujun

63 General Design of Smart Real-Time Audio/Video Network CHEN Junjiang, SHEN Guang

期刊基本参数: CN 34-1228/TN*1995*b*16*70*zh*P*¥20.00*6500*11* 2025-02

敬告读者

本刊享有所有发表文章的版权, 包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权, 所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。未经本刊许可, 不得以任何形式全文转载本刊内容; 如部分引用本刊内容, 须注明该内容出自本刊。

对AI加持网络重构的思考



Reflections on AI-Empowered Network Reconstruction

邬贺铨/WU Hequan

(中国工程院, 中国 北京 100088)
(Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501001

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250318.1041.002.html>

网络出版日期: 2025-03-18

收稿日期: 2025-02-06

摘要: 探讨了人工智能(AI)在网络技术中的广泛应用及其对网络重构的贡献。AI技术的引入开启了AI终端时代,支持离线运行和个性化服务,显著提升了用户体验。在网络基础设施方面,以5G/6G、IPv6和算力网为例,AI通过动态频谱分配、智能调度算法等技术,实现提质增效。AI在车联网、卫星通信、工业互联网等领域的应用也取得了显著成效,优化了交通管理、卫星资源利用和工业自动化流程。此外,AI在网络安全领域的应用提升了网络攻击防御能力和数据安全效率。尽管面临挑战,AI在网络重构中的重要作用不可忽视,未来AI原生网络的发展将成为重要方向。

关键词: 人工智能; 网络重构; 终端设备; 网络基础设施; 网络安全

Abstract: This paper provides an overview of the extensive applications of artificial intelligence (AI) in network technology and its contribution to network reconstruction. The introduction of AI technology has opened the era of AI terminals, supporting offline operation and personalized services, and significantly enhancing user experience. In terms of network infrastructure, taking 5G/6G, IPv6, and computing power networks as examples, AI achieves quality and efficiency improvement through technologies such as dynamic spectrum allocation and intelligent scheduling algorithms. The application of AI in fields such as the Internet of Vehicles, satellite communications, and industrial Internet has also achieved remarkable results, optimizing traffic management, satellite resource utilization, and industrial automation processes. Furthermore, AI's application in network security has enhanced the defense capabilities against network attacks and improved the efficiency of data security management. Despite the challenges, the significant role of AI in network reconstruction cannot be overlooked, and the development of AI-native networks will be an important direction in the future.

Keywords: artificial intelligence; network reconstruction; terminal devices; network infrastructure; network security

引用格式: 邬贺铨. 对AI加持网络重构的思考[J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 1-3. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501001

Citation: WU H Q. Reflections on AI-empowered network reconstruction [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 1-3. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501001

人工智能(AI)是当今网络技术发展的最大变量,网络是AI的主赛道。虽然AI技术的发展潜力尚难以看透,但不确定性既是挑战更是机遇。AI加持网络重构正成为创新热点。

1 终端功能向“新”重构

大模型的下沉和智能体的落地将重塑终端设备。它们将AI技术与具有多模态感知能力的终端融合,重新定义手机、PC、眼镜、AR等可穿戴设备及工业模组。这些设备将支持上云或离线运行,后者适应低时延、高隐私、低成本和个性化应用。在AI手机上同声传译、手语交流、以文生图、视觉认知、反诈检测、实物识别、智能导游、模糊搜索、个性服务等得心应手。AI手机的智能还可延伸到与之无线连接的眼镜上,可按语言命令自动调用眼镜上的视听配件。眼镜

作为手机外设解放双手观察世界,提供语音和手势识别、翻译、环境感知等能力。结合光学技术的进步,AR眼镜具有空间计算功能,基于所见真实影像空间计算出相关定量描述,透视实物内部结构和参数并生成虚拟场景实现虚实融合。

AI对手机体验的改进也很显著,AI驱动的资源调度算法可减少应用启动时间20%~30%,AI动态调节中央处理器(CPU)/图形处理器(GPU)频率和屏幕刷新率可降低整体功耗15%~25%。5G-A和6G等高效宽带、通感融合、天地协同、泛在连接特性为AI终端如虎添翼,AI也使5G和6G的高带宽低时延优势物有所值。AI手机释放用户生成内容(UGC)创意,增强用户获得感,通过AI驱动的个性化服务可将用户满意度提高15%,每用户平均收入(ARPU)提高5%~15%。未来几年将迎来网络终端的换代潮和持续的增长

期，AI终端不仅成为制造业的新引擎，还是信息服务业变革的新动能。

AI手机需要10~50 TOPS（每秒万亿次计算）算力支持，约为传统智能手机的5~10倍，推理速度要快2~3倍，延迟降低50%~70%，能效提升2~4倍。如需离线实时处理机器翻译、文本生成和多模态任务，则推理参数量可能高达10亿量级，这对AI手机芯片提出了更高要求，需要更先进制程下的高带宽内存及更优的模型蒸馏技术。最近DeepSeek的混合专家模型+多头潜在注意力机制闯出了开源好用又便宜的AI推理应用之路，展示了轻量化模型落地的前景。

2 网络设施向“质”重构

5G-A和6G作为基础设施的新增量恰逢AI浪潮，从网络大模型研究开始，网络规划、设备开发、路由组织、资源调度、业务适配、预防维护、智能客服、经营管理等环节全面引入AI的支持。首先是AI for RAN（无线接入网），AI通过动态频谱分配和智能调度算法可提升频谱利用率20%~40%和吞吐量15%~35%；AI通过预测和抵消干扰可将信噪比（SNR）提高10%~25%，误码率（BER）降低20%~40%，动态优化调制和编码参数能够提升数据率10%~25%，自适应调整基站工作状态可降低功耗20%~40%。其次在AI for NET方面，通过分析网络拓扑和流量可将路由跳数减少10%~25%，路径延迟降低15%~30%；通过AI预测流量模式动态调整带宽分配，吞吐量可提升10%~30%，延迟减少20%~50%，丢包率降低15%~40%；通过AI实时监控云服务器和动态分配任务可将负载均衡度改进20%~40%，响应时间缩短15%~35%；AI通过机器人流程自动化（RPA）减少人工干预，运维成本可降低20%~40%；AI通过分析设备数据可将故障发生率降低20%~40%，故障检测和恢复时间分别缩短30%~60%和20%~50%。

网络协议将继续向IPv6+发展，进一步推动纯IPv6协议的应用。IPv6编程空间的开发将为网络智简、可信、安全、确定性时延等新质服务的实现提供支撑。利用长短期记忆网络（LSTM）和Transformer模型预测IPv6流量的准确率可达90%以上，资源利用率提升25%，故障率降低30%；AI通过分析用户行为和流量特征并动态调整内容分发策略，视频缓冲时间可减少30%~50%，带宽利用率和用户满意度均可提升20%；AI结合基于IPv6段路由技术（SRv6）优化流量传输，链路利用率可提升15%~25%，网络延迟可降低20%~30%；在IPTV服务中AI优化组播树的构建，可减少流量冗余40%。但是，由于IPv6地址空间庞大其流量数据可达PB级别，模型训练和推理将需大量计算资源，实时推理能力和

可信性将面临挑战。

为了适应算力网的发展和算网协同融合的需求，算内网架构优化、入算网的灵活大上行能力、算间网的高速低时延和零丢包传输等技术正成为创新的重点。AI算法对算内网负载实时分析和动态调整，同时预测软硬件故障并自动触发修复机制，资源利用率可提升20%~30%，故障恢复时间减少50%；AI预测入算网的流量需求，可提升上行链路利用率25%，降低边缘计算延迟30%；AI实时分析算间网络拓扑和流量并选择最优路径，传输延迟可降20%~30%，丢包率接近0。利用AI实现光信号非线性补偿，优化光传输系统的资源调度和故障预测，带宽利用率可提升25%，故障恢复时间减少90%。需要突破算网协同提质增效的难点，重视从标准化入手感知数据和计算任务并以IPv6为统一标识规范异构的可管理资源，兼顾低时延、低复杂性和低能耗。

3 产业应用向“智”重构

车联网将从智能座舱开始，但仍需结合5G和C-V2X车路云协同技术，实现低时延全局感知和全域智能交通优化。AI+AR技术可提升导航准确率95%以上；通过AI分析交通流量优化信号灯控制，交通拥堵将减少20%~30%，通行效率提升15%~25%；AI赋能5G-V2X实现车辆间协同驾驶，燃油效率提升10%~15%，碰撞事故减少30%。当前需要统一车联网建设与运营标准，优化云端、路侧与车端算力协同，促进Uu接口（终端与基站间通信接口）和PC5接口（设备直连通信接口）数据融合，合理规划重要位置基站的确定性时延性能升级，从技术与法制和体制等方面营造好车联网发展生态。

通过AI算法分析业务需求并动态调整卫星波束指向和资源，卫星带宽利用率可提高20%~30%，时延降低15%~20%；智能调整调制方式可提高SNR 10%~15%和降低BER 30%~40%；优化低轨卫星网络路由选择，网络吞吐量可增加25%~30%，故障恢复时间减少50%，网管成本降低15%~20%；AI控制卫星姿态和激光发射角度可确保10 Gbit/s激光链路秒级对准和稳定工作；AI分析轨道数据预测碰撞风险其避障成功率可优于99.9%。通过将基站和算力上星，卫星以非地面移动网（NTN）身份实现星地协同，手机直连卫星从高轨到低轨、从语音到高速数据、从通信广播到通感融合。

在工业互联网方面，随着5G/5G-A工业模组成本下降，其高带宽低时延优势相较传统工业无线网突出，而且用户面功能（UPF）下沉到企业进一步降低时延并提供了客户组建5G局域网（LAN）的能力；AI可根据历史数据预判流量峰

值并动态分配UPF资源，任务响应速度提升30%；AI助力云化可编程逻辑控制器（PLC）突破实时性瓶颈和多设备协同难题，支持毫秒级动态重构；基于AI智能协议转换和动态资源调度及自愈能力，降低跨异构协议集成成本50%以上，同时将时延控制在微秒级；下一步还可将工业以太网协议与报文直接融入5G链路层从而显著简化网络架构，朝着一体化工业互联网标准发展，开创企业数字化转型新局面。

4 网络安全向“善”重构

通信网络安全可按3个层面划分，即通信基础设施安全、数据基础设施与数据安全、信息内容安全。除了常规的网络安全防护技术外，现在看重AI技术的应用。通过机器学习实时分析网络流量，识别分布式拒绝服务（DDoS）攻击和恶意扫描等异常行为，攻击拦截效率可提升80%，误报率低于0.1%；基于强化学习动态调整防火墙规则和路由策略，5G核心网对高级持续性威胁（APT）攻击防御成功率可从70%提升至95%。

在数据安全层面，AI分析服务器中传感器数据来预测硬件失效风险，可降低设备宕机率40%，并节约运维成本30%；AI动态隔离恶意进程可防止资源耗尽型攻击，算力资源被劫持事件下降90%；在可信数据空间中，AI通过知识图谱技术智能映射数据格式与语义并自动标注和分类，数据发现效率可提升60%；AI监控区块链上记录避免数据泄露事件发生的效率可提升80%；在跨境数据流动场景下AI实时监控数据传输合规性，异常事件响应时间从小时级缩短至分钟级。

在信息内容安全层面，AI分析文本语义识别钓鱼邮件和诈骗短信，误杀率可低于0.01%。某运营商运用AI一年拦截诈骗短信超20亿条，用户受骗率下降70%。基于生成对抗网络（GAN）检测模型识别伪造音视频的准确率可超99%；AI匹配通信内容与法律法规库从而自动识别违规内

容，审核效率可提升90%。在数字治理中，既要净化网络空间又要鼓励试错，促进新业态发展，还要保护隐私和避免算法偏见，需要更多依靠AI技术的支持。另一方面，需要重视AI双刃剑影响，对AI发展的监管既要鼓励创新，又要注重安全性和伦理规范，确保技术和应用发展与社会价值观保持一致。

本文参考了DeepSeek从一些实例中得到的数据，从中可以看到在AI加持下网络提质增效取得的初步进展。尽管各环节AI效果的协同面临很大挑战，但通过AI重构网络并发展为AI原生网络将是着力的方向。不过AI也仅是工具，AI可以帮助但不能代替网络技术的创新。

参考文献

- [1] DeepSeek. DeepSeek-V3 technical report [EB/OL]. [2024-02-05]. <https://arxiv.org/pdf/2412.19437>
- [2] SUN Q, LI N, I C-L, et al. Intelligent RAN automation for 5G and beyond [J]. IEEE wireless communications, 2024, 31(1): 94-102. DOI: 10.1109/MWC.014.2200271
- [3] Tines. CISO perspectives, separating the reality of AI from the hype [EB/OL]. [2024-02-05]. <https://www.tines.com/reports/ciso-perspectives-ai/>

作者简介



邬贺铨，中国工程院院士，曾任中国工程院副院长，现任移动信息网络科技重大专项总师、推进IPv6规模部署专家委主任、国家标准化专家委主任；长期从事数字和光纤通信系统的研发工作，先后负责“中国下一代互联网示范工程”“新一代宽带无线移动通信网”重大专项及国家重大科技战略的咨询工作；曾获全国科学大会奖、国家科技进步奖等多个奖项；出版专著1部。

6G 立体覆盖技术 专题导读



专题策划人



李建东



刘俊宇

随着低空经济市场的快速扩张，无人机物流、城市空中交通等新兴应用场景的兴起，对无线通信系统的覆盖能力提出了更高要求。广域、泛在、高速率的立体空间覆盖已成为刚性需求。当前，6G立体覆盖的实现主要依赖3种技术路线：低轨卫星网络、空基网络和地面蜂窝网络，这些路线各具优缺点。低轨卫星网络能够突破地形限制，实现广域覆盖，但面临显著的时延问题；空基网络通过无人机和高空平台构建，部署灵活，但在服务连续性和稳定性方面存在不足；地面蜂窝网络基础设施完善，但由于其设计主要服务于地面用户，难以有效覆盖低空区域。这些挑战推动了6G立体覆盖技术这一新兴研究领域的发展。

6G立体覆盖技术将突破传统平面网络的局限，通过整合卫星网络、空基网络和地面蜂窝网络，构建从地面到空中的多层次立体覆盖体系，并结合太赫兹通信、智能超表面等前沿技术，显著提升网络覆盖能力，为智慧城市、数字孪生等新兴应用提供强有力的技术支撑。与5G相比，6G立体覆

盖技术预计将实现以下突破：覆盖范围从地面延伸至近地空间，传输速率提升超过100倍，时延降至微秒级，连接密度达到每立方米数百个设备。

然而，当前6G立体覆盖技术在应用过程中仍面临诸多挑战。首先，由于现有地面网络采用平面覆盖结构和下倾天线设计，直接复用地面基础设施进行立体覆盖会引发一系列问题：低空区域信号强度不足、服务质量低下，低空用户处于天线零位时无法获得有效覆盖，同时低空同频干扰严重、邻区关系复杂，导致低空用户频繁切换，进而影响地面用户的服务质量。其次，随着地面和低空用户规模及业务需求的持续增长，频谱资源将日益紧张。加之空、天、地网络的深度融合，频谱竞争和冲突问题将成为6G覆盖技术的另一大制约因素。此外，随着用户规模的急剧扩大、垂直覆盖需求的增加以及服务质量要求的提升，通信系统的能耗可能呈指数级增长，这将严重制约系统的可持续发展。

6G立体覆盖技术仍面临诸多挑战，亟需进一步突破。如何构建低成本、高效率的6G立体覆盖网络？如何满足立体广域覆盖对频谱资源的巨大需求？如何有效平衡能耗与网络覆盖性能之间的矛盾？这些问题不仅涉及技术层面的创

新，还与协议标准的制定密切相关。

本期专题汇集了来自知名高校、企业和科研机构的论文，聚焦6G立体覆盖技术，从核心挑战到关键技术，全面展示了最新研究成果。我们期望这些内容能为读者提供有价值的参考，并对所有作者和审稿专家的贡献表示诚挚感谢！

策划人简介

李建东，西安电子科技大学教授，博士生导师，空天地一体化综合业务网全国重点实验室学术委员会副主任、首席科学家，学术委员会副主任，信息与通信工程学部执行主任，国家级创新团队

负责人，三秦杰出人才，国家新一代宽带无线移动通信网重大专项总体组专家，宽带无线IP技术标准工作组组长；主要从事新一代无线移动通信、智能互联网络技术、智能自组织无线网络技术、空间信息网络方面的研究；先后主持“863”计划重大课题、国家自然科学基金重大项目等；获国家技术发明奖二等奖2项、省部级科技进步奖6项，主持和推动了4项无线局域网国家标准的制定和实施。

刘俊宇，西安电子科技大学教授，空天地一体化综合业务网全国重点实验室成员，国家级青年人才；主要从事无线覆盖技术、异构密集无线网络容量理论及组网技术、天地一体化网络智能组网技术方面的研究；主持国家重点研发计划课题/子课题、国家自然科学基金面上项目、陕西省重点研发计划等国家级及省部级项目10余项；获省部级和全国学会级科学技术奖励6项。

通感赋能低空覆盖网络技术



Integrated Sensing and Communication-Empowered Low-Altitude Networks Technology

胡文豪/HU Wenhao^{1,2}, 何振耀/HE Zhenyao^{1,2},
徐甜甜/XU Tiantian¹, 许威/XU Wei^{1,2}

(1. 东南大学, 中国 南京 210096;
2. 紫金山实验室, 中国 南京 211111)
(1. Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250221.0847.002.html>

网络出版日期: 2025-02-21

收稿日期: 2024-12-10

摘要: 深入探讨了低空覆盖网络中低空飞行器在通信感知融合 (ISAC) 及协作调度方面的技术路线和实现方案, 系统阐述了无人机 (UAV) 与基站之间、UAV 集群之间、UAV 集群与基站之间的关键技术以及面临的挑战, 重点分析了 UAV 与基站之间的通感波形设计与任务分配、UAV 集群之间的协作机制与轨迹优化、UAV 集群与基站之间的协作调度策略。分析表明能效优化和协同调度技术是低空覆盖网络未来重点技术研究方向。

关键词: 低空覆盖网络; ISAC; UAV; 波形设计; 协作调度

Abstract: The technical pathways and implementation strategies for low-altitude aerial vehicles in integrated sensing and communication (ISAC) and collaborative scheduling within low-altitude networks are discussed in this paper. It provides a systematic analysis of the key technologies and challenges associated with interactions between unmanned aerial vehicles (UAVs) and base stations, UAV swarms, and UAV swarms with base stations. Special focus is placed on the design of communication and sensing waveforms, task allocation between UAVs and base stations, collaborative mechanisms and trajectory optimization within UAV swarms, and collaborative scheduling strategies between UAV swarms and base stations. The analysis highlights that energy efficiency optimization and collaborative scheduling technologies are critical research directions for the future advancement of low-altitude networks.

Keywords: low-altitude network; ISAC; UAV; waveform design; collaborative scheduling

引用格式: 胡文豪, 何振耀, 徐甜甜, 等. 通感赋能低空覆盖网络技术 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 6-12. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501003

Citation: HU W H, HE Z Y, XU T T, et al. Integrated sensing and communication-empowered low-altitude networks technology [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 6-12. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501003

1 低空通感网络概述

作为 6G 系统的关键技术, 通信感知一体化 (ISAC) 技术将通信和感知功能融合在同一频段, 显著地提高了系统的频谱利用率。此外, ISAC 技术通过硬件资源复用, 大幅减少了硬件冗余, 降低了系统的成本与复杂度, 提高了无线设施利用率。该技术凭借其卓越的高分辨率感知能力, 为 6G 网络开创了全新的定位范式。这将为智能城市、智能制造和自动驾驶等依赖高精度感知的应用领域带来前所未有的发展机遇。然而, 现有地面

ISAC 网络架构在应用中存在明显局限: 一方面, 其覆盖范围相对有限; 另一方面, 复杂环境中的障碍物易遮挡远程目标的直视链路, 致使系统感知性能显著降低^[1]。为了应对这些挑战, 学术界提出了通过无人机 (UAV) 搭载 ISAC 服务来构建低空覆盖网络的方案。得益于卓越的机动性能和快速部署能力, UAV 可作为空中临时基站。这不仅能有效提升区域通信容量, 还可显著增强对重点目标的实时监测能力, 从而为 6G 网络的无缝覆盖提供可靠保障。目前, UAV 已在航拍、农业、测绘、遥感、通信等多个领域得到广泛应用, 低空覆盖网络的规模正逐步扩大。低空覆盖网络的发展, 不仅增强了 6G 网络的覆盖能力, 也为 ISAC 技术的应用提供了新的可能性, 进一

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62022026)

步推动了6G技术在更广泛领域的应用和创新。

1.1 研究背景

随着频谱资源的日益稀缺和硬件成本的不断上升, ISAC技术已经成为一个不可忽视的关键技术。ISAC旨在通过设计融合通信感知波形, 探索合适的信号处理方法, 来构建统一的平台以实现通感频谱复用及硬件共享, 进而提高频谱利用率, 降低系统成本。ISAC技术的优势在于能够通过感知的实时反馈来提升通信性能, 同时实现精确的目标检测与跟踪。以自动驾驶场景为例, ISAC技术不仅能为车辆提供高效的通信支持, 还能通过感知功能辅助其获取周围环境信息, 从而增强驾驶安全性和智能决策能力。ISAC技术能够满足包括自动驾驶、UAV、智能交通等在内的复杂应用场景的需求, 通过感知和通信数据的实时融合, 提供更高效的决策支持和系统管理。这种技术的应用, 不仅增强了通信网络的智能化水平, 也为各种智能应用提供强大的支撑。因此, 学术界和工业界普遍认为ISAC技术是6G移动通信的关键技术之一^[2]。它不仅解决了频谱资源和硬件成本的问题, 还为未来的通信和感知技术的发展提供了新的方向和可能性。

然而, 传统的ISAC主要基于地面基站架构, 其覆盖范围和感知能力容易受到物理障碍物(如建筑物、山脉和森林)的影响, 这导致该设计在一些特殊应用场景中存在明显的局限性。例如, 在城市环境中, 建筑物的密集分布可能会造成信号遮挡, 而在山区、丘陵等复杂地形中, 地面基站和传感器往往无法获得足够的视距链路来进行远程感知。这些问题不仅降低了感知系统的准确性, 还可能导致通信质量的下降, 进而影响整个系统的性能。此外, 在突发自然灾害和紧急救援等应急场景中, 传统的地面基站网络基础设施往往受损或无法及时恢复, 这会导致通信和感知服务的中断。为了克服这些问题, 学术界提出了诸多方案, 例如通过UAV、气球或飞艇等设备搭载ISAC服务来构建低空覆盖网络^[3]。由于UAV的高机动性和灵活部署性, UAV作为空中移动平台的研究受到广泛关注。UAV能够避开地面障碍物(如建筑物、树木等), 保持良好的视距链路, 从而大幅提升远程目标的感知能力。例如, 在灾后救援场景中, 地面基站的通信和感知功能往往受限于周围环境, 但UAV可以在灾区上空飞行, 为地面操作人员提供实时的环境感知数据, 同时保障通信的可靠性和稳定性。UAV能够灵活地调整飞行位置, 以覆盖不同区域, 确保网络覆盖的连续性和感知性能的稳定性。此外, 基于UAV的低空覆盖网络可

以根据网络负载和任务需求动态调整UAV部署和分工, 实现更加灵活的资源管理, 进一步提高作业效率和应急响应能力。2021年, 在河南新乡遭受暴雨洪灾时, 多架UAV被委以重任, 用于灾区的实时监测、情报搜集工作, 并辅助救援指挥行动。凭借高机动性的独特优势, UAV快速飞行到灾区现场并将实时画面迅速传递, 为抢险救援工作提供了不可或缺的关键信息, 有力地推动了救援行动的高效开展^[4]。此外, 甘孜—康定地震带是中国地震史上最活跃的地区之一。当地震发生后, 灾区的通信网络往往遭受严重破坏甚至瘫痪, 然而应急通信需求却急剧增加, 现有规模的基站难以满足大规模应急通信传输的需求^[5]。在这种情况下, 部署应急通信UAV是一种有效的解决方案。快速部署UAV能迅速扩大基站覆盖范围, 有效应对灾区短期通信需求。

1.2 技术特征

作为6G覆盖网络的关键部分, 面向低空覆盖的通感融合网络在信息网络中占据重要战略地位。面对日益复杂的通信需求以及诸多突发场景, 低空覆盖网络需同时提供通信和感知服务, 以支持更高速率的数据传输和更高精度的目标感知。特别是在低空飞行器(如UAV、飞艇等)的辅助下, 低空覆盖网络呈现以下技术特征:

1) 高频谱利用率

低空覆盖网络将通信和感知功能融合在一个统一平台上, 不仅能够提供传统的无线通信功能, 还能实时感知环境、检测目标、监控区域, 进而提供更全面的服务, 同时降低系统的硬件成本。这种融合提高了频谱利用率和系统效率, 尤其在复杂动态场景下, 如灾后救援、交通监控等应用场景。

2) 高机动性和灵活性

低空飞行器具有较高的机动性和灵活性, 能够在短时间内覆盖大范围区域。相较于地面基站, 基于低空飞行器构建的临时空中平台可根据实际需求快速部署、灵活调整飞行轨迹, 从而优化通信覆盖和感知能力。UAV、空中飞艇等低空飞行器能够随时调整位置和飞行高度, 以确保在目标区域内提供无缝的通信和精确的感知服务。

3) 实现三维空中视距链路

低空飞行器在三维空间中可实现直接视距(LoS)链路, 这使得通信和感知链路更加稳定且不受地面障碍物的影响, 进而可以获得更高的传输速率和感知精度。这使得低空覆盖网络可以在复杂地形和环境中提供更广泛、更高质量的信号覆盖。

4) 实时数据处理与决策支持

低空覆盖网络通常需要处理大量的感知数据和通信数据，实时分析传感器数据（如视频、环境监测数据等），并与基站通信，为系统决策提供了高效的数据支持。例如，在自动驾驶、智能交通、灾难救援等场景中，低空覆盖网络能够实时优化行动方案。

5) 实时调度与资源优化

低空覆盖网络需要根据实时环境变化、飞行任务和通信感知任务需求进行实时调度与资源优化。通过智能算法，网络能够对通信、感知和计算资源进行高效分配，确保系统的整体效能，尤其在高负载或频繁变化的环境中。

6) 增强的安全性与隐私保护

低空覆盖网络由于涉及大量的实时数据传输和感知操作，在安全性和隐私保护方面具有较高的需求。网络需要设计加密、认证等机制，确保数据传输的安全性，防止恶意攻击或数据泄露，特别是在敏感领域（如军事、应急救援等）中。

低空覆盖的通感融合网络凭借其独特的技术特征能够为各种应用场景提供更高效、智能和灵活的支持，推动未来6G等通信技术的应用发展。

1.3 研究现状

目前，低空覆盖网络的研究主要集中在以UAV为核心的技术应用上。UAV辅助通信方面的研究包括场景分析、架构设计、UAV与地面用户之间的信道建模、覆盖和性能分析、UAV部署的位置优化等。而UAV辅助感知方面的研究较少，因此越来越多的研究者致力于这一方向。与单一功能的UAV平台相比，ISAC赋能的UAV平台可以使通信和感知性能相互受益，UAV支持的ISAC将加快相关ISAC理论和原则的形成。然而，目前文献中关于ISAC赋能低空覆盖网络架构设计的研究仍相对较少，只有部分研究探讨如何设计UAV平台的ISAC系统波形和部署策略，以下是一些相关研究的进展。

在波形设计方面，LYU等优化了UAV的轨迹、发射波束成形和雷达信号，提出了一种在保

证性能前提下提高通信数据速率的低空覆盖网络系统设计^[6]。WEI等提出了一种基于UAV的ISAC设计框架，旨在保证目标跟踪性能的前提下最大化UAV下行链路通信容量^[7]。在部署策略方面，MENG等提出了一种UAV周期性感知与通信的方案^[8-9]。该方案通过联合优化感知频率、波束方向图、飞行轨迹、传输预编码器和感知开始时间，最大化系统的通信速率和感知性能。XU等研究了UAV如何融合感知、计算和通信功能^[10]，将感知到的环境信息通过计算任务卸载到地面基站处理，实现任务的分配与优化。这种方案可以有效降低UAV的计算负担，通过合理的时间和计算的资源分配，提高低空覆盖网络的工作效率和资源利用率，有助于实现更为高效的通信与感知协同服务。此外，AT&T的COW项目和诺基亚的F-cell项目正积极研究利用UAV构建低空覆盖网络，以提供ISAC服务^[11]。这些项目的核心目标是通过灵活部署的空中通信平台，实现多种应用场景的覆盖，包括交通事故救援、高精度地理测绘以及在临时热点区域（如大型活动、突发事件现场）提供增强的通信服务。具体而言，这些项目旨在通过UAV在三维空间中的高机动性和强大的空地LoS链路来改善通信覆盖，提高感知性能。如图1所示，通过ISAC技术的加持，低空覆盖网络将提供更广泛的通信感知服务覆盖，并在复杂环境中灵活地适应不同场景下的通信感知需求，进一步推动系统的智能化和实时响应能力。

2 低空通感协作技术

在低空覆盖网络中，低空飞行器与地面基站之间的

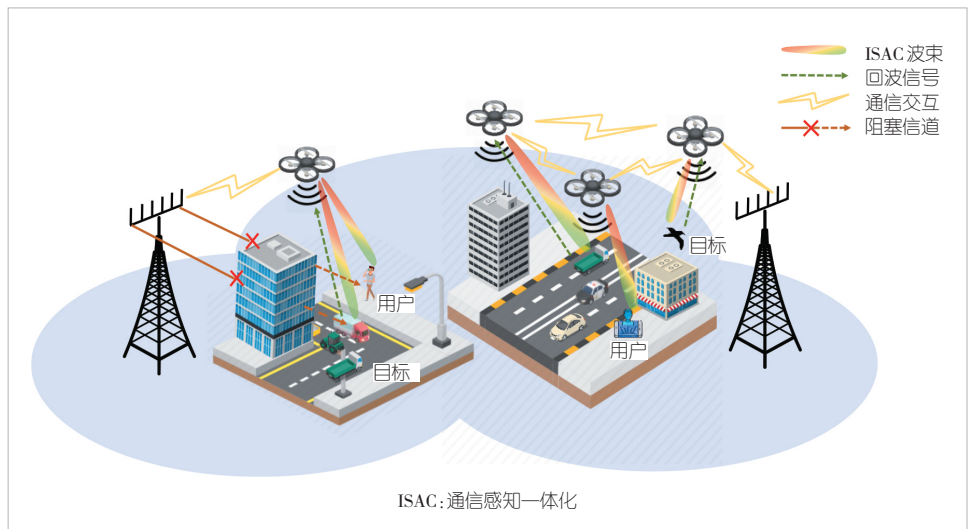


图1 ISAC 赋能的低空覆盖网络应用场景

通信与协作起着至关重要的作用。以 UAV 为例，作为中继节点，UAV 可以显著扩展基站的服务范围并增强系统的感知能力。这种协同工作不仅扩大了网络的覆盖面积，还能够一些复杂或恶劣的环境中实现更加精准的目标感知。尽管 UAV 与基站的协作具有显著优势，但在实际应用中仍面临诸多技术挑战，尤其是在动态环境中的通信稳定性、时延控制、频谱资源管理等方面。同时，UAV 集群的协作也成为了低空覆盖网络的一个关键研究方向，例如多个 UAV 在协同执行通信与感知任务时，如何保持稳定的集群编队、高效的任务分配以及灵活的飞行调整策略。然而，目前关于 UAV 集群协作和碰撞避免的研究仍处于初步阶段，尤其是在集群成员之间的实时通信、动态路径规划和冲突检测等方面，依然存在着较大的技术难题。此外，UAV 集群之间的信息交互，以及 UAV 集群与地面基站之间的大容量数据交互，将为低空覆盖网络带来更大的增益。特别是在应急救援、灾难监测、智能交通等场景中，UAV 集群和基站的协同工作可以大幅提升网络的服务能力和灵活性。然而，如何高效地进行 UAV 任务分配与资源调度，确保基站能够最大程度地优化资源配置，以及如何保证大容量数据的稳定传输，仍是当前亟待解决的核心问题。如表 1 所示，我们总结了现有的技术方案以及面临的挑战，并在下文逐一介绍。

2.1 基站与 UAV 之间协作调度

在低空覆盖网络中，UAV 与基站的协作在分担基站负载、扩大网络覆盖范围、提升灵活性等方面具有显著优势，已经成为一个重要的研究方向。目前，关于 UAV 与基站协作的研究主要集中在 UAV 作为中继节点来辅助信息传递和感知增强。UAV 作为中继节点不仅能够为用户提供通信转发功能，还可以在更大的范围内探测地面目标，并将感知到的信息实时转发给基站。这种中继功能极大地扩展了基站的覆盖范围，特别是在通信和感知

链路受限的区域，UAV 可以通过中继作用保障通信和感知的顺利进行。LIU 等提出了一种基于 UAV 与基站协作的低空覆盖网络服务方案^[12]。该方案将一个时隙划分为感知和通信两个子时隙：在感知子时隙中，UAV 对目标用户进行感知；在通信子时隙中，UAV 将感知信息传输至基站。为了降低系统能耗并保证感知的公平性，文献[12]对用户调度、发射功率和 UAV 轨迹进行了联合优化。进一步地，KHALILI 等针对低空覆盖网络的通信帧结构进行了优化设计，将帧结构划分为通信时隙和感知时隙^[13]。为了保证感知性能，UAV 在每个感知时隙悬停在一个目标上方对其进行探测，并将感知信息卸载到基站。当处于通信时隙时，UAV 前往下一个感知目标并作为基站的通信中继为附近用户提供通信服务。此外，为了降低 UAV 平均功耗，文献[13]对 UAV 的轨迹、速度、波束成形、发射功率和悬停时间进行了联合优化。Hu 等设计了 UAV 辅助的双基站感知低空覆盖网络架构，其中基站为通信用户提供下行无线服务，UAV 接收来自基站的 ISAC 信号回波并用于雷达感知^[14]。HUANG 等提出将移动计算技术融入低空覆盖网络架构中^[15]。在该方案中，UAV 将感知到的多个目标数据卸载到基站，并通过基站的服务器进行模型训练。该研究制定了一个联合优化框架，旨在通过联合优化感知任务分配、时隙调度、通信与感知功率分配以及 UAV 飞行轨迹，最小化系统开销。

2.2 UAV 集群之间协作

当前，低空覆盖网络中的集群无人机技术正引发新一轮技术热潮。集群 UAV 可以根据任务需求进行智能 UAV 分工和协作，确保多个区域 ISAC 任务高效完成。此外，UAV 集群还可以通过 ISAC 信号融合多个观测角度的感知信息，从而获取更加准确的感知参数估计，这极大提升了低空覆盖网络性能。目前业界已有较多该方面的研究，我们将阐述具有代表性的研究成果。

ABDISSA 等提出了低空覆盖网络的分组方案，其中通

表1 现有低空覆盖网络技术分类

	基站与 UAV 之间的协作调度	UAV 集群之间的协作调度	基站与 UAV 集群之间的协作调度
现有研究方案	基于 UAV 的通感帧结构设计 ^[12-13] 、基于 UAV 的通感波形设计 ^[14] 、UAV 与基站的分布式协作任务卸载 ^[15]	UAV 集群协作通感波形设计 ^[16] 、UAV 集群分布式协作设计 ^[17] 、UAV 集群路径跟踪及轨迹优化 ^[18]	UAV 集群与基站的分布式任务卸载设计 ^[19] 、UAV 集群与基站协作的轨迹优化设计 ^[20] 、UAV 集群与基站协同感知波形设计 ^[21]
面临挑战	基于 UAV 的通感资源分配、基于 UAV 的通感波形设计、基站与 UAV 之间任务的高效分配	UAV 集群之间的通感资源分配、UAV 集群之间的路径协作设计、UAV 集群轨迹优化	UAV 集群与基站的协作波形设计、UAV 集群与基站的协作调度

UAV: 无人机

信用户和感知目标划分为不重叠的组，每个 UAV 只负责服务其对应组内的用户和目标^[16]。CHEN 等提出了集群 UAV 构成的低空覆盖网络^[17]。其中，每架 UAV 均产生一个感知波束和一个通信波束：感知波束指向地面，用于感知目标；通信波束指向中心 UAV，用于传输通信和感知数据。中心 UAV 对所有数据进行合并处理。此外，在动态复杂环境中 UAV 集群如何避免碰撞并保持稳定的编队状态也是重点研究方向。ISAC 技术为解决这一问题提供了新的思路。利用 ISAC 信号，UAV 可以在感知周围环境中是否存在障碍物的同时与编队内其他 UAV 进行信息交换，从而更高效地调整飞行策略，提高集群编队的稳定性并有效避免碰撞。WANG 等研究了低空覆盖网络中 UAV 集群中路径跟踪、障碍物感知以及飞行调度问题^[18]。其中，基于 ISAC 信号进行障碍物距离和速度估计，避免了雷达和通信信号的顺序传输，从而减少了通信开销。

2.3 基站与 UAV 集群协作调度

在低空覆盖网络中，UAV 集群需要处理大量的数据交互和计算任务，而 UAV 本身的计算能力有限，因此通常需要将数据卸载到基站进行分析和处理。这一过程虽然能有效减轻 UAV 的负担，但也带来了一系列挑战。WANG 等提出了一种 UAV 集群与基站协同的低空覆盖网络服务方案^[19]。其中，每个 UAV 为一组用户提供通信服务，集群整体作为分布式雷达执行感知任务，各个 UAV 将获取的感知信息上传至基站统一处理^[19]。此外，针对该方案，WANG 等设计了一种能够产生正交波束的新型天线阵列，并提出了相应的波束赋形算法^[19]。ZHANG 等考虑了一个多 UAV 协同检测的场景，每架 UAV 感知多个目标，并通过通信功能将检测数据上传到基站^[20]。为了优化集群中 UAV 的轨迹规划和功率控制，ZHANG 等提出了一种改进的多智能体深度强化学习算法，为集群中每个 UAV 在连续的观察-动作空间中寻找了轨迹最优决策^[20]。TTROPKINA 等提出了一种新颖的低空覆盖网络 UAV 集群碰撞避免方案，其中地面基站组成分布式发射机发送 ISAC 信号，每个 UAV 装备 ISAC 信号接收机，进而根据感知回波识别附近 UAV 和障碍物^[21]。

总之，低空覆盖网络在通信、感知与协作等方面展现出巨大的发展潜力，但要充分发挥这些潜力，仍需在多个技术领域进行深入探索与创新。图2梳理了基于 UAV 的低空覆盖网络的研究方向与挑战，并展示了利用现有的数学工具和方法加以解决的思路。

3 未来挑战和发展前景

低空覆盖网络不仅能够有效弥补地面网络的局限性，提升系统的灵活性、覆盖能力和精确感知能力，还能为未来 6G 网络和智能化应用提供更加高效和可靠的技术支持。然而，这一方案的实施仍然面临一些技术和安全挑战，亟需进一步的技术创新和多领域协同研发，从而实现低空覆盖网络的全面部署和应用。

3.1 通信能效与低空续航

低空飞行器的续航能力是制约其广泛应用的关键因素，尤其是在执行长时间、高负载任务时，续航问题往往成为主要瓶颈。以 UAV 和无人飞艇为例，在高负载任务下，UAV 需要处理复杂的通信和感知任务，这对能源效率提出了更高的要求。在这种情况下，优化 UAV 的气动功耗、飞行速度、飞行轨迹以及能量消耗变得至关重要。此外，为了确保 UAV 能够在执行长时间任务时保持稳定运行，设计节能高效的通信感知算法至关重要。同时，根据任务需求和环境变化，UAV 需要动态调整通信与感知任务，实现高效的低空覆盖网络。

3.2 实时感知与通控决策

低空飞行器在飞行过程中通常经历位置变化，传感器采集的数据可能会受到飞行速度、方向变化以及飞行

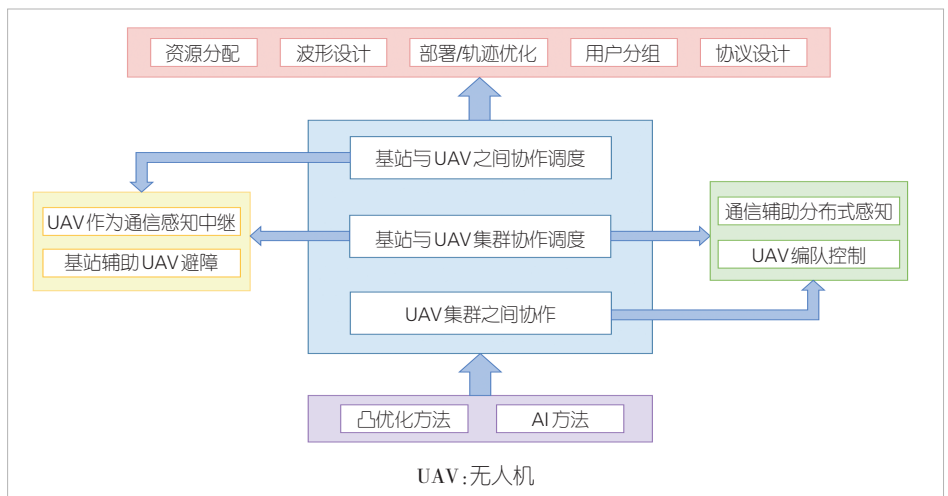


图2 低空覆盖网络面临挑战与解决方案

环境等因素的干扰,从而影响感知精度。例如,快速的移动可能导致传感器无法在短时间内准确捕捉到目标物体的静态信息,进而使得目标的实时定位和跟踪出现误差。此外,低空飞行器在不同高度和角度的飞行姿态下,传感器与目标之间的相对关系会发生变化,这可能导致传感器对目标的识别和距离测量精度受到影响。为解决这一问题并确保高精度感知,必须设计合理的资源调度方案,优化通信与感知任务的分配,以提升飞行过程中的目标感知精度。此外,为实现对目标的精确跟踪,高效的智能算法设计以动态调整低空飞行器的飞行策略也必不可少。

3.3 资源协同与优化配置

对于 UAV 集群协同的低空覆盖网络,如何有效对 UAV 集群进行任务调度和资源管理,以保证 UAV 之间的协作效率和网络的稳定性,仍是需要重点解决的问题。在复杂的灾区或应急场景中,UAV 集群需要协同工作,实时共享数据,并基于任务需求进行合理分工。因此,如何高效实现 UAV 集群内部之间的信息交换、任务分配以及向地面基站的数据卸载,将对低空覆盖网络的整体性能产生重要影响。

3.4 数据融合与处理能力

在低空覆盖网络中,低空飞行器需要实时收集大量的感知数据和通信数据,并进行高效的数据融合与处理。如何在飞行器上实现高效的计算和数据处理,确保感知结果和通信内容的实时性与准确性,是一个重要的技术挑战。尤其是当飞行器上部署的传感器种类繁多(如激光雷达和摄像头)且产生海量数据的情况下,如何设计高效的算法实现多源传感器数据的融合、处理和分析,同时降低计算资源的消耗,是提升系统性能的关键。

3.5 低空安全与隐私保护

安全性和隐私保护问题也是低空覆盖网络中不可忽视的挑战。低空飞行器作为空中平台进行大范围感知和通信服务时,可能会收集大量敏感信息,因此如何保护这些数据不被泄露或滥用,防止恶意攻击和干扰,是需要重点考虑的问题。尤其是在敏感应用中,如自动驾驶、无人监控、军事等场景,如何确保数据传输的加密性和隐私保护,将直接影响 ISAC 系统的广泛应用。

4 结束语

低空覆盖网络已经成为 6G 网络的重要组成部分,并

在未来通信体系中发挥着越来越关键的作用。通过 ISAC 技术赋能的低空覆盖网络能够显著提升通信覆盖范围、感知能力和系统效率。特别是在面对动态负载和多样化服务需求时,低空飞行器能够灵活地调整飞行路径和工作模式,提供实时、精准的服务,从而发挥出低空覆盖网络在多种应用场景中的巨大潜力。尽管低空覆盖网络在资源管理、UAV 集群协作、能效优化以及安全隐私等方面仍面临一系列技术挑战,但这些挑战也为技术的进一步发展提供了动力,并为低空覆盖网络的成熟奠定了坚实的基础。随着 ISAC 技术的加持和未来 AI 技术的引入,低空覆盖网络将逐步克服这些技术瓶颈,变得更加智能和高效,在智能城市、自动化系统、智能交通和应急响应等领域发挥越来越重要的作用,为社会带来更加创新和高效的解决方案。

参考文献

- [1] MENG K T, WU Q Q, XU J, et al. UAV-enabled integrated sensing and communication: opportunities and challenges [J]. IEEE wireless communications, 2024, 31(2): 97-104. DOI: 10.1109/MWC.131.2200442
- [2] HE Z Y, XU W, YANG Z H, et al. Unlocking potentials of near-field propagation: ELAA-empowered integrated sensing and communication [J]. IEEE communications magazine, 2024, 62(9): 82-89. DOI: 10.1109/MCOM.001.2300635
- [3] XU W, YANG Z H, NG D W K, et al. Edge learning for B5G networks with distributed signal processing: semantic communication, edge computing, and wireless sensing [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2023, 17(1): 9-39. DOI: 10.1109/jstsp.2023.3239189
- [4] MA L. On the application of UAV in emergency rescue [J]. China plant engineering, 2024(19): 44-46
- [5] ZHAO L, LUO X, ZHENG J, et al. Application of UAVs in emergency communication [J]. Scientific consultation: technology and management, 2024, (9): 118-121
- [6] LYU Z H, ZHU G X, XU J. Joint maneuver and beamforming design for UAV-enabled integrated sensing and communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(4): 2424-2440. DOI: 10.1109/TWC.2022.3211533
- [7] WEI Z Q, LIU F, NG D W K, et al. Safeguarding UAV networks through integrated sensing, jamming, and communications [C]// Proceedings of ICASSP 2022-2022 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2022: 8737-8741. DOI: 10.1109/icassp43922.2022.9746707
- [8] MENG K T, WU Q Q, MA S D, et al. UAV trajectory and beamforming optimization for integrated periodic sensing and communication [J]. IEEE wireless communications letters, 2022, 11(6): 1211-1215. DOI: 10.1109/lwc.2022.3161338
- [9] MENG K T, WU Q Q, MA S D, et al. Throughput maximization for UAV-enabled integrated periodic sensing and communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(1): 671-687. DOI: 10.1109/twc.2022.3197623
- [10] XU Y, ZHANG T K, LIU Y W, et al. UAV-enabled integrated

sensing, computing, and communication: a fundamental trade-off [J]. IEEE wireless communications letters, 2023, 12(5): 843-847. DOI: 10.1109/lwc.2023.3245728

[11] 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. DOI: 10.1109/jproc.2019.2952892

[12] LIU Y M, LIU S, LIU X, et al. Sensing fairness-based energy efficiency optimization for UAV enabled integrated sensing and communication [J]. IEEE wireless communications letters, 2023, 12(10): 1702-1706. DOI: 10.1109/lwc.2023.3288529

[13] KHALILI A, REZAEI A, XU D F, et al. Efficient UAV hovering, resource allocation, and trajectory design for ISAC with limited backhaul capacity [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(11): 17635-17650. DOI: 10.1109/TWC.2024.3455370

[14] HU S Y, YUAN X, NI W, et al. Trajectory planning of cellular-connected UAV for communication-assisted radar sensing [J]. IEEE transactions on communications, 2022, 70(9): 6385 - 6396. DOI: 10.1109/tcomm.2022.3195868

[15] HUANG N, DOU C L, WU Y, et al. Unmanned-aerial-vehicle-aided integrated sensing and computation with mobile-edge computing [J]. IEEE Internet of Things journal, 2023, 10(19): 16830 - 16844. DOI: 10.1109/jiot.2023.3270332

[16] ABDISSA BAYESSA G, CHAI R, LIANG C C, et al. Joint UAV deployment and precoder optimization for multicasting and target sensing in UAV-assisted ISAC networks [J]. IEEE Internet of Things journal, 2024, 11(20): 33392-33405. DOI: 10.1109/jiot.2024.3430371

[17] CHEN X, FENG Z Y, WEI Z Q, et al. Performance of joint sensing-communication cooperative sensing UAV network [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(12): 15545-15556. DOI: 10.1109/tvt.2020.3042466

[18] WANG C H, WEI Z Q, JIANG W J, et al. Cooperative sensing enhanced UAV path-following and obstacle avoidance with variable formation [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2024, 73(6): 7501-7516. DOI: 10.1109/tvt.2023.3348665

[19] WANG X Y, FEI Z S, ZHANG J A, et al. Constrained utility maximization in dual-functional radar-communication multi-UAV networks [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(4): 2660-2672. DOI: 10.1109/tcomm.2020.3044616

[20] ZHANG T, ZHU K, ZHENG S Q, et al. Trajectory design and power control for joint radar and communication enabled multi-UAV cooperative detection systems [J]. IEEE transactions on communications, 2023, 71(1): 158-172. DOI: 10.1109/tcomm.2022.3224751

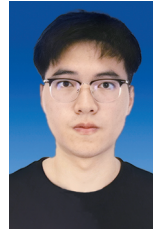
[21] TROPKINA I, SUN B, MOLTCHANOV D, et al. Distributed

communication and sensing system co-design for improved UAV network resilience [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(1): 924 - 939. DOI: 10.1109/tvt.2022.3206863

作者简介



胡文豪，东南大学在读博士研究生；主要研究方向为 MIMO 技术、面向 6G 的通感一体化技术等；申请专利 1 项。



何振耀，东南大学在读博士研究生；主要研究方向为 MIMO 技术、面向 6G 的通感一体化技术等；已发表论文 8 篇，申请专利 3 篇。



徐甜甜，东南大学在读硕士研究生；主要研究方向为 MIMO 技术、面向 6G 的通感一体化技术等。



许威，东南大学教授、IEEE Fellow；主要研究方向为协作与智能 MIMO 通信、通信-计算-感知融合理论方法、信息理论等；拥有中国发明专利 30 余项、美国发明专利 5 项，已发表论文 100 余篇。

面向6G立体覆盖扩展的 即插即用接入机制



Plug-and-Play Access Mechanism for 6G 3D Coverage Extension

刘睿/LIU Rui, 韩书君/HAN Shujun, 许晓东/XU Xiaodong

(北京邮电大学, 中国 北京 100876)
(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250310.1728.002.html>

网络出版日期: 2025-03-11

收稿日期: 2024-12-16

摘要: 6G 泛在连接场景对立体覆盖的扩展能力提出了新的要求。介绍了立体覆盖扩展的智能柔性架构、统一空口以及智能多址接入等关键技术。从原有节点的服务优化和新增接入节点两方面探究了面向6G立体覆盖扩展的即插即用接入机制, 提出了支持即插即用节点扩展的流程机制、信令协议设计等, 并针对高速移动场景验证了所提即插即用接入机制在6G立体覆盖网络中的性能。

关键词: 6G立体覆盖扩展; 即插即用; 接入; 泛在连接

Abstract: The ubiquitous connectivity scenarios of 6G demand enhanced capabilities for three-dimensional (3D) coverage expansion. Key technologies, including intelligent flexible architecture for coverage extension, unified air interfaces, and intelligent multiple access are introduced. The plug-and-play access mechanism for 6G 3D coverage expansion is explored through two approaches: optimizing existing nodes and integrating new access nodes. A process mechanism and signaling protocol design supporting plug-and-play node expansion are proposed. Additionally, the mechanism's performance is validated in high-speed mobility scenarios, confirming its efficacy in enhancing 6G 3D coverage networks.

Keywords: 6G 3D coverage extension; plug-and-play; access; ubiquitous connectivity

引用格式: 刘睿, 韩书君, 许晓东. 面向6G立体覆盖扩展的即插即用接入机制 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 13-19. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501004

Citation: LIU R, HAN S J, XU X D. Plug-and-play access mechanism for 6G 3D coverage extension [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 13-19. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501004

无处不在的持续连接是提供广泛数字服务的关键。预计2030年以后, 国际移动通信 (IMT) 将在实现联合国可持续发展目标方面发挥重要作用, 帮助弥合数字鸿沟, 并有效应对连接、覆盖、容量、数据速率和终端移动性等挑战。6G通信将通过精准覆盖农村及偏远地区, 将通信服务延伸至人口稀少区域, 确保全域用户体验的无差别, 实现无缝连接, 推动全民数字包容。

为了实现上述目标, 不同于传统覆盖仅基于地面组网的方式, 6G立体覆盖网络将由不同高度的网络节点实现互联互通。这样可以实现更高的数据传输速率和频谱利用效率, 增加系统容量, 减少端到端的延迟, 并扩展6G无线网络覆盖的广度、深度和平滑度。通过支持更快的移动速度, 联接

更多的人、物与智能体, 6G立体覆盖网络为各类用户提供多样化的应用和可持续性的服务。现有技术主要聚焦于提升资源利用效率, 但面对6G立体覆盖网络高度动态变化的特性, 实现服务节点的灵活快速扩展与连接同样至关重要。为此, 本文重点研究了6G立体覆盖网络中支持覆盖能力扩展的即插即用接入机制。

1 6G立体覆盖扩展典型应用场景

国际电信联盟无线电通信部门 (ITU-R) 在 IMT-2030 (6G) 愿景建议^[1]中, 基于 IMT-2020 (5G) 的三大应用场景, 提出了面向6G的六大应用场景。5G技术在三大核心场景——沉浸式通信、超大规模连接和超高可靠低时延通信方面实现了显著增强。面向6G时代, 通信技术将迎来三大创新方向: 人工智能 (AI) 与通信的深度融合、感知通信一体

基金项目: 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金项目 (L242012)

化以及泛在连接。然而，当前通信网络仅覆盖全球不到6%的地理区域^[1]，距离实现真正的泛在连接目标仍有较大差距。立体覆盖扩展技术为农村、无人区及灾害地区的通信设备提供稳定连接，同时支持智慧城市、智慧交通、智慧工业等场景中超大规模物联网设备的互联。这些应用场景对立体覆盖网络的扩展能力提出了新的需求。

为满足6G全场景泛在覆盖、广域连续覆盖及通信服务确定性的需求，未来的6G网络将构建一个多层次、立体化的通信架构。该架构以地基信息网络为基石、空基信息网络为核心、天基信息网络为骨干，通过整合卫星、无人机、高空平台和地面直放站等基础设施，形成一个超密集异构的覆盖网络，最终实现全球范围内的三维立体“泛在覆盖”^[2]。

由于天基、地基网络承载业务的差异性，网络资源的异质性，网络系统及管理的多样性，多维立体覆盖星地融合网络在全域无缝覆盖的柔性网络架构、按需组网技术、星地资源一体化、立体覆盖扩展等方面还存在诸多问题。

2 6G立体覆盖扩展需求与挑战

在6G立体网络中，由于接入节点数量、计算资源和存储资源等均呈现高度动态变化的特性，仅依赖静态的6G立体覆盖网络难以有效满足多样化业务的不同服务质量(QoS)需求。在网络资源需求发生变化时，可能需要增加接入节点或计算节点，以扩展覆盖范围或满足计算密集型业务的需求。此时，需将新的服务节点纳入立体覆盖网络。鉴于空天地三维大尺度立体覆盖网络(尤其是天基卫星)具有高度动态性，必须确保节点接入的时效性。当前，基于第3代合作伙伴计划(3GPP)标准的接入技术导致了频繁的信令交互^[3]，同时，新接入节点的配置也会引发与核心网之间的大量信令交换^[4]。这不仅增加了通信网络的时延，还带来了额外的开销。为了应对6G通信中的需求和挑战，我们亟需研究6G立体覆盖按需扩展技术，以提高业务完成的可靠性和资源利用效率。

为了保证立体覆盖网络实时高效的按需扩展能力、对全场景业务的有效支撑性，即插即用的6G立体覆盖网络节点接入机制变得必不可少。然而卫星通信与地面移动通信在协议、空口等方面存在不适配的问题。当前非地面网络(NTN)的研究主要集中在基站和核心网的优化上，旨在构建与地面网络相似的卫星接入机制。然而，真正的星地网络融合仍未实现^[5]。在立体覆盖网络中，空基、天基和地基节点的按需接入面临多种网络体制下协议空口的适配挑战。此外，基于互联网协议(IP)的节点配置和核心网注册方式难以适应立体覆盖网络在大尺度空间变化中的需求。

3 面向6G立体覆盖扩展的关键技术

现有研究已从网络架构、空口技术和智能管控等多个维度，对地面移动通信与卫星通信的深度融合进行了系统性设计。为满足广域覆盖连续性与通信服务一致性的需求，我们设计了AI辅助的智能管控架构。该架构通过资源虚拟化技术，将接入网、承载网和核心网整合为星地一体的虚拟化网络。基于统一的空口协议栈和网络架构，实现了星地异构网络的移动性管理、协同传输及多维异构资源的智能管控。针对星地网络异质异构、节点高度动态、拓扑结构时变、时空尺度极大的特点，设计基于可变参数集的软件定义星地统一空口，并研究面向6G立体覆盖扩展的智能接入技术，旨在提升小区边缘覆盖性能，确保可靠接入与高效传输。

3.1 面向6G立体覆盖扩展的智能柔性网络架构

图1为面向6G立体覆盖的智能柔性网络架构，由天基网络、空基网络和地基网络构成。该架构在地面网络侧的虚拟化平台上搭载无线接入功能、完整的核心网功能、面向边缘计算的功能，以及完整的网络管理功能^[6]；在天基搭载轻量化可定制的核心网功能、无线接入功能、轻量化的按需网络管理以及边缘计算功能；在空基平台搭载更为精简的无线接入和边缘计算等功能。面向多元化和个性化的差异化业务需求，智能柔性的立体覆盖网络能够实现按需服务和轻量化的资源控制与调度，并基于AI驱动的决策控制器编排相应业务的通信资源^[7]、计算资源以及存储资源等。高效调度网络节点的接入能力以及多维资源分配，可显著提升6G立体网络的覆盖服务能力，从而实现更精细化和灵活性的网络覆盖。

智能柔性的6G立体覆盖网络架构通过重构无线协议功能，实现了功能的按需灵活部署。具体而言，该架构将部分核心网功能进行分割和剪裁，并将其部署到天基网络中，从而有效减少了回程到地基核心网的流量负载，并支持多种核心网功能的按需组合。当网络中出现新的QoS业务需求时，基于AI的决策单元能够根据新业务的接入需求和计算需求，智能调度新节点的加入以及计算和存储资源的分配。同时，通过虚拟化技术，系统能够在硬件资源上动态搭建核心网功能，确保新业务能够实时高效响应。这种机制使得6G立体覆盖网络能够根据需求灵活扩展覆盖范围，满足多样化的业务需求。

在多层异构节点的立体覆盖网络中，引入无线接入、边缘计算和核心网等功能亟需标准化支持。此外，异构节点间的接口设计、业务承载方案及数据流优化等关键环节也需进一步推进标准化研究。基于AI驱动的智能柔性网络能够更

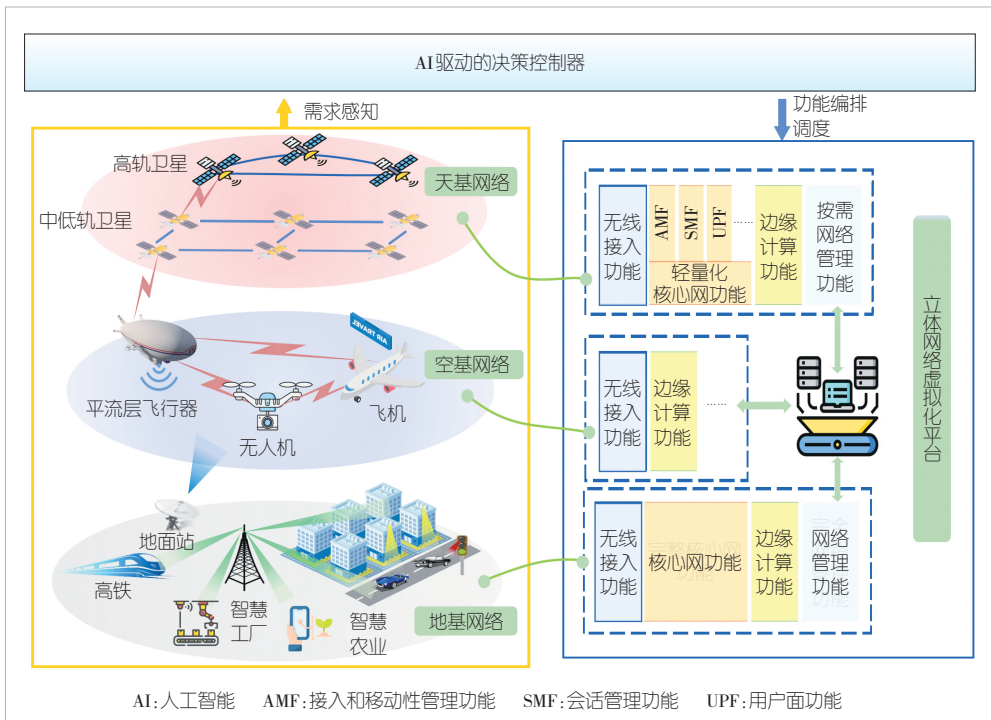


图1 面向6G立体覆盖的智能柔性网络架构

精准地感知需求并快速响应，这对网络的速率和时延提出了更高要求。为此，需深入研究载波聚合、移动性增强等技术的标准化，以促进立体网络中各节点的协同工作。同时，从工程实现的角度，硬件轻量化也是当前的研究重点，以支持星载多接入边缘计算（MEC）和再生转发模式等新兴技术的标准化进程。

3.2 面向6G立体覆盖扩展的统一空口技术

6G立体覆盖网络融合了空天地三层的多种不同的网络制式，各层网络有其不同的接入方式、调制解调方式^[8]。同时，由于立体覆盖网络中的业务具有多样性、异质的特点，6G立体覆盖网络需要根据业务本身的带宽、时延等QoS需求以及可用资源，为差异化异质业务提供不同的网络空口配置。基于可变参数集的空口配置技术能灵活高效地支持6G立体覆盖网络中的业务，在立体覆盖网络架构中真正实现用户无感知的统一空口设计。

在6G立体覆盖网络中，通过采用统一空口可变参数集技术，所有关键空口参数被整合到一个统一的集合中。这种设计使得网络中的各类节点能够灵活、快速地从集合中获取符合特定业务需求的空口配置，从而显著提升网络扩展的灵活性和效率。用户端无须分辨接入的网络属于立体网络中的哪个网段，仅通过配置不同的空口参数即可完成网络中用户资源的统一调度和配置。可变参数集的主要参数包括：传输带

宽、调制方式、编码方式、传输波形、子载波间隔、导频格式、混合自动重传请求（HARQ）配置、正交接入方式、随机接入方式、控制信道格式等^[9]。这些参数都可以根据场景和业务的需求被灵活选取和配置。配置统一空口的方式能够迅速地将新节点加入至网络中，并完成网络的适配，从而支持立体覆盖网络的按需快捷扩展。

3.3 面向6G立体覆盖扩展的智能多址接入技术

IMT-2030 6G愿景指出，未来网络的设备连接密度将达到每平方公里亿级规模，这对支持海量连接的新型接入技术提出了迫切需求。自5G移动

通信时代起，非正交多址接入（NOMA）技术凭借其优秀的大规模连接能力成为研究热点。该技术通过允许不同用户在同一资源块上进行重叠传输，结合精确的功率控制和接收端的多用户检测技术，实现了高效的信号分离与资源利用。在6G移动通信中，为满足海量用户的泛在连接需求，NOMA技术已演进为下一代多址接入（NGMA）技术^[10]。NGMA根据不同的区分域，主要分为基于功率域和编码域的多址接入技术。随着通信资源的多元化扩展，多址接入技术已突破了传统模式，呈现多维发展的趋势。除了NOMA技术外，还包括：融合多天线的空间域多址接入、基于码域的多址接入，以及通过索引模式区分用户的索引调制多址接入^[11]和利用交织器区分用户的交织多址接入^[12]等多种创新技术方案。这些技术共同构成了6G通信中的多维多址接入体系。

多址接入技术占用时间、空间、功率等多维资源，使得大量用户设备接入网络的管理难度增加，因此需要依靠具有强大数据处理和管理能力的AI技术来进行无线接入的管理^[13]。AI在信道环境的感知与建模方面具有巨大的优势，能够根据历史的信息以及环境的状态对信道进行预测，并智能地选择合适的接入方式。

传统的多址接入技术和基于AI的多址接入技术都致力于在有限资源条件下实现资源分配与优化。然而，在面向泛

在连接的海量用户接入场景中，仅依靠对现有接入节点的调度已难以满足通信需求。因此，亟需实现新服务节点的快速接入以及新功能的灵活高效部署。

4 面向6G立体覆盖扩展的即插即用接入机制

6G立体覆盖扩展技术能够有效支持6G泛在连接场景，保障移动无线通信的覆盖广度和连续性。例如，在通信设施遭到破坏的地区迅速建立通信链路，在无覆盖地区快速部署接入节点等。为了更好地完成6G立体网络的覆盖，实现6G立体网络不同通信系统之间的无缝互连、自动扩展与配置，我们提出了面向6G立体覆盖扩展的即插即用接入机制，使新网络节点在加入6G立体网络时即可实现快速握手、即插即用。即插即用的方式是保证接入灵活性和时效性的重要手段，因此支持即插即用的无线覆盖扩展技术的研究至关重要。通过调度立体网络节点并增设临时节点，结合6G立体覆盖网络的广域覆盖能力，实时采集流量信息并进行处理分析，从而优化节点部署策略。这种机制不仅支持业务的动态功能扩展，还能实现节点的即插即用接入，提升网络灵活性和可扩展性。

4.1 支持即插即用的总体逻辑架构

在6G立体覆盖网络中，即插即用功能通过以下两部分实现：一是，设计支持即插即用的接入流程和信令协议，为网络提供灵活快速的节点调度机制；二是，优化现有接入节点的服务，并根据存量节点的服务情况，按需激活现有节点的功能以实现服务扩展。这种支持即插即用的无线覆盖扩展技术，旨在实现覆盖和服务的快速扩展。然而，这种扩展技术可能会带来覆盖和服务效果的次优化问题。为此，我们首先设计了基于在线评估迭代优化的总体流程，具体如图2

所示。

支持即插即用的整体的逻辑流程由4部分构成：监测预处理单元、决策单元、调度单元与服务质量评估。监测预处理单元包含感知模块与预处理模块。感知模块负责业务QoS需求的感知、信道环境的感知以及网络资源的监测等功能。感知模块由分布在立体覆盖网络的各层中的传感器构成，能够实时监测网络中的业务、网络状态以及资源利用的情况。预处理模块对感知模块获取到的原始信息进行预处理，提取出有用的环境和业务信息，并结合人工智能的方法对业务的QoS以及环境状态进行初步分析，再将处理的数据发送给决策单元进行后续决策。

决策单元的核心功能由AI决策模块执行，其主要任务包括：基于监测处理单元提供的预处理信息，实时获取立体覆盖网络中的用户接入需求和业务请求。该模块运用人工智能算法，综合分析网络资源状况、业务特征及用户负载变化，进而做出以下决策：1) 服务节点的接入与删除；2) 支持不同QoS业务的多维资源请求与释放。决策生成后，单元将相关信息传输至调度单元，由后者负责后续调度任务的执行。

调度单元的核心功能由多维资源调度模块执行，具体包括：根据决策单元下发的指令，调度单元负责即插即用节点的初始化与接入管理，实现对天基卫星、空基无人机及地基节点等立体覆盖网络资源的动态调度。其功能涵盖节点新增、功能扩展等操作，同时集成空口天线调度等模块，支持基于参数集的统一空口管理。

4.2 支持即插即用的节点扩展技术

1) 节点扩展调度

支持即插即用的节点扩展技术利用卫星的广域感知及控制能力临时部署无人机、地面移动节点，并激活卫星节点，能够提升立体覆盖网络的泛在连接能力。采用即插即用的节点扩展技术如图3所示。

基于分布式多节点感知的预测算法，位于地基和天基节点上的网络状态感知器能实时观察网络状态，其感知内容包括网络类型、网络拓扑、可用资源、空口协议、网络流量等影响即插即用性能的状态信息。对此多维信息进行处理，

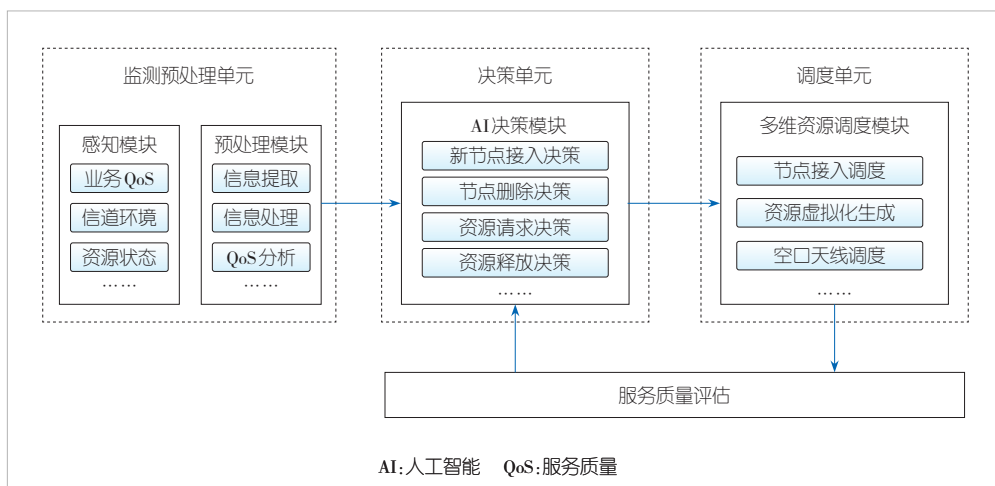


图2 基于在线评估迭代优化的总体流程框图

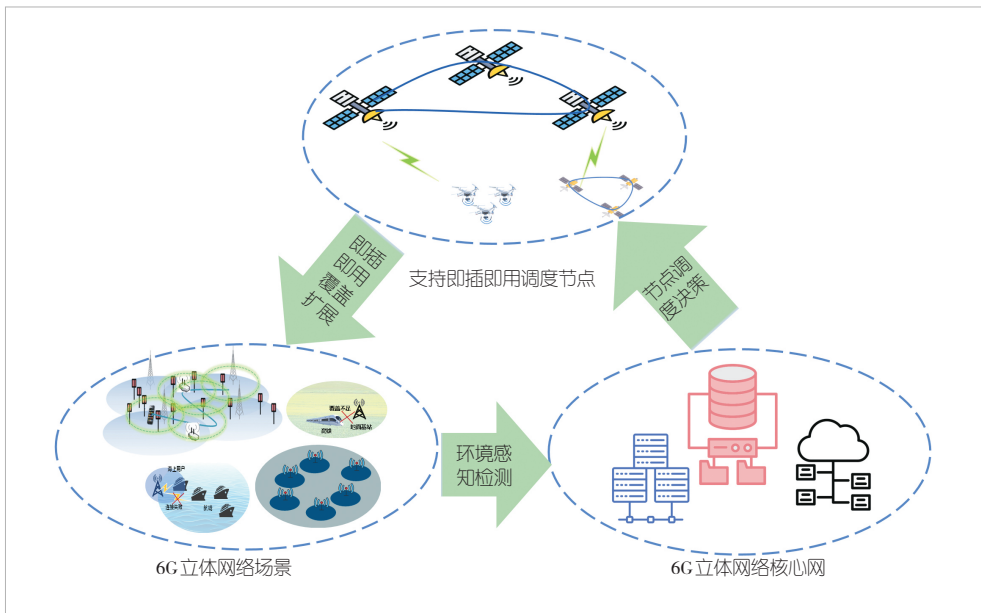


图3 支持即插即用的节点扩展示意图

可实现对即插即用业务的预测，从而解决地基、天基信息不对称所带来的预测不准确的问题。可利用AI算法实时分析环境条件，并将分析结果传输至决策单元。星载与地面决策单元协同工作，通过联合调度策略优化空天地三层节点的部

署，从而实现无线覆盖范围的扩展。

支持即插即用的节点扩展技术通过网络状态参数和QoS参数在各层节点间的无缝传递，实现了空天地多层网络的协同设计，从而更高效地利用网络资源，提升用户服务质量。此外，服务质量评估模块会根据用户满意度向决策模块提供反馈信息，以优化决策过程，进一步提升服务体验。

2) 面向卫星节点接入的信令流程及协议设计

在立体覆盖网络中，卫星节点是实现网络广度扩展的关键要素。将卫星节点灵活、快速地按需接入受限网络是实现无线覆盖扩展的重要途径。本文中，我们提出了一种支持即插即用卫星节点接入的扩展机制，其流程如图4所示。

为了建立卫星节点与地面节点之间的高效连接，我们提

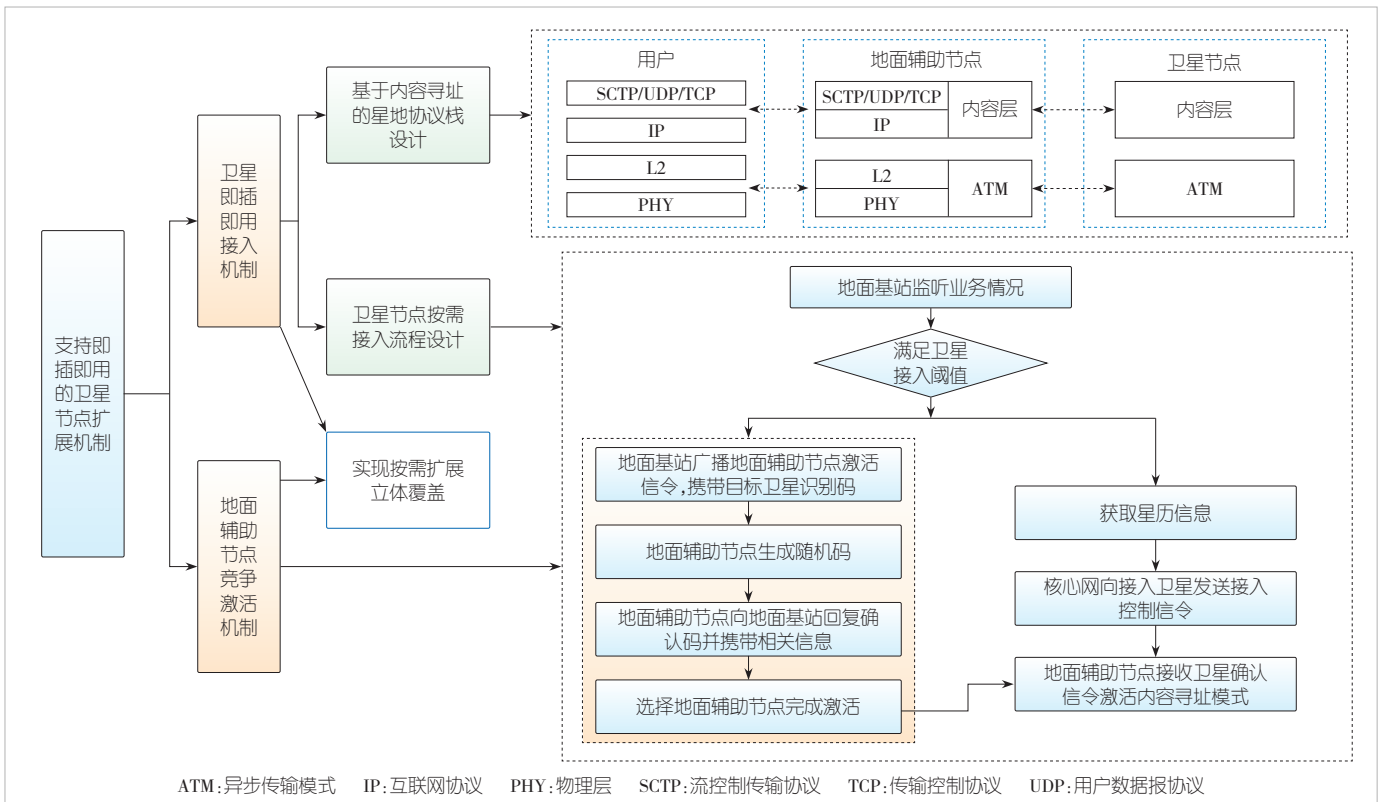


图4 支持即插即用的卫星节点扩展机制流程图

出了一种基于卫星即插即用接入机制的解决方案，实现了卫星节点的快速入网。传统基于IP的寻址方式在连接建立和节点激活阶段，需要接入节点与周边节点及核心网进行大量信息交互，不利于快速建立有效连接。为此，本文创新性地引入了基于内容的寻址方式，以优化网络接入效率。

在这种情况下，为了降低设备复杂度，需对一体化空口进行优化设计，并在地面辅助节点完成协议栈转换。地面辅助节点是指具备协议转换功能的地面基站。为确保地面辅助节点与卫星即插即用节点之间的连接安全性，地面节点会根据星历信息发送包含卫星节点识别码的激活信令。卫星节点在激活后，会向地面辅助节点发送带有标识的回复信令。随后，地面辅助节点将激活即插即用接入模式，实现无缝连接。

如图5所示，星地链路在用户端采用了与无线接入网兼容的协议栈。该协议栈支持物理层的数据传输，并在L2层实现了链路控制、流映射以及数据包的分割与重组，同时在传输层提供了连接建立等功能。地面辅助节点具备协议转换能力，能够与终端用户建立物理和逻辑链路，并支持与卫星异步传输模式（ATM）系统的连接。

在卫星通信系统中，采用基于内容的寻址方式，而地面辅助节点则部署了同时兼容卫星和无线接入网的多模态协议栈。具体而言，协议栈的下层通过L2/物理层（PHY）与ATM的转换，实现了与卫星在信号频率、编码制式及差错检验等底层协议的对接；高层则通过流控制传输协议（SCTP）、用户数据报协议（UDP）以及传输控制协议/互联网协议（TCP/IP）与内容层的转换，支持基于内容的路由功能，并在节点初始建立时实现快速响应。通过在卫星上部署基于内容寻址的协议栈，系统能够与服务节点建立稳定的物理和逻辑链路连接。

本研究提出了一种支持即插即用的卫星扩展机制，并将其应用于高速移动场景。仿真结果表明（如表1所示），通过即插即用方式将卫星节点动态接入网络，可显著提升现有网络覆盖范围内终端设备的业务请求完成率。

4.3 支持即插即用的按需服务功能优化

随着6G技术的发展，传统基于硬件固化、先部署后发

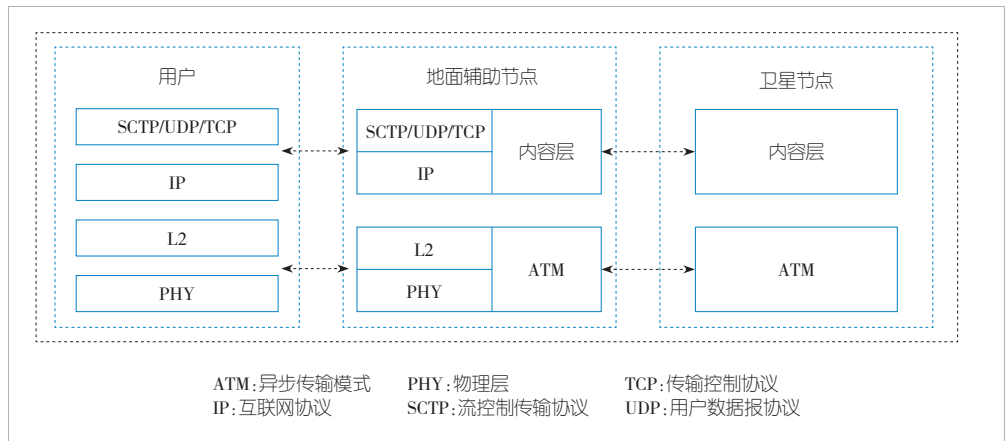


图5 星地链路协议栈转换示意图

射的卫星模式已显现出诸多局限性，难以支撑未来海量新型应用业务的需求。为此，将基站及计算存储容器直接部署在卫星上，可实现新功能的按需订阅，从而在应用层面有效支持网络覆盖的灵活扩展。

为满足6G网络中业务个性化、定制化和广域覆盖的需求，同时提升网络可扩展性和资源利用效率，我们采用模块化设计，将多样化业务功能动态部署于卫星上。这种灵活部署方式能够快速响应业务需求，实现资源的实时调度与释放。通过多终端协同的多要素信息提取算法，我们能够高效处理网络中的多维数据，有效应对业务复杂性，确保服务的实时性。在数据处理层面，传感器采集的多维度信息将被传输至QoS感知处理单元。决策单元则利用多维度联合判决算法，综合考虑服务容器的剩余可用资源、时延代价和即插即用收益等指标，动态决策服务容器内的服务生成。此外，针对即插即用过程中可能出现的配置偏差问题，我们引入基于深度学习的反馈算法，在系统运行过程中持续优化资源分配，并实时调整服务容器的业务配置参数，确保系统的高效稳定运行。

5 结束语

随着未来移动网络接入设备的爆发式增长和业务多样性

表1 高速移动场景下支持即插即用接入的业务完成度对比

时隙数	支持即插即用的业务完成度/%	不支持即插即用的业务完成度/%
0	0	0
765	20.00	0
5 713	37.50	0
9 827	51.25	0
33 472	51.25	26.67
50 000	51.25	26.67

的日益凸显，6G立体覆盖扩展对泛在连接的支持愈发显著，支持即插即用的节点灵活扩展技术变得至关重要。未来，面向立体覆盖的即插即用接入技术的发展，需重点关注以下两点：

1) 高效的节点发现能力。大量闲置节点未能得到有效利用，这些节点具备可用的计算和存储资源，能够为按需服务功能优化提供支持。如何发现和监测这些节点，并为其构建能力标签，以实现灵活快捷的接入，是亟待解决的关键问题。

2) 节点的安全性和可靠性。在设计即插即用接入机制时，往往为了追求灵活便捷而忽视了安全性和可靠性。因此，未来的工作亟需在确保安全可靠的基础上，实现节点的灵活快速接入。

参考文献

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G总体愿景与潜在关键技术白皮书 [R]. 2021
- [2] XU X D, HAN S J, ZHAO Y, et al. 6G wireless coverage extension technology [J]. Scientia sinica (informationis), 2024, 54(5): 1144-1176. DOI: 10.1360/SSI-2023-0346
- [3] 3GPP. NR; Physical layer; General description: 3GPP TS 38.201 [S]. 2017
- [4] 王文兵, 张志民. 5G小基站自动配置与自动部署技术方案的研究 [J]. 通信技术, 2020, 53(12): 2961-2965. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0802.2020.12.013
- [5] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): 3GPP TR 38.821 [S]. 2019
- [6] 王静贤, 张景, 魏肖, 等. 卫星5G融合网络架构与关键技术研究 [J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 528-534. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3114.2021.05.002
- [7] IMT. IMT-2030 6G无线网络架构和功能研究报告 [R]. 2022
- [8] CUI H X, ZHANG J, GENG Y H, et al. Space-air-ground integrated network (SAGIN) for 6G: requirements, architecture and challenges [J]. China communications, 2022, 19(2): 90 - 108. DOI: 10.23919/jcc.2022.02.008
- [9] 侯利明, 韩波, 缪德山, 等. 基于5G及演进的星地融合空口传输技术 [J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(9): 21-29. DOI: 10.12267/j.issn.2096-5931.2021.09.004
- [10] LIU Y W, ZHANG S W, MU X D, et al. Evolution of NOMA

toward next generation multiple access (NGMA) for 6G [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(4): 1037-1071. DOI: 10.1109/jsac.2022.3145234

- [11] LI J, DANG S P, WEN M W, et al. Index modulation multiple access for 6G communications: principles, applications, and challenges [J]. IEEE network, 2023, 37(1): 52 - 60. DOI: 10.1109/mnet.002.2200433
- [12] SHUKLA A, KUMAR M, GUPTA M. Intelligent reflecting surfaces assisted full-duplex IDMA communication network [J]. Wireless personal communications, 2023, 130(1): 469 - 479. DOI: 10.1007/s11277-023-10294-7
- [13] DU J, JIANG C X, WANG J, et al. Machine learning for 6G wireless networks: carrying forward enhanced bandwidth, massive access, and ultrareliable/low-latency service [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2020, 15(4): 122 - 134. DOI: 10.1109/mvt.2020.3019650

作者简介



刘睿，北京邮电大学在读博士研究生；主要研究领域为星地融合网络。



韩书君，北京邮电大学副研究员；主要研究领域为6G智简网络、语义通信、端边云协同分布式智能、智能通信内生安全与隐私保护关键技术等；主持和参与国家级和省部级课题10余项；已发表论文60余篇，申请专利60余项。



许晓东，北京邮电大学教授；主要研究领域为语义通信、智简网络、卫星通信等；作为负责人完成多项国家级项目；获北京市科学技术奖二等奖、中国通信学会科学技术奖一等奖、中国电子学会科学技术奖一等奖，所著专著获“中国出版政府奖”；近5年发表论文50余篇，申请专利80余项。

面向6G动态场景的可移动去蜂窝网络覆盖性能分析



Coverage Performance Analysis of Movable Cell-Free Networks for 6G Dynamic Scenarios

翟浩雅/ZHAI Haoya, 郑家康/ZHENG Jiakang,
章嘉懿/ZHANG Jiayi, 艾渤/AI Bo

(北京交通大学, 中国 北京 100044)
(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20250219.1611.006.html>

网络出版日期: 2025-02-20

收稿日期: 2024-12-20

摘要: 6G动态场景面临频繁切换、覆盖不均匀及信道快速变化等挑战,严重影响用户体验。去蜂窝网络通过分布式节点协作实现连续覆盖,可移动天线通过小尺度位移主动改变信道环境,两者已成为解决上述问题的使能技术。基于可移动去蜂窝网络系统,采用一种可实时调整天线辐射端口的可移动天线架构,通过动态适配机制以适应网络立体覆盖与高动态需求。通过构建信道相关性模型,表征移动速度对系统性能的影响机理,分析用户中断概率及网络中断速率的准确表达式,评估不同系统参数下的覆盖性能,并推导中断概率的近似闭式表达式,为6G移动通信技术的研究和工程实践提供参考。

关键词: 6G移动通信; 去蜂窝大规模MIMO; 可移动天线; 网络中断速率

Abstract: The sixth-generation dynamic scenarios face challenges such as frequent handovers, uneven coverage, and rapid channel variations, which severely affect the user experience. The cell-free network achieves continuous coverage through the cooperation of distributed nodes, and the movable antenna actively changes the channel environment via small-scale displacements, both of which have become enabling technologies to solve the above problems. This paper is based on the movable cell-free network system and adopts a movable antenna architecture that can adjust the antenna radiation ports in real time. It adapts to the requirements of network three-dimensional coverage and high dynamics through a dynamic adaptation mechanism. By constructing a channel correlation model, the influence mechanism of moving speed on system performance is characterized, the accurate expressions of user outage probability and network outage rate are analyzed, the coverage performance under different system parameter settings is evaluated, and the approximate closed-form expression of outage probability is derived, which provides a reference for the research and engineering practice in the field of 6G mobile communication.

Keywords: sixth-generation mobile communication; cell-free massive MIMO; movable antenna; network outage rate

引用格式: 翟浩雅, 郑家康, 章嘉懿, 等. 面向6G动态场景的可移动去蜂窝网络覆盖性能分析 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 20-27. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501005

Citation: ZHAI H Y, ZHENG J K, ZHANG J Y, et al. Coverage performance analysis of movable cell-free networks for 6G dynamic scenarios [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 20-27. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501005

在迈向6G移动通信全场景无缝覆盖以及广域覆盖连续性^[1]的进程中,未来6G通信网络将深度融合地面与非地面通信网络,以拓展其覆盖范围并提升性能^[2]。通过构建以蜂窝网络为核心的多维立体覆盖网络架构,6G网络的服务边界将不断延伸。6G网络可为各类用户群体提供服务,

实现全球立体覆盖的目标。然而,由于移动通信网络覆盖技术和建设成本的限制,目前网络覆盖范围仍然有限。此外,在动态场景下,6G网络还面临频繁切换、覆盖不均及信道快速变化的问题,现有基于相对稳定信道的通信技术难以确保通信业务的质量^[3]。

去蜂窝大规模多输入多输出(CF-mMIMO)系统^[4]通过分布式部署大量接入点(AP),拉近AP与用户(UE)的距离,并由此带来宏分集增益。此外,相比于传统的蜂窝基站

基金项目: 北京交通大学人才基金项目(2024XKRC085); 中国博士后科学基金项目(2024M760195); 中兴通讯产学研合作项目(IA20240709018)

部署，分布式AP能够改善网络边缘用户性能，扩大网络覆盖范围。CF-mMIMO系统凭借其架构与技术优势，能够实现高速移动场景下的无缝切换，在移动场景中高效处理干扰并减少切换频次^[5]。可移动天线作为一种新兴的天线构型，通过动态调整天线的位置和方向，在小范围位移内主动选择最佳信道环境，从而改善信道衰落问题，有效提升移动通信网络容量。在配置固定天线的CF-mMIMO系统中，受限于固定天线的方向恒定，系统无法始终对准最佳的信号传输方向，导致信号强度减弱、传输速率降低以及误码率上升等问题，限制了CF-mMIMO的系统性能。可移动去蜂窝网络^[6]能够有效解决这些问题。在可移动蜂窝网络中，可移动天线借助动态调整端口选择的方式，实现系统信道重构，从而提升系统的灵活性和通信性能。端口选择技术^[7]的核心在于从大量预设位置中选择一个最佳位置放置辐射单元，使得天线指向干扰源信道包络与深衰落空间的叠加区域，以获得空间分集增益，满足移动通信高质量需求。在网络容量方面，该系统可有效支持数十或数百个高速移动用户，提升天线效率并增强通信系统灵活性^[8]。

目前针对CF-mMIMO系统中可移动天线的研究仍处于初步阶段。LYAEE等首次提出使用可移动天线来提升CF-mMIMO系统的性能^[9]，并提供了仿真验证。SHI等创新性地构建了一种六维可移动天线辅助的CF-mMIMO系统^[10]，在应对用户空间分布更为多样的场景中，能够显著提升平均和速率。PI等则聚焦于六维可移动天线的多AP协调系统^[11]，通过优化天线位置和方向来提高网络的覆盖范围和干扰抑制能力，并探讨利用统计信道状态信息设计离线方案的可能性。GUAN等提出在AP处部署可移动天线^[12]，通过灵活调整位置以改善信道条件，并提出一种交替优化框架，提高了求解精度。HU等利用可移动天线阵列进行协作多点接收的无线通信^[13]，通过联合优化发射波束赋形和移动天线阵列的位置来最大化接收信噪比。然而，目前尚无针对CF-mMIMO系统中用户移动速度的研究。

本文在可移动去蜂窝网络系统下，采用了一种可实时调整天线辐射端口的可移动天线架构。首先，基于静态场景下的模型构建全新的信道模型，考虑到用户移动特性，并针对行人、车辆、高铁、无人机等不同速度用户的综合建模需求，构建时间相关系数，表征用户移动速度在信道相关性方面的影响。其次，基于构建的模型，探究用户速度对中断概率的作用机制，分析用户中断概率及平均网络中断速率准确表达式，评估不同系统参数设定下的覆盖性能，进而验证影响性能的关键参数。再次，为降低计算复杂度，对中断概率进行近似求解推导出闭式表达式。最后，对比不同系统参数

下的近似效果，探寻该表达式适用的最优系统条件。

1 系统模型

如图1所示，考虑由L个配置单根固定天线的AP、K个配置单根可移动天线的UE共同构成的CF-mMIMO系统。所有AP通过前传链路与中央处理器（CPU）相连，每个UE配备一个尺寸为Wλ、端口数量为N的可移动天线，其中W为归一化天线尺寸，λ为波长。假设L个AP实现时频同步，共同服务所有UE。UE的可移动性使得信道具有快速变化的特性，此时通信被分成由时刻瞬间组成的资源块，其中τ_c个可供信道使用。

本文主要针对下行信道展开分析。将由AP l发出，由UE k的第n个端口接收的信号写为：

$$r_{kl,n} = h_{kl,n} s_n + \underbrace{\sum_{\tilde{n} \neq n}^N h_{kl,\tilde{n}} s_{\tilde{n}}}_{\tilde{h}_{kl,n}} + \eta_{kl,n} \quad (1)$$

其中，s_n端口n接收到的发射符号，s _{\tilde{n}} 表示端口 \tilde{n} 接收到的发射符号，且 $\tilde{n} \neq n$ ，h_{kl,n}表示AP l到UE k在端口n之间的衰落信道增益，h_{kl, \tilde{n}} 表示AP l到UE k在 \tilde{n} 端口之间的衰落信道增益， $\tilde{h}_{kl,n}$ 表示对端口n的总干扰信号，η_{kl,n}表示AP l到UE k在端口n处间的零均值复加性高斯白噪声。

在移动通信的场景中，AP和UE之间的相对移动会导致传播环境的变化，引发信道状态的改变。本文重点考虑多普勒效应对系统产生的影响。由于速度因素会导致信道相关系数的变化，本文引入时间相关系数ρ_{kl}[m]来表征这种相关性变化，如公式（2）所示：

$$h_{kl}[m] = \rho_{kl}[m] \tilde{h}_{kl}[0] + \bar{\rho}_{kl}[m] h_{kl}[m] \quad (2)$$

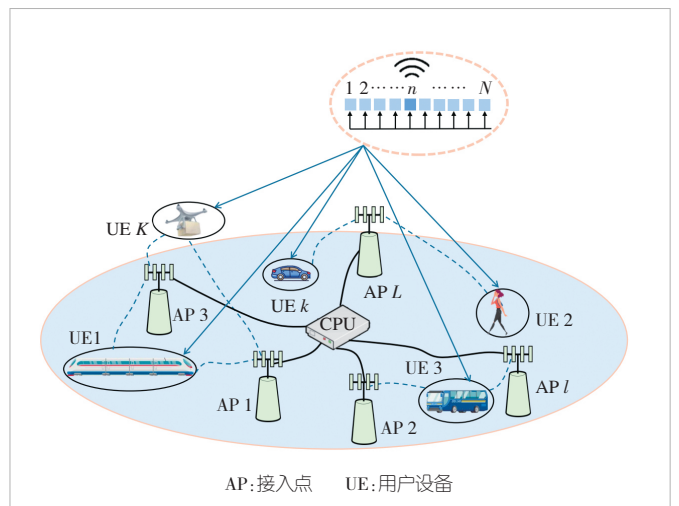


图1 可移动去蜂窝网络系统模型

其中, $\rho_{kl}[m]$ 表示时刻0与 m 的信道在实现UE k 和AP l 时的时间相关系数, $\rho_{kl}[m] = J_0(2\pi f_{D,k} T_s m)$, $J_0(\cdot)$ 是零阶贝塞尔函数, T_s 是采样时间, $f_{D,k} = v_k f_c / c$ 是速度为 v_k 的UE产生的多普勒频移, 其中 f_c 是载频频率, c 是光速且数值为 3×10^8 m/s. $h_{kl}[0]$ 表示时刻0时信道的增益, $h_{kl}[m]$ 表示 m 时刻信道的增益, $\bar{\rho}_{kl}[m] = \sqrt{1 - \rho_{kl}^2[m]}$.

2 相关性分析

对于每个UE, 我们为其配置一个长度为 $W\lambda$ 的 N 端口线性可移动天线, 即在天线上有均匀分布的 N 个可切换的辐射单元. 可移动天线的端口位置可以沿天线移动, 图2描述了可移动天线的物理结构.

以第一个端口为参考, 则第 n 个端口到第1个端口的距离表示为^[14]:

$$\Delta d_{n,1} = \left(\frac{n-1}{N-1} \right) W\lambda, n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

本文定义最佳端口为能够使端口接收信号的信号干扰比(SIR)达到最大的端口^[15], 并选择最佳端口 n^* 进行通信. n^* 定义为:

$$n^* = \arg \max_n \text{SIR}_n \equiv \arg \max_n \frac{|h_{kl,n}|^2}{|\tilde{h}_{kl,n}|^2} \quad (4)$$

每个AP给UE提供的信道是相互独立的, 将端口信道振幅 $|h_{kl,n}|$ 建模为瑞利分布的随机变量, 其概率密度为^[14]:

$$p_{|h_{kl,n}|}(r) = re^{-\frac{r^2}{\sigma^2}} \quad (5)$$

$$E\left[|h_{kl,n}|^2\right] = \sigma^2 \quad (6)$$

通常在建模信道相关系数时, 我们会以第一个端口为参考, 如公式(7)所示:

$$h_{kl,n} = \sigma \left(\sqrt{1 - \mu_n^2} x_{kl,n} + \mu_n x_{00,n} \right) + j\sigma \left(\sqrt{1 - \mu_n^2} y_{kl,n} + \mu_n y_{00,n} \right) \quad (7)$$

$k = 1, 2, \dots, K; l = 1, 2, \dots, L$

其中 $x_{00,n}, \dots, x_{kl,n}, \dots, x_{KL,n}, y_{00,n}, \dots, y_{kl,n}, \dots, y_{KL,n}$ 都是独立的高斯随机变量, 均值为0, 方差为0.5. 参数 μ_n 用于表示端口 n 上信道的相关性, 将 μ_n 表示为:

$$\mu_n = J_0\left(\frac{2\pi kW}{N-1}\right) \quad (8)$$

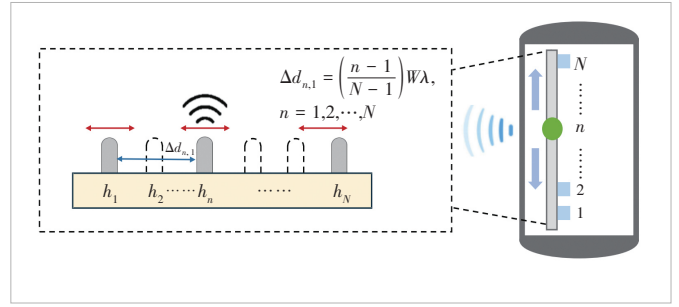


图2 可移动天线物理结构图

其中, W 是归一化天线尺寸, μ_n 反映了端口 n 和参考端口之间的相关性. 这里我们假设端口 n 和参考端口之间的距离是 $nW\lambda/(N-1)$.

尽管公式(8)能够有效地将空间相关性纳入端口建模, 但无法在没有参考端口的情况下建模任意两个端口间的相关性. 为了解决这一问题, 需要通过相关系数 μ_n 直接关联任意两个端口, 而无须指定参考端口.

将任意两个端口 p 和 q ($p \neq q$)之间的相关系数表示为:

$$\rho_{p,q} = \mu_p \mu_q = J_0\left(\frac{2\pi(p-q)W}{N-1}\right) \quad (9)$$

公式(9)表示距离为 $(p-q)W\lambda/(N-1)$ 的两个端口的空间相关性, 然而求出 μ_n 的解是不可实现的. 为简化运算, 假设所有端口对之间的相关性是均匀分布的. 在公式(9)中令 $\mu_p = \mu_q = \mu$, 用相关系数平方的平均值 μ^2 代替任意两个端口间的相关系数, 无须使用参考端口.

$$\rho_{p,q} = \mu^2 = \left| \frac{2}{N(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (N-k) J_0\left(\frac{2\pi kW}{N-1}\right) \right| \quad (10)$$

当 $N \rightarrow \infty$ 时, 将相关系数 μ 写为:

$$\mu = \sqrt{2} \sqrt{{}_1F_2\left(\frac{1}{2}; 1, \frac{3}{2}; -\pi^2 W^2\right) - \frac{J_1(2\pi W)}{2\pi W}} \approx \begin{cases} 1 - \frac{\pi^2 W^2}{12}, & W \leq 0.6 \\ \frac{1}{\sqrt{\pi W}}, & W \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

其中, ${}_1F_b(\cdot; \cdot; \cdot)$ 为广义超几何函数, $J_1(\cdot)$ 为第一类一阶贝塞尔函数. 经过上述计算, 可以确保对于归一化天线尺寸为 W 的线性可移动天线具有相同的平均相关系数.

3 性能分析

中断概率^[6]是指无线通信系统中接收信号质量低于某个给定阈值的概率. 较低的中断概率表征在更广泛范围内, 接

收信号的质量能够保持在可接受的水平，即表明系统具有较好的覆盖性能；反之，较高的中断概率会导致覆盖范围缩小。这是因为高中断概率意味着在更多区域内，信号质量难以达到阈值标准要求，无法保证可靠的通信，导致系统的有效覆盖区域缩减。

根据中断概率的含义，相关定义式可写为：

$$p_{\text{out}}(\gamma) = \text{Prob}(\text{SIR} = \max_k \text{SIR}_k < \gamma) \quad (12)$$

一般地，根据文献[16]和[17]，当SIR阈值为 γ 时，UE的中断概率表示为：

$$p_{\text{out}}(\gamma) = \int_0^\infty e^{-z} \int_0^\infty e^{-t} \left[1 - \left[Q_1 \left(\sqrt{\frac{2\mu^2 t}{(1-\mu^2)(a^2+1)}}, a \sqrt{\frac{2\mu^2 z}{(1-\mu^2)(a^2+1)}} \right) - \left(\frac{a^2}{a^2+1} \right) e^{-\frac{\mu^2(a^2 z + t)}{(1-\mu^2)(a^2+1)}} \times I_0 \left(\frac{2\mu^2 a \sqrt{zt}}{(1-\mu^2)(a^2+1)} \right) \right]^N \right] dt dz \quad (13)$$

其中， $Q_1(\cdot, \cdot)$ 是一阶 Marcum Q 函数， $a = \sqrt{(K-1)\gamma L}$ 。

为简化表达形式及方便后续近似求解，令

$$Z = Q_1 \left(\sqrt{\frac{2\mu^2 t}{(1-\mu^2)(a^2+1)}}, a \sqrt{\frac{2\mu^2 z}{(1-\mu^2)(a^2+1)}} \right) - \left(\frac{a^2}{a^2+1} \right) e^{-\frac{\mu^2(a^2 z + t)}{(1-\mu^2)(a^2+1)}} \times I_0 \left(\frac{2\mu^2 a \sqrt{zt}}{(1-\mu^2)(a^2+1)} \right) \quad (14)$$

将公式(14)代入公式(13)，则中断概率可简化写为：

$$p_{\text{out}}(\gamma) = \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-z} e^{-t} (1-Z)^N dt dz \quad (15)$$

平均网络中断速率是关于固定阈值 γ 的函数，表示为^[17]

$$C(\gamma) = K [1 - p_{\text{out}}(\gamma)] \log_2(1 + \gamma) \quad (16)$$

对于通信网络，根据公式(16)进行分析，一方面，如果 γ 很小，每个UE的传输速率很低，整体网络速率 $C(\gamma)$ 会处于较低的水平；另一方面，如果 γ 太大，大部分UE的SIR阈值无法达到 γ ，导致通信中断的概率增大。当 $p_{\text{out}}(\gamma) \rightarrow 1$ 时，平均网络中断速率会很低，网络的可靠性也会降低，这导致无法有效保障通信服务的连续性与质量。因此，对于平均网络中断速率来说，应该有一个最优的 γ 使得 $C(\gamma)$ 取得峰值。

实际计算 $C(\gamma)$ 时，信道的概率密度函数和累积分布函

数难以处理，计算复杂度高，需要消耗较多的计算资源，严重影响系统的运行效率。为降低计算复杂度，下面推导一种封闭表达式来近似 $C(\gamma)$ ，并将推导的近似结果用 $C'(\gamma)$ 表示。

中断概率是 N 的递减函数，一般 $Z < 1$ ，对于一个较小的 Z ，使用 $(1-Z)^N \approx 1 - NZ$ 进行线性化近似：

$$p_{\text{out}}(\gamma) = \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-z} e^{-t} (1 - NZ) dt dz \quad (17)$$

运用已知的数学定理(18—20)对公式(17)进行计算：

$$\int_0^\infty e^{-\alpha t} I_0(\beta \sqrt{t}) dt = \frac{1}{\alpha} e^{\frac{\beta^2}{4\alpha}}, \alpha, \beta > 0 \quad (18)$$

$$\int_0^\infty e^{-t} Q_1(\alpha \sqrt{t}, \beta) dt = Q_1 \left(0, \frac{\sqrt{2} \beta}{\sqrt{\alpha^2 + 2}} \right) \quad (19)$$

$$\int_0^\infty e^{-t} Q_1(0, \alpha \sqrt{t}) dt = \frac{2}{\alpha^2 + 2} \quad (20)$$

在假设 μ 比较小的条件下， $\mu^2 \ll 1 - \mu^2$ 成立，可忽略 $N\mu^2/(a^2+1)$ 对结果的影响，并假设 $(K-1)\gamma \gg 1$ ，使用 $[\cdot]^+$ 保证结果的非负性，最终近似计算中断概率为：

$$p_{\text{out}}(\gamma) \approx \left[1 - \frac{N(1-\mu^2)}{a^2+1} - \frac{N\mu^2}{a^2+1} \right]^+ \quad (21)$$

将 $a^2 = (K-1)\gamma L$ 和公式(21)代入公式(16)中，求得近似的平均网络中断速率 $C'(\gamma)$ 为：

$$C'(\gamma) = \begin{cases} \frac{KN \left(1 - \frac{1}{\pi W} \right)}{(K-1)\gamma} \log_2(1 + \gamma), & \gamma > \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W} \right)}{K-1} \\ K \log_2(1 + \gamma), & \gamma \leq \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W} \right)}{K-1} \end{cases} \quad (22)$$

平均网络中断速率的结果是关于SIR阈值 γ 的函数，为求出 $C'(\gamma)$ 取最大值时对应的 γ ，对 $C'(\gamma)$ 求 γ 下的偏导数：

$$\frac{\partial C'(\gamma)}{\partial \gamma} = \begin{cases} C'_1(\gamma), & \gamma > \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W} \right)}{K-1} \\ \frac{K}{\ln 2(1 + \gamma)}, & \gamma \leq \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W} \right)}{K-1} \end{cases} \quad (23)$$

其中，

$$C'_i(\gamma) = \frac{K[1 - p_{out}(\gamma)]}{\ln 2(1 + \gamma)} - \frac{K \ln(1 + \gamma)}{\ln 2} \left[\frac{\partial p_{out}(\gamma)}{\partial \gamma} \right] \quad (24),$$

$$\frac{\partial p_{out}(\gamma)}{\partial \gamma} = \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W}\right)}{(K - 1)\gamma^2} \quad (25).$$

将公式 (25) 代入公式 (24) 中, 得到:

$$C'_i(\gamma) = \frac{KN \left(1 - \frac{1}{\pi W}\right)}{\ln 2(K - 1)\gamma} \left(\frac{1}{1 + \gamma} - \frac{\ln(1 + \gamma)}{\gamma} \right) < 0 \quad (26).$$

当 $\gamma > \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W}\right)}{K - 1}$ 时, $C'_i(\gamma) < 0$ 。同时根据公式

$$(23), \gamma \leq \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W}\right)}{K - 1} \text{ 时, } \frac{\partial C'_i(\gamma)}{\partial \gamma} = \frac{K}{\ln 2(1 + \gamma)} > 0。 \text{ 因此, } C(\gamma) \text{ 最大值出现在 } \gamma^* \text{ 处。}$$

$$\gamma^* = \frac{N \left(1 - \frac{1}{\pi W}\right)}{K - 1} \quad (27).$$

4 仿真结果及讨论

实际上, $C(\gamma)$ 取决于多个参数因素, 如用户数量、AP 数量、可移动天线的长度和端口数量。为了验证这些参数因素如何影响 $C(\gamma)$, 我们需要进一步仿真分析。这里我们假设信道模型为瑞利衰落信道。若无特别说明, 假设 AP 数量 $L = 50$, 且 AP 采用均匀随机撒放方式, UE 数量 $K = 3$, UE 移动速度 $v_k = 1 \text{ m/s}$, 载波频率 $f_c = 0.25 \text{ GHz}$, 则波长为 $\lambda = 1.2 \text{ m}$ 。可移动归一化天线尺寸 $W = 0.1$, 天线尺寸为 $0.1\lambda = 12 \text{ cm}$, 这些尺寸均符合移动设备的典型尺寸要求。此外, 可移动天线端口数 $N = 5$ 。假设在通信过程中, 可移动天线在每个时隙时快速切换到最佳端口 n^* , 且几乎没有延迟。在本节中, 我们将提供仿真结果并分析系统性能。

图3探讨了不同UE移动速度下, 改变UE数量 K 与 AP 数量 L 对中断概率的影响。当UE速度为0时, 中断概率较小, 且在 10^{-3} 数量级。此时UE的通信状况几乎不受中断影响。随着UE速度的增加, 中断概率会迅速上升到 10^{-1} 量级, 之后在 $10^{-1} \sim 1$ 之间持续增加, 表现出相对稳定的增大趋势, 并最终接近于1。此外, 在固定端口数和归一化天线尺寸的情况下, 保持 L 不变。随着 K 的增大, 中断概率会增大。相反, 在固定 K 的条件下, 增大 L 则会导致中断概率的降低。当天线尺寸 L 较大时, 天线端口之间的距离相对较大, 导致

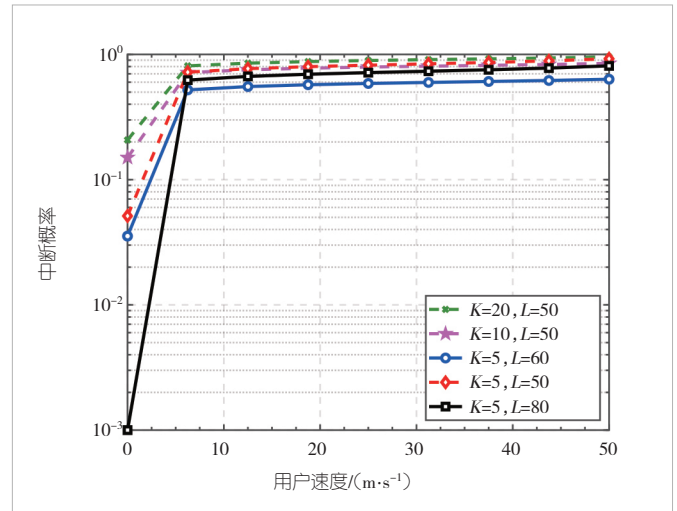


图3 不同速度下改变 K 和 L 对中断概率的影响

端口之间的空间相关性降低, 信号衰落更加独立。系统可以通过选择最佳端口来获得更好的信号质量, 从而降低中断概率。反之, 当 L 较小时, 端口之间的空间相关性较高, 信号衰落较为相似, 系统难以准确选择最佳通信端口, 中断概率会升高。值得一提的是, 减少 K 和增加 L 虽然都有助于提高系统的稳定性和可靠性, 但增大 L 对中断概率的改变程度大于增加 K 对中断概率的改变程度。这意味着在实际工程中, 提高 AP 的部署密度能够有效提高通信质量。另外, 用户移动速度对中断概率有显著影响, 尤其是在速度变化的初期阶段。而在高速情况下, 不同参数组合对中断概率的影响逐渐减小。此时用户移动速度成为影响系统性能的主要因素, 因此需要采取其他技术来降低中断概率, 保障通信质量。

图4和图5均考虑在不同SIR 阈值下的平均网络中断速率。图4描述了改变用户数量对平均网络中断速率的影响,

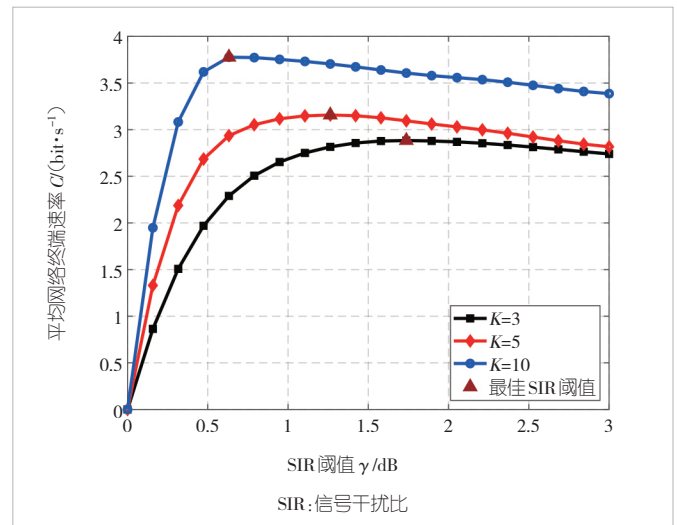


图4 改变 K 时系统相对 SIR 阈值的平均网络中断速率

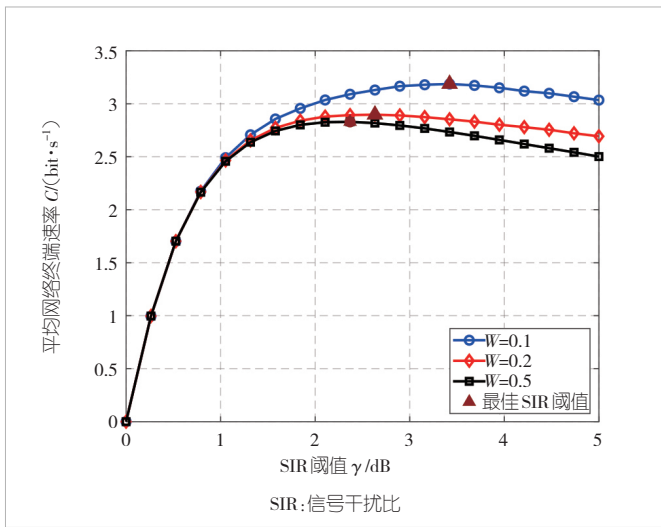


图5 改变W时系统相对于SIR阈值的平均网络中断速率

取 $K = 3, 5, 10$ ，红色三角形表示实际最佳SIR阈值 γ^* 。对于每一根曲线来说，总体趋势均为先上升后下降，符合依据公式(16)所做的理论分析结果。因此，存在一个使平均网络中断速率达到峰值的点，对应的SIR阈值即为最佳阈值 γ^* 。此外，随着UE数量 K 的增加，平均网络中断速率也随之增大，而 γ^* 却相应减小。在 K 取值从3增大到5时，其对平均网络中断速率的改变幅度，相较于从5增大到10时的改变幅度要小。在高SIR阈值水平时，这种增大所带来的改变程度还会进一步缩减。在UE数量增加的情况下，为了确保所有UE能够获得更优的通信质量，最佳SIR阈值 γ^* 需要适当降低。这种调整有助于在高用户密度的环境中，优化网络性能，提高覆盖性能，确保通信质量。

图5则描绘了在不同可移动归一化天线尺寸条件下，系统的平均网络中断速率水平。当归一化天线尺寸 $W = 0.1, 0.2, 0.5$ 时， f 的取值分别为0.25、0.50、1.25 GHz。整体来看，图线也呈现出先上升后下降的变化趋势。随着 W 的增大，平均网络中断速率减小，并且 W 从0.1增大到0.2时 $C(\gamma)$ 的增大幅度比 W 从0.2增大到0.5时更显著。结果表明，较小的天线尺寸对应较小的载波频率，这有助于提高中断速率，从而有助于提升系统的整体性能。此外，随着 W 的增加， γ^* 相应减小。因此，在归一化天线尺寸增大（即载波频率增大）时，合理地降低SIR阈值有助于提高系统性能。在设计、优化无线通信系统时，只有合理地设定SIR阈值和天线尺寸，才能在不同条件下使网络性能与覆盖效果达到最佳状态。

将本文公式(21)提出的闭式表达结果和公式(13)求得的中断概率结果分别代入公式(16)中，可分别求得近似

的平均网络中断速率 $C'(\gamma)$ 和准确的平均网络中断速率 $C(\gamma)$ 。我们使用 $C'(\gamma)/C(\gamma)$ 的比值结果来表现闭式表达式的准确性。比值越接近1，说明闭式表达式的结果与真实值越接近。从图6—8的结果可以看出，随着目标SIR的增大，比值结果逐渐升高，这表明近似效果在变好。这是因为，SIR阈值 γ 的升高可以更好地满足 $(K - 1)\gamma \gg 1$ 的假设条件，使得闭式表达式结果更精准。

图6分析了不同可移动天线端口数 N 对结果的影响。随着端口数量的增加，近似效果下降。在进行近似计算的过程中，所需忽略的部分 $N\mu^2/(a^2 + 1)$ 会增大。这对近似效果产生了干扰，使得近似结果与精确计算结果之间的偏差扩大，从而在整体上降低了近似的准确性。

图7考虑了不同可移动归一化天线尺寸 W 对于近似

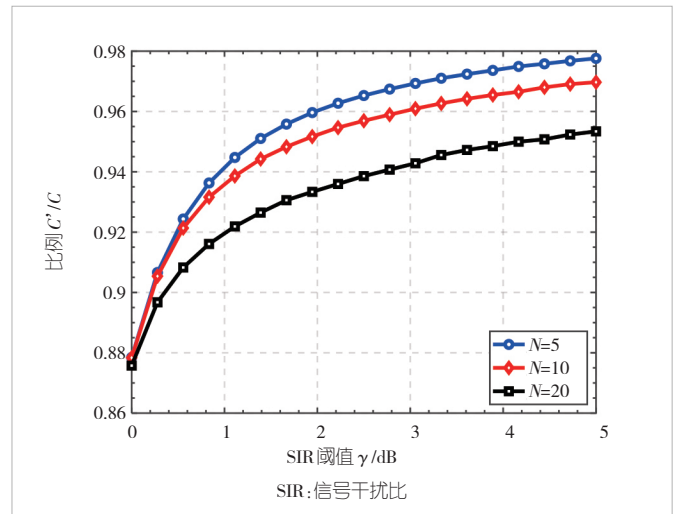


图6 不同N下C'(gamma)/C(gamma)相对于SIR阈值的结果

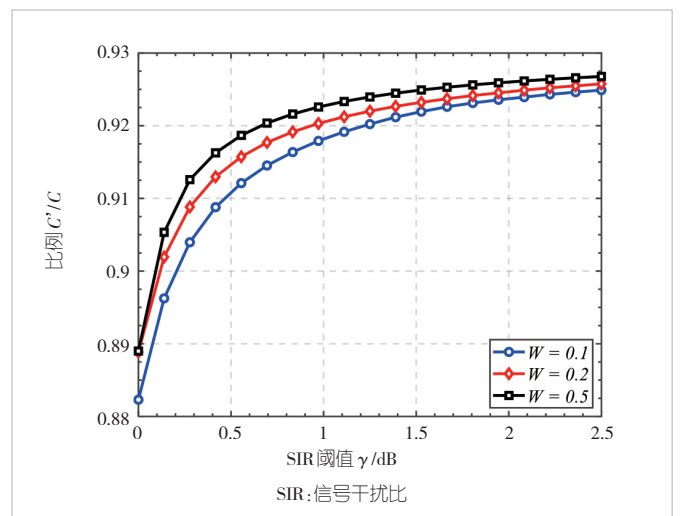


图7 不同W下C'(gamma)/C(gamma)相对于SIR阈值的结果

结果的影响。结果显示,随着天线尺寸的增大,端口间的距离会增大,相关系数 μ 会减小且更趋于满足近似条件 $\mu^2 \ll 1 - \mu^2$,近似效果最终得到改善。因此,闭式表达在大尺寸天线条件下具备更优的性能表现。

图8则分析了不同用户数量 K 的影响。随着 K 的增加,比例结果上升,近似效果变好。由于 K 增大时,可以更好地满足 $(K-1)\gamma \gg 1$ 的假设条件,因此闭式表达式结果更精准。因此,合理选择阈值、天线端口数量与尺寸,以及用户数量,可以优化闭式表达的效果,从而更准确地预测系统性能,减少计算复杂度。

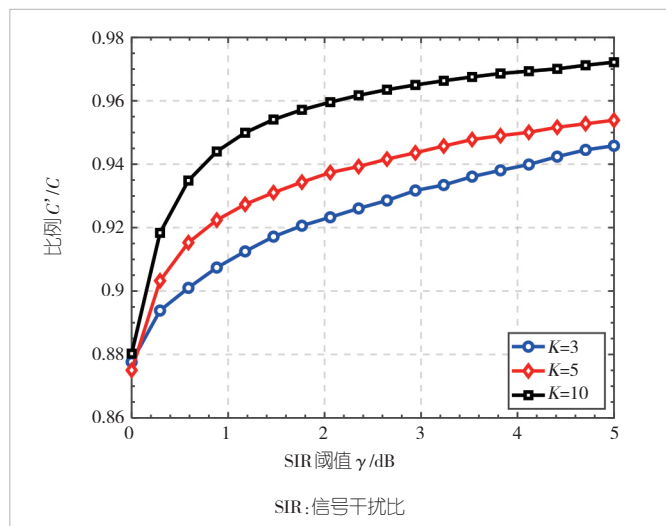


图8 不同 K 下 $C'(\gamma)/C(\gamma)$ 相对于SIR阈值的结果

5 结束语

本文基于动态CF-mMIMO系统框架,构建了一种端口切换的可移动天线系统模型,通过改变系统的多个参数,将中断概率和平均网络中断速率作为性能指标,探究了不同参数对系统性能的影响。为降低计算复杂度,本文还推导了中断概率的近似闭式表达式,通过将闭式表达式与真实值进行比较,分析了不同场景下两者的接近程度,确定闭式表达适用的最佳场景。

仿真结果表明,用户移动速度对中断概率有显著影响,尤其是在速度变化的初期阶段。此外,减少用户数量、增加AP数量均有助于提升系统的稳定性与可靠性。当SIR阈值 γ 增大,平均网络中断速率 $C(\gamma)$ 总体呈现出一种先上升后下降的趋势。对推导的闭式表达式的探究表明,在提高SIR阈值 γ ,且端口数量相对较少、天线尺寸较大以及用户数量较多的情境下,闭式表达式所得到的结果展现出更高的准确

性,为系统的优化设计与性能评估提供了极具价值的理论依据与数据支撑。

参考文献

- [1] YANG B, LIANG X, LIU S N, et al. Intelligent 6G wireless network with multi-dimensional information perception [J]. ZTE communications, 2023, 21(2): 3-10. DOI: 10.12142/ZTECOM.202302002
- [2] WANG H L, SUN D S, SUN C Y, et al. A physical air-to-ground modeling method with dynamic investigations for integrated sensing and communication [J]. Journal of communications and networks, 2024, 26(5): 509-520. DOI: 10.23919/JCN.2024.000041
- [3] GHARODE D, NELLA A, RAJAGOPAL M. State-of-the-art design aspects of wearable, mobile, and flexible antennas for modern communication wireless systems [J]. International journal of communication systems, 2021, 34(15): e4934. DOI: 10.1002/dac.4934
- [4] BUZZI S, D'ANDREA C. User-centric communications versus cell-free massive MIMO for 5G cellular networks [EB/OL]. (2017-03-15) [2024-12-25]. https://iris.unicas.it/bitstream/11580/67185/2/User-Centric_Communications_versus_Cell-free_Massive_MIMO_for_5G_Cellular_Networks.pdf
- [5] BUZZI S, D'ANDREA C. Cell-free massive MIMO: user-centric approach [J]. IEEE wireless communications letters, 2017, 6(6): 706-709. DOI: 10.1109/LWC.2017.2734893
- [6] ZHU L P, MA W Y, ZHANG R. Movable antennas for wireless communication: opportunities and challenges [J]. IEEE communications magazine, 2024, 62(6): 114-120. DOI: 10.1109/MCOM.001.2300212
- [7] CHAI Z, WONG K K, TONG K F, et al. Port selection for fluid antenna systems [J]. IEEE communications letters, 2022, 26(5): 1180-1184. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3152451
- [8] WONG K K, TONG K F, SHEN Y J, et al. Bruce Lee-inspired fluid antenna system: six research topics and the potentials for 6G [J]. Frontiers in communications and networks, 2022, 3: 853416. DOI: 10.3389/frcmn.2022.853416
- [9] OLYAEE M, BUZZI S. User-centric cell-free massive MIMO with access points empowered by fluid antennas [C]// Proceedings of IEEE 25th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2024: 666-670. DOI: 10.1109/SPAWC60668.2024.10694457
- [10] SHI X, SHAO X, ZHENG B, et al. 6DMA-aided cell-free massive MIMO communication [EB/OL]. (2024-12-02) [2024-12-10]. <https://arxiv.org/abs/2412.01270>
- [11] PI X Y, ZHU L P, MAO H B, et al. 6D movable antenna enhanced multi-access point coordination via position and orientation optimization [EB/OL]. (2024-12-14) [2024-12-25]. <https://arxiv.org/abs/2412.10736v1>
- [12] GUAN J Y, LYU B, LIU Y, et al. Secure transmission for movable antennas empowered cell-free symbiotic radio communications [C]// Proceedings of 16th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2024: 578-584. DOI: 10.1109/WCSP62071.2024.10827177
- [13] HU G J, WU Q Q, OUYANG J, et al. Movable-antenna-array-enabled communications with CoMP reception [J]. IEEE communications letters, 2024, 28(4): 947-951. DOI: 10.1109/LCOMM.2024.3358762

- [14] WONG K K, SHOJAEIFARD A, TONG K F, et al. Fluid antenna systems [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(3): 1950–1962. DOI: 10.1109/TWC.2020.3037595
- [15] ZHU L P, MA W Y, NING B Y, et al. Movable-antenna enhanced multiuser communication via antenna position optimization [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(7): 7214–7229. DOI: 10.1109/TWC.2023.3338626
- [16] NEW W K, WONG K K, XU H, et al. Fluid antenna system: new insights on outage probability and diversity gain [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(1): 128–140. DOI: 10.1109/TWC.2023.3276245
- [17] WONG K K, TONG K F. Fluid antenna multiple access [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(7): 4801–4815. DOI: 10.1109/TWC.2021.3133410

作者简介



翟浩雅，北京交通大学在读硕士研究生；主要研究方向为大规模MIMO系统中的可移动天线技术。



郑家康，北京交通大学副教授；主要研究领域为多天线传输理论和关键技术；已发表论文30余篇，获美国授权专利1项。



章嘉懿，北京交通大学教授；主要研究领域为大规模MIMO基础理论和关键技术；先后主持和参加基金项目10余项，获得3项科研成果奖；已发表论文100余篇，获授权国家发明专利10余项。



艾渤，北京交通大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长，IEEE Fellow，IET Fellow，IEEE VTS杰出讲师，国家自然科学基金委创新群体负责人，国家杰青、优青，牛顿高级学者基金获得者，国家6G总体组专家，工信部5G AIA综合轨道交通工作组组长，中国电子学会智慧交通信息工程分会副主任兼秘书长，入选2020、2021、2022年全球前2%顶尖科学家；主要从事宽带移动通信和轨道交通专用移动通信的研究。

面向网络化通信感知一体化的立体覆盖方法



Three-Dimensional Coverage Method for Networked Integrated Sensing and Communication

杨文彬/YANG Wenbin, 邱裕鹤/QIU Yuhe, 苏郁/SU Yu

(中国移动(成都)产业研究院, 中国 成都 610200)
(China Mobile Chengdu R&D Institute, Chengdu 610200, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501006

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250312.1759.002.html>

网络出版日期: 2025-03-13

收稿日期: 2024-12-08

摘要: 提出了一种基于有向图(DG)模型的综合通信感知一体化(ISAC)系统分析方法。通过构建考虑环境约束和ISAC节点间协作/干扰特性的收发(T-R)模型,将基站主动天线单元(AAU)间的T-R关系抽象为与节点资源相关的有向边,从而有效表征基站间的协作与干扰特征。在此基础上,提出了资源分配(RA)优化方法,旨在满足感知能力和干扰水平等性能约束的同时,最小化ISAC立体覆盖系统成本。仿真实验和实际部署案例验证了所提方法在立体覆盖分析和资源优化方面的有效性,为大规模网络化ISAC系统的实现提供了理论依据和实践指导。

关键词: 通信感知一体化; 立体覆盖; 协作感知; 资源分配

Abstract: A novel analytical method for integrated sensing and communication (ISAC) systems based on a directed graph (DG) model is presented. By constructing a Transmit-Receive (T-R) model that accounts for environmental constraints and the cooperative/interference characteristics among ISAC nodes, the T-R relationships between active antenna units (AAUs) of base stations are abstracted as directed edges related to node resources, effectively characterizing the cooperation and interference features between base stations. A resource allocation (RA) optimization method is then proposed, aiming to minimize the cost of ISAC three-dimensional coverage systems while satisfying performance constraints such as sensing capability and interference levels. Simulation experiments and practical deployment cases validate the effectiveness of the proposed method in three-dimensional coverage analysis and resource optimization, providing theoretical foundations and practical guidance for the realization of large-scale networked ISAC systems.

Keywords: ISAC; three-dimensional coverage; cooperative sensing; resource allocation

引用格式: 杨文彬, 邱裕鹤, 苏郁. 面向网络化通信感知一体化的立体覆盖方法 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 28-38. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501006

Citation: YANG W B, QIU Y H, SU Y. Three-dimensional coverage method for networked integrated communication and sensing [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 28-38. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501006

随着5G和6G的发展,包括通信、感知、计算、人工智能、安全和大数据在内的多种能力和技术将得到全面整合^[1]。其中,通信感知一体化(ISAC)是移动通信网络发展的一个关键技术方向^[2]。该技术通过利用相同的硬件、频谱和波形,在移动蜂窝网络中融合感知与通信功能。感知服务将成为扩展移动网络能力的重要推动力,在智能交通系统、智能制造设施、环境监测和低空智联网(LAE)等新型应用方面发挥重要作用^[3]。此外,ISAC技术还能实现感知和通信功能的互惠互利,在信道估计、干扰避让等领域发挥重要作用,将显著提高移动通信网络的性能和效率^[4]。

目前,ISAC的研究主要集中在单个基站(BS)性能上。

单个BS通过主动收发电磁波,解算目标回波中所包含的目标到达角(AoA)、出发角(AoD)、传播时延以及多普勒频率等多维度的信息,据此来估计环境中目标的位置和速度,从而实现目标的高精度定位^[1]。为了与现有的通信业务更好地融合,基于移动蜂窝网的ISAC框架的感知功能一般会复用通信中的正交频分复用(OFDM)波形^[5-6]。然而,OFDM波形虽然确保了稳健的通信性能,但未经优化的OFDM波形感知性能有限。为提升感知性能,需对ISAC波形进行优化设计。其中,基于峰值旁瓣比(PSLR)等特定感知约束的波形设计方法备受关注^[7]。进一步地,考虑到感知功能与通信信号中的多用户干扰(MUI)问题,一些学者还创新性地

提出了一系列感知和通信联合设计的方案^[5,8]。

尽管目前的研究在提升单基站的感知能力方面取得了显著进展,但单BS在全域立体覆盖、目标分辨能力等方面仍存在较大的局限性^[1]。因此,为了最大化基站广泛部署的优势,用好移动通信蜂窝网络这张“大网”,综合利用多个BS来进行协作感知至关重要。针对多站点分布式感知,目前最成熟的领域为多基地雷达(MR)。MR是一种利用多站增益进行协作探测的系统。通过协调多个节点,MR可以对目标进行协同探测,显著增强了目标检测和跟踪能力,从而克服单个雷达系统的固有瓶颈^[9-10]。尽管组网雷达在波束控制、多站协作、节点资源分配等领域已经取得了一定的理论成果^[10-13],但这些研究都是基于理想的状态,并未考虑现实蜂窝通信系统资源有限、BS相互干扰(MI)等复杂约束情况,因此其模型和方法不能直接用于网络化通信感知一体化的分析。另一种使用多站增益来实现广域覆盖的系统是无线传感器网络(WSNs)。目前,针对MSN的协作式感知,业界已经开发了一系列的方法。这些方法考虑了诸如传感器电池寿命、通信带宽等限制因素^[14-16]。然而,与WSNs中广泛采用被动传感器不同的是,ISAC系统中BS主动地传输和接收电磁波,因此站点之间会发生相互干扰。因此适用于WSNs的性能指标和约束条件等也不能直接用于ISAC系统的建模和优化。

近年来,为了提升ISAC系统的感知性能,有学者提出一种使用多个BSs进行网络化协作感知的架构^[1,4]。该架构采用多基站协同处理感知数据,并提出了基于超分辨率的参数估计算法,显著提升了位置和速度估计的精度。当前研究中,协作感知领域仍存在诸多亟待深入探讨的问题。特别是在低空智联网应用场景下,以下关键问题尚未得到充分解决:首先,在感知功能的立体覆盖实现方面缺乏系统性研究;其次,对于站点间干扰的定性描述与定量分析尚未建立完善的评估体系;再次,在优化资源分配等关键领域的研究深度不足。尤为重要的是,目前仍缺乏能够普适性地描述和刻画协作感知节点间复杂协作关系的数学模型,这极大地制约了该领域的理论发展和实践应用。

针对现有研究的局限性,本研究提出了一种面向通信感知一体化的网络立体覆盖模型与方法。首先,以主动天线单元(AAU)作为感知的最小调控单元(即感知节点),给出了其覆盖空间、合作和干扰的数学描述。其次,构建了一个有向图(DG)模型,将多个节点之间的收发(T-R)关系表示为图中的有向边,从而有效地描绘了随资源分配(RA)变化而变化的节点间的协作与干扰关系。再次,基于DG模型,提出了一个RA优化问题,通过求解该问题,可以在满

足立体式覆盖需求和感知BS间干扰约束的情况下,最小化ISAC系统的成本。通过理论分析和实验证据,证实了本文方法的可行性和有效性,为网络化通信感知一体化的应用提供了理论参考。

1 单/双节点模型

1.1 单节点单程覆盖模型

考虑到在通信系统中,每个AAU可以独立配置其使用的资源和功率,因此本文中我们将每个AAU视为独立的ISAC节点。定义三维空间中的点集为 \mathcal{P} ,其每个点 $\mathbf{p} \in \mathcal{P}$ 具有坐标 $[x, y, z]^T$ 。在此空间中,有 N 个节点,它们分别位于 $\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \dots, \mathbf{q}_N$ 。为了描述复杂的地物环境对感知信号的影响,定义一个环境密度函数 $\Omega(\mathbf{p})$,以表示位于 \mathbf{p} 处的光线损耗率,函数取值在 $0 \sim 1$ 。这样,从第 n 个感知节点到 \mathbf{p} 处的能量可由公式(1)计算:

$$A_n(\mathbf{p}) = \beta_n(\mathbf{p}) \prod_{\kappa \in \vartheta(\mathbf{p}, \mathbf{q}_n)} \Omega(\mathbf{p}) \quad (1)$$

其中, $\vartheta(\mathbf{p}, \mathbf{q}_n)$ 是从 \mathbf{p} 到 \mathbf{q}_n 的直线, $\beta_n(\cdot)$ 是由于路径损耗导致的信号强度变化的比例系数:

$$\beta_n(\mathbf{p}) \propto \frac{\beta_n^0}{\|\mathbf{p} - \mathbf{q}_n\|_2^2} \quad (2)$$

其中, $\beta_n^0 > 0$ 是第 n 个天线的最大发射增益, $\|\cdot\|_2$ 是向量的 l_2 范数。在公式(1)中当 $A_n(\mathbf{p}) > 0$ 时,表示点 \mathbf{p} 和第 n 个节点之间存在视距(LOS)路径。一般地,环境中的建筑物等物体的透射率几乎为0,如此,处于站点和建筑物连线后的区域将成为阴影区,无法被单个基站的感知信号照射到。

目前,ISAC系统一般使用全双工的AAU,其波束覆盖范围限制在其主瓣范围内,AAU感知范围的空间函数为:

$$B_n(\mathbf{p}) = \begin{cases} 1 & \mathbf{p} \in \text{主瓣内} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

综上所述,考虑到传播损耗特性和感知范围的空间特性,第 n 个节点的单程感知覆盖区域可用集合的形式描述为:

$$\mathcal{J}_n = \left\{ \begin{array}{l} r_{\min} \leq \|\mathbf{p} - \mathbf{q}_n\|_2 \leq r_{\max} \\ A_n(\mathbf{p}) \cdot B_n(\mathbf{p}) > 0 \end{array} \right\} \quad (4)$$

其中, r_{\min} 代表系统的近场盲区,与双工ISAC的抗自干扰能力有关^[4]; r_{\max} 代表最大预定义距离,与需要感知的能力有

关, 例如, 在低空监视场景中, 若需要监管的无人机雷达散射截面 (RCS) 为 0.01 m^2 , r_{\max} 可设置为 $900\sim 1\,000 \text{ m}$ 。

1.2 双节点作用模型

本文中, 我们考虑的是一个协作感知系统, 其中的节点存在相互合作或相互干扰的一些情况。对于空间中的一个点 p , 如果其同时受到任意两个节点的影响, 那么该节点必须同时位于这两个站点的覆盖区域内, 并且到它们的距离之和必须小于 $2r_{\max}$ 。这样的话, 第 n 个基站和第 n' 个节点 (n 和 n' 可以是相同的) 的协作/干扰空间, 可用集合的数学形式描述为:

$$\mathcal{H}_n = \left\{ \begin{array}{l} 2r_{\min} \leq \|p - q_n\|_2 + \|p - q_{n'}\|_2 \leq 2r_{\max} \\ A_n(p) \cdot B_{n'}(p) > 0; A_{n'}(p) \cdot B_n(p) > 0 \end{array} \right\} \quad (5)$$

1.3 通感基站的工作模式

目前, 为了实现 ISAC 系统的组网, 我们需要设计多种候选感知资源。这些资源可复用移动信号处理中常用的技术, 如频率分集、时间分集、多普勒分集, 以及最近业界提出的波形分集。利用现有的信号处理方法对这些感知信号进行处理时, 我们可认为这些候选感知资源之间的干扰是忽略不计的, 且通信与感知之间的干扰可有效地消除^[5,17]。进一步地, 在网络化协作感知的系统中, ISAC 节点存在如下 3 种工作模式:

1) 发射, 节点从候选资源池中选择一种感知信号, 并将其发射出去。

2) 接收, 节点接收感知信号并对其覆盖区域内目标的位置进行解算。

3) 离线, 节点不参与协作感知。

图 1 是多个节点之间的协作/干扰关系示意图, 同一站点下的 ISAC 感知节点可以独立地在上述 3 种模式下运行。在图 1 中, 节点 1 和节点 5 分别发送资源 1 和资源 2, 而节点 8 接收并处理来自节点 1 和节点 5 的感知信号。此时, 如果节点 1 和节点 5 使用相同的资源, 节点 8 可能会遇到干扰, 因此无法准确地解算出目标的位置。从上述的例子可知, 为了优化 ISAC 系统性能, 节点的工作模式、所发射/接收的资源, 以及发射节点的功率必须进行联合优化。

2 ISAC 节点关系的图模型

为了有效地描述网络化协作感知的复杂干扰和合作关系, 本节中我们提出一种 DG 模型及一种资源优化的方法。

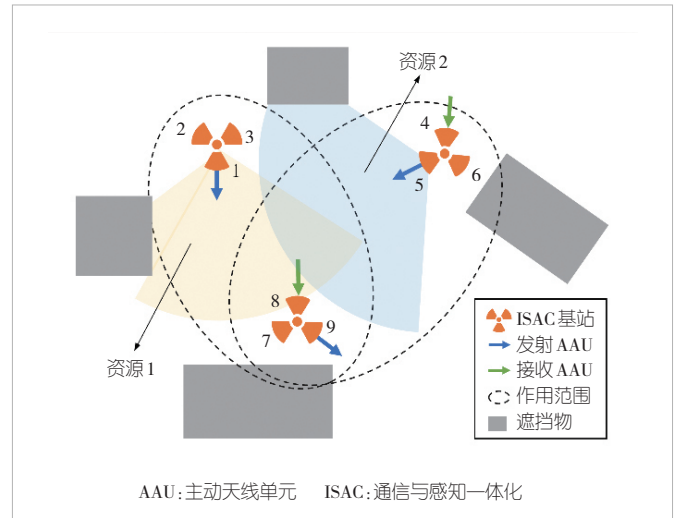


图1 多节点间的协作/干扰关系

2.1 DG 模型

对于一个协作感知 ISAC 网络, 令 \mathcal{V} 代表其所有节点构成的集合。考虑到所有节点将在 3 种工作模式之间切换, 按照二分图的思想, \mathcal{V} 可以进一步复制成两个虚拟集, 即发射集 (\mathcal{V}_p) 和接收集 (\mathcal{V}_q)。此时, \mathcal{V}_p 中的顶点仅连接到 \mathcal{V}_q 中的顶点, 而同一虚拟集中的顶点之间没有连接。这描述了信号只能由发射节点到接收节点这一物理限制。这样的话, 若两个节点之间存在 T-R 关系, 则它们将相连; 否则, 则不存在连接。这种 ISAC 系统中存在的收发关系, 可以使用有向图来描述。在本文中, 用于描述图中连接关系的连接矩阵 $G \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 定义为:

$$G_{n,n'} = \begin{cases} 1 & n \text{ 发射, } n' \text{ 节点接收} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

图 2 为有向图的构建和资源优化的过程。虚拟节点集抽象地描述了 T-R 协作的特征, 即对于协作的 T-R 节点, 感知信号从发射节点发出, 由接收节点来接收和处理。这一有向的关系, 可利用非对称性的有向图邻接矩阵 G 来描述。 G 的每一行代表节点作为发射节点时与协作节点的 T-R 关系, 而每一列代表节点作为接收节点时与协作节点的 T-R 关系。如此, 协作式 ISAC 资源分配的问题就转化为一个有向图的构建问题。该有向图会进一步转化为 ISAC 系统中的多节点资源分配方案。

此外, 如果一个节点仅作为接收节点, 它必不会作为发射节点。此时, 该节点所在行元素的和为 0。此外, 接收节点所能连接的发射节点数必小于资源池中资源的数量 M ; 否则, 接收端将会受到多站信号的干扰, 无法从信号中解算目标的位置。因此, 可进一步引入对 G 的一组约束:

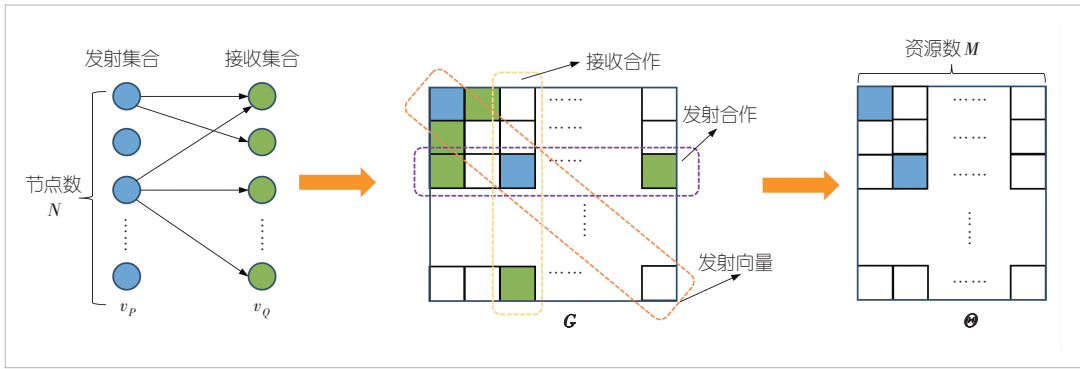


图2 有向图的构建和对应的资源优化过程

考虑到在目标的探测过程中，信号传播是一个双程过程，即感知信号先照射到目标，随后目标又将感知信号反射回接收端^[1]。因此，最终目标接收到的信号损耗应为发射损耗和接收信号损耗的乘积。令场景中所需检测的目标

$$\begin{aligned} \sum_{n'=1}^N G_{n,n'} &\leq NG_{n,n} \\ \sum_{n=1}^N G_{n,n'} &\leq M \end{aligned} \quad (7)$$

进一步地，基站一般采用离散形式来控制站点的发射功率。因此本文中，我们假设所有节点具有 L 级功率控制，并定义一个额外的功率向量 $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ ，其元素 $w_n = \{1, 2, \dots, L\}$ 代表第 n 个节点的发射功率的级别。

2.2 网络化协同感知的关键指标

为了优化资源分配，我们需要在上述图模型的基础上，进一步定义 ISAC 系统的性能指标。第一个性能度量是系统的成本。一般地，现有的通信系统中，ISAC 节点的覆盖范围、服务用户数量等相互独立，因此我们可假设不同节点的资源成本是相互独立的，那么感知系统的总成本可以表示为：

$$\Lambda(\mathbf{G}, \mathbf{w}) = \sum_{n=1}^N w_n \sum_{n'=1}^N C_{n,n'} \cdot G_{n,n'} = \langle \mathbf{C}, [\mathbf{G} \odot (\mathbf{w} \circ \mathbf{1}_N^T)] \rangle \quad (8),$$

其中， $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 是资源的成本矩阵，运算符 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示矩阵/张量的爱因斯坦积，运算符 \circ 和 \odot 分别代表向量的外积和矩阵/张量的按元素点积； $\mathbf{1}_N$ 表示大小为 $N \times 1$ 的全1向量。 \mathbf{C} 对角线上的值明显大于非对角线上的值，这是因为发射感知信号涉及能量消耗、空中接口资源开销、对通信业务的影响等问题。公式 (8) 表明，发射能量越大，对能量的消耗和对系统的影响越大，因此成本也越高。

接下来，为了描述通感网络的性能，我们引入描述感知性能的度量。为了减少计算负荷，我们将空间离散化为 I 个离散空间网格。令第 n 个节点的覆盖向量为 $\mathbf{j}_n \in \mathbb{R}^{I \times 1}$ ，其中第 i 个元素可以表示为：

$$j_{n,i} = \begin{cases} 1 & p_i \in \mathcal{J}_n \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

RCS 归一化为 1，并对发射的能量进行归一化。那么，令第 n 和 n' 节点相互合作/干扰区域内接收到的能量的向量为 $\mathbf{h}_{n,n'}$ ，其第 i 个元素则为：

$$h_{n,n',i} = \begin{cases} \frac{\beta_n(\mathbf{p}_i) \cdot \beta_{n'}(\mathbf{p}_i)}{L^2} & p_i \in \mathcal{H}_{n,n'} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

在实际应用中，ISAC 服务的使用方更重视其在关键空间 (KS) 中对目标的检测和定位能力。这些 KS 包括但不限于办公楼宇、园区仓库等，对感知和覆盖有着硬性要求。参考公式 (9) 中基站覆盖向量的定义，我们可定义关键区域 (KA) 向量：

$$k_{n,i} = \begin{cases} 1 & p_i \in \text{KS} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

每一对 T-R 对都独立地对数据进行处理，并由此解算目标的位置。多个节点之间相互独立，因此多个节点对于空间中某处的感知能力，是多个 T-R 对的叠加。例如，在空间中的某处，若一个 T-R 能达到目标检测、定位的需求，则只需要一个节点进行协同覆盖；反之，则需要多个节点。由上述分析可知，ISAC 系统在全空间的总覆盖能力就是多个 T-R 对的组合，这样覆盖能力的向量 $\xi \in \mathbb{R}^{I \times 1}$ 可以描述为：

$$\xi = \sum_{n=1}^N w_n \sum_{n'=1}^N \mathbf{h}_{n,n'} \cdot G_{n,n'} \quad (12)$$

ISAC 多站协同组网感知系统与传统组网雷达的核心区别在于：在基站数量庞大且感知资源有限的情况下，系统需要规避 T-R 对之间的干扰。这种干扰会显著降低 ISAC 系统的服务性能，导致虚警、误报和漏检等问题。由图 1 可知，当两个发射节点的覆盖区域存在重叠且使用相同的资源时，就会产生干扰。因此，两站之间的干扰可定义为站点重叠区域干扰的总和。在干扰矩阵 $\mathbf{D} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ 中，描述第 n 和 n' 节点

之间可能存在的干扰元素可表示为:

$$D_{n,n'} = \begin{cases} 1 & \text{if } 1_l^T(\mathbf{h}_{n,n'} \odot \mathbf{k}) > \gamma L^2 \ \& \ n \neq n' \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13),$$

其中, $\gamma > 0$ 是干扰水平的阈值。基于上述干扰矩阵, ISAC 系统的干扰水平 (IL) 可定义为, 整个 ISAC 系统中所有发射节点的干扰的和, 其计算方式为:

$$Y(\mathbf{G}) = \sum_{n=1}^N \sum_{n' \neq n}^N G_{n,n} D_{n,n'} G_{n',n'} \quad (14).$$

考虑这样一种情况, 当两个发射站存在覆盖区域 (即合作/互扰集合非空时) 时, 就必须采用不同的资源来避让干扰。由第 1.3 节中的分析可知, 基于现有感知资源分集理论设计的资源池中, 不同资源之间的影响可以完全消除。然而, 资源池中资源的数量是有限的, 因此发射站点的冲突最多可以避让 M 次。因此, 整个 ISAC 系统的 IL 的值必小于 M , 即:

$$Y(\mathbf{G}) \leq M \quad (15).$$

ISAC 系统的性能受有向图结构的影响而动态变化。因此, ISAC 资源优化的目标在于联合优化有向图邻接矩阵 \mathbf{G} 和发射权重 \mathbf{w} , 在确保系统满足 KS 覆盖要求和干扰水平约束的前提下, 实现系统构建成本的最小化。这样, 资源分配的优化问题可以表述为:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{G}, \mathbf{w}} \quad & \Lambda(\mathbf{G}, \mathbf{w}) + \lambda \mathbf{1}_l^T \boldsymbol{\sigma} \\ \text{s.t.} \quad & \xi \geq \tilde{\boldsymbol{\mu}} - \boldsymbol{\sigma} \\ & Y(\mathbf{G}) \leq M \\ & \mathbf{G} \mathbf{1}_N \leq N \cdot \text{diag}(\mathbf{G}) \\ & \mathbf{1}_N^T \mathbf{G} \leq M \\ & \sigma_i > 0 \quad i \in [1, l] \\ & w_n \in \{1, 2, \dots, L\} \quad n \in [1, N] \\ & G_{n,n'} \in \{0, 1\} \quad n \in [1, N] \quad n' \in [1, N] \end{aligned} \quad (16),$$

其中, $\tilde{\boldsymbol{\mu}} \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ 表示空间覆盖水平 (CL) 的向量, 例如, 在 KS 区域内, 覆盖能力需求可设为一个常数 μ_0 , 而在 KS 区域外, 覆盖能力需求值为 0。diag(\cdot) 表示取矩阵的对角线元素的操作。 $\boldsymbol{\sigma} \in \mathbb{R}^{l \times 1}$ 表示的是一个辅助松弛变量, $\lambda > 0$ 表示权重。引入该变量是为了应对实际场景中多站区域普遍存在的遮挡问题, 从而增强优化模型的鲁棒性。对于那些现有 ISAC 基站无法覆盖的部分, 可考虑引入新的 ISAC 站点或是其他低空监测手段进行补盲。

2.3 资源配置策略

值得注意的是, 公式 (16) 主要针对有向图中 T-R 的配

置关系进行优化, 并未直接涉及资源分配结果的优化。根据图 2 所示的流程图, 需将邻接矩阵 \mathbf{G} 转换为系统可直接使用的资源分配结果。假设 $\boldsymbol{\Theta} = [\boldsymbol{\theta}_1, \boldsymbol{\theta}_2, \dots, \boldsymbol{\theta}_M] \in \mathbb{R}^{N \times M}$ 代表发射节点资源分配的矩阵, $\boldsymbol{\theta}_m \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ 是第 m 个资源的分配状况。若 $\Theta_{n,m}$ 为 1, 则表示第 n 个节点正在使用第 m 个资源; 否则, 意味着节点没有使用该资源。感知资源分配的原则是: 让每种资源下的干扰都为 0, 且期望 ISAC 中所使用的资源的种类最少。这样可以通过引入辅助变量 $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^{M \times 1}$, 将最终的资源分配问题表述为:

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{\Theta}} \quad & \mathbf{1}_M^T \mathbf{z} \\ \text{s.t.} \quad & \boldsymbol{\theta}_m^T \mathbf{D} \boldsymbol{\theta}_m = 0 \\ & \mathbf{1}_N^T \boldsymbol{\theta}_m \leq Nz \\ & z_m \in \{0, 1\}, \quad m \in [1, M] \\ & \Theta_{n,m} \in \{0, 1\}, \quad m \in [1, M] \quad n \in [1, N] \end{aligned} \quad (17).$$

除了直接优化上述问题外, 还可以使用迭代的方法进行资源分配, 如算法 1 所示。由于公式 (7) 中的 IL 约束, 无论是基于优化的方法还是基于上述方法, 都能确保存在可行解。

算法 1 基于迭代的 DG 图资源配给算法

输入: 资源数 M , 有向邻接矩阵 \mathbf{G}

输出: 资源分配矩阵 $\boldsymbol{\Theta}$

初始化 $\boldsymbol{\Theta} = \mathbf{0}_{N \times M}$

For $n = 1 : N$ do

If $G_{n,n'} = 1$ Then

For $m = 1 : M$ Do

$\hat{\boldsymbol{\Theta}} \leftarrow \boldsymbol{\Theta}$

$\hat{\Theta}_{n,m} = 1$

If $\hat{\boldsymbol{\theta}}_m^T \mathbf{D} \hat{\boldsymbol{\theta}}_m = 0$ Then

$\boldsymbol{\Theta} \leftarrow \hat{\boldsymbol{\Theta}}$

Break

End

End

End

3 数值仿真与产业落地

本节通过仿真实验, 验证了所提方法可有效解决低空智能网络应用中的协作通信感知立体覆盖问题。为了便于描述参数设置, 除非另有说明, 否则所有网格点在 KS 中都遵循相同的 CL 要求。本文中我们所建立仿真环境的配置如下:

1) 城市环境: 基于文献[18]中城市仿真方法, 构建随

机生成的三维城市环境模型。区域大小为1 500 m × 1 500 m，区域高度在30 m ~ 100 m，网格点大小为1。建筑物占用率 α 设为0.25，高度因子为25。

2) 基站配置：根据实际通信系统的配置，一个通信站将3个AAU作为一组，固定安装在同一根机械抱杆上，每个AAU在方位角上彼此相隔120°。这些抱杆会随机分布在建筑物顶部，为降低通信系统中的干扰，抱杆之间的距离不会小于最小距离 d_0 。其余参数如表1所示。

3) KS设置：本文定义KS由若干个不重叠的立方体组成，且立方体的高度与整个仿真区域相同。KS在地面区域的投影为KA。

本文所提的仿真忽略了树木、路灯等较小尺寸遮挡物可能带来的额外效应。

3.1 方法验证

图3 (a) 是随机生成建筑物的三维视图；图3 (b) 显示了所产生的地面环境的俯视图、BS的分布和KA位置。其中绿色点表示BS的位置，红色矩形区域表示关键区域的子

表1 仿真参数

参数	值
资源数 M	6
抱杆间最小距离 d_0/m	350
主瓣俯仰角范围/(°)	-10~45
主瓣方位角范围/(°)	-60~60
r_{\min}/m	30
r_{\max}/m	800
抱杆高度/m	5
干扰阈值 γ	10^{-2}
最大单位幅度	2.5×10^5
功率等级数	5

区域；图3 (c) 展示了描述ISAC节点之间干扰关系的矩阵。

为了直观显示KS区域的覆盖性能，对于KA中的2D点 (x, y) ，其投影值可表示为：

$$\text{Proj}(x, y) = \frac{\int \rho(x, y, z) dz}{\int [1 - \Omega(x, y, z)] dz} \quad (18),$$

其中， $\rho(\cdot)$ 是将点的覆盖状态转换的函数。如果点的CL大于或等于其覆盖要求，则其值为1，否则为0。在上述基础上，可将覆盖比率 (CR) 定义为：

$$\text{CR} = \frac{1}{I} \sum_{[x,y] \in KA} \text{Proj}(x, y) \quad (19).$$

作为对比，我们还考虑了3种基线方案：

1) 随机方案 (Random) 执行发射和接收节点随机的选择，然后对这些发射节点进行随机资源分配。

2) 贪婪方案 (Greedy) 根据KS的覆盖进行贪婪的资源分配，确保每种资源下的干扰均为0，系统的 $IL \leq M$ 。

3) 纯粹自发自收 (PS) 方案，该方案仅考虑所有节点均为自发自收的情况，随后运用本文所提出的方法，对其进行优化与资源分配。

图4 (a) —图4 (d) 依次呈现了随机算法、贪婪算法、PS模式以及本文所提出DG算法的空间覆盖能力的二维映射。在面向低空智能网的无人机监视场景仿真设定中，KS内的CL要求 $\mu_0=2$ ，在关键区域之外，CL等级要求设定为0。节点成本从区间为[1,10]的均匀分布中随机采样。为确保对比的公平性，上述各算法在运行过程中均采用了相同的成本矩阵。从图4 (a) 可以看出，虽然随机方案的CR较高，但其无法满足KS中的IL性能约束，导致感知能力无法得到有效保障。贪婪算法的优化仿真结果如图4 (b) 所示。经观

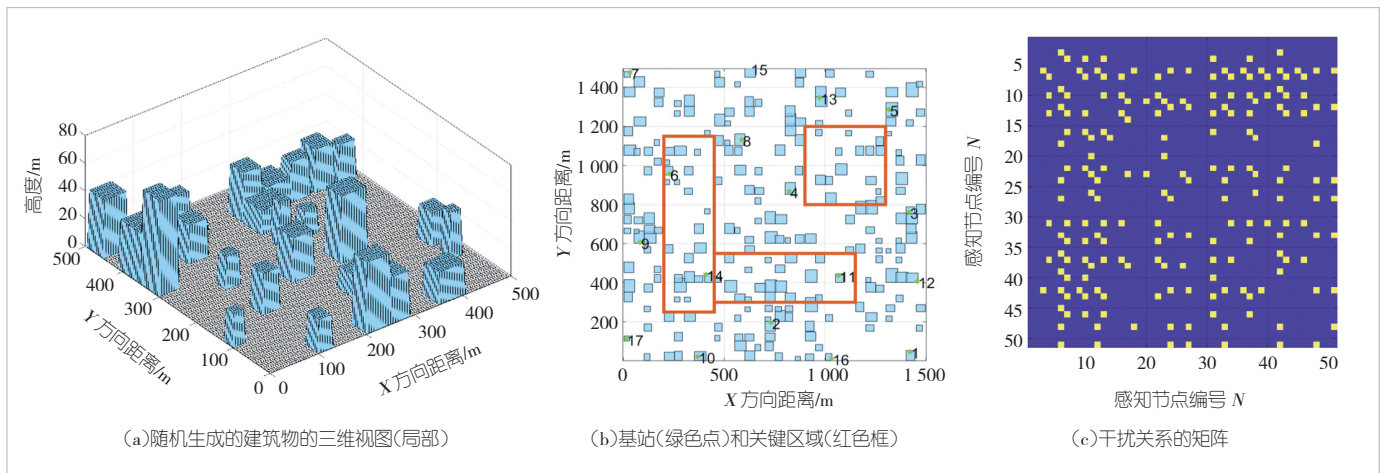


图3 仿真环境

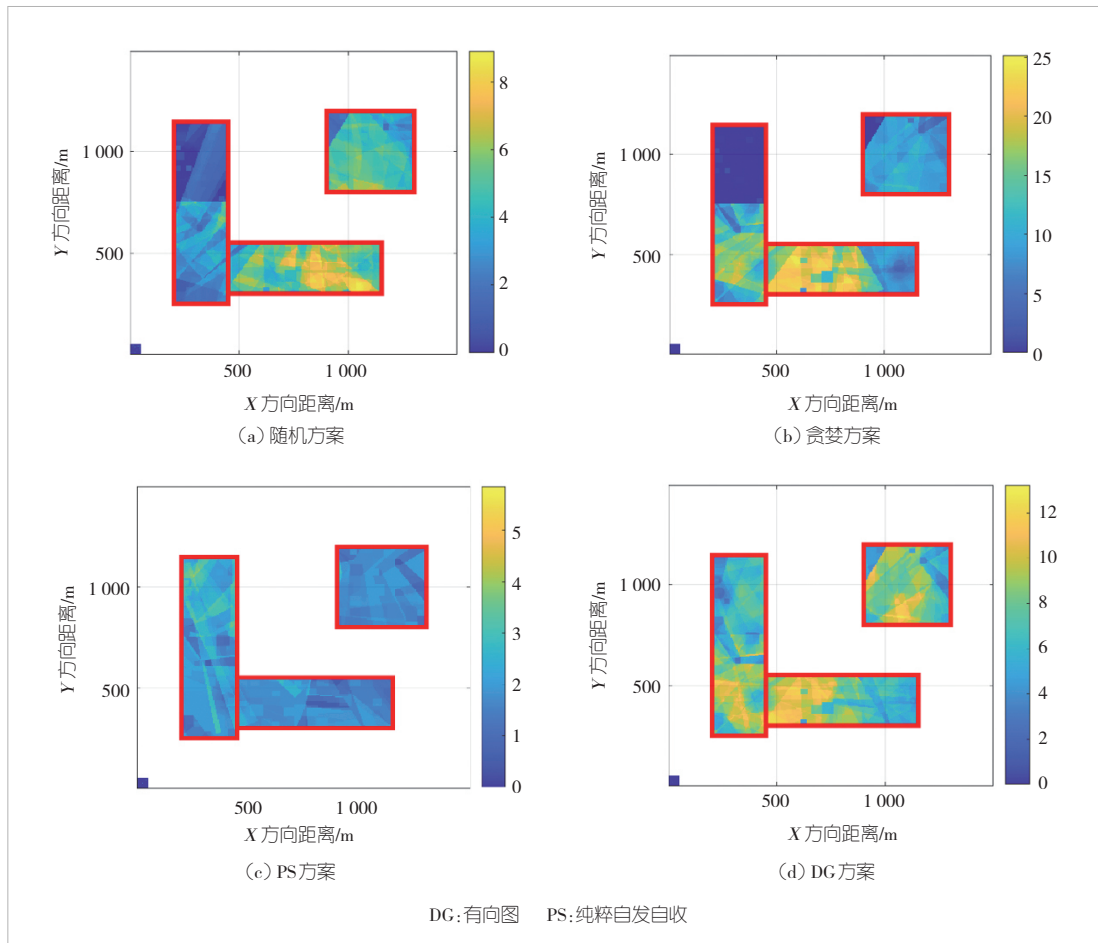


图4 不同方法的覆盖率结果比较

察发现，贪婪算法能够很好地满足IL约束条件，然而其CR却处于较低水平。

图4 (c) 展示了PS模式下的覆盖情况。该模式未采用收发节点间的协作机制，在给定的IL约束条件下，难以实现较高的覆盖水平。从物理机制来看，由于只有部分目标的反射能量能够被发射节点接收，因此在远离发射基站的区域，难以在满足发射功率约束的同时实现有效覆盖。图4 (d) 为所提出的DG方法得到的结果。可以看到，所提出的优化方法在满足KS区域干扰约束的同时，以最小成本实现了较高的覆盖率。这一优势主要得益于DG方法能够有效整合ISAC系统中的接收节点资源，从而显著提升了协同感知系统的性能。表2详细对比了在不同CL要求下，各类方法的覆盖率、干扰水平等关键指标。实验结果表明，与其他方法相比，所提出的DG方法在满足多样化覆盖需求方面展现出最优的成本效益和部署效率。

在图5中，我们清晰地看到了PS和DG方案下资源分配的具体结果。可以发现，PS模式想要达到所需的覆盖水平，

需要动用更多的发射BS。不仅如此，它还将所有可用资源消耗殆尽，这无疑极大地限制了在更大应用区域进行灵活资源调度的可能性。与之形成鲜明对比的是，本文所提出的方法，即便在资源有限的情况下，依然能够出色地实现高质量的立体式覆盖。

3.2 参数影响

在本小节，我们深入探讨了不同资源数量 M 与CL要求 μ_0 所产生的影响。为了检验这些参数的影响，我们执行了蒙特卡洛仿真。在此次仿真过程中，KA区域是随机生成的，且每个区域都包含3个子

区域，但总的面积维持在预设水平。针对每一个独特的参数组合，执行100次蒙特卡洛仿真，同时确保性能要求与系统参数和第3.1节中的设定保持一致。图6展示了在不同KA比例（即KA区域的面积和整个仿真区域面积的比值）下，CR与CL要求之间的关系。由图6可知，在所有情形下，随着

表2 不同覆盖需求下的仿真结果

$\mu_0=1$			
	随机方案	贪婪方案	纯粹有向图
CR	0.93	0.50	0.95
IL	253.46	0	0
Cost	453	150	35
$\mu_0=2$			
	随机方案	贪婪方案	纯粹有向图
CR	0.92	0.71	0.93
IL	314.23	0	0
Cost	807	288	72

CR: 覆盖比 IL: 干扰水平 μ : 覆盖能力需求

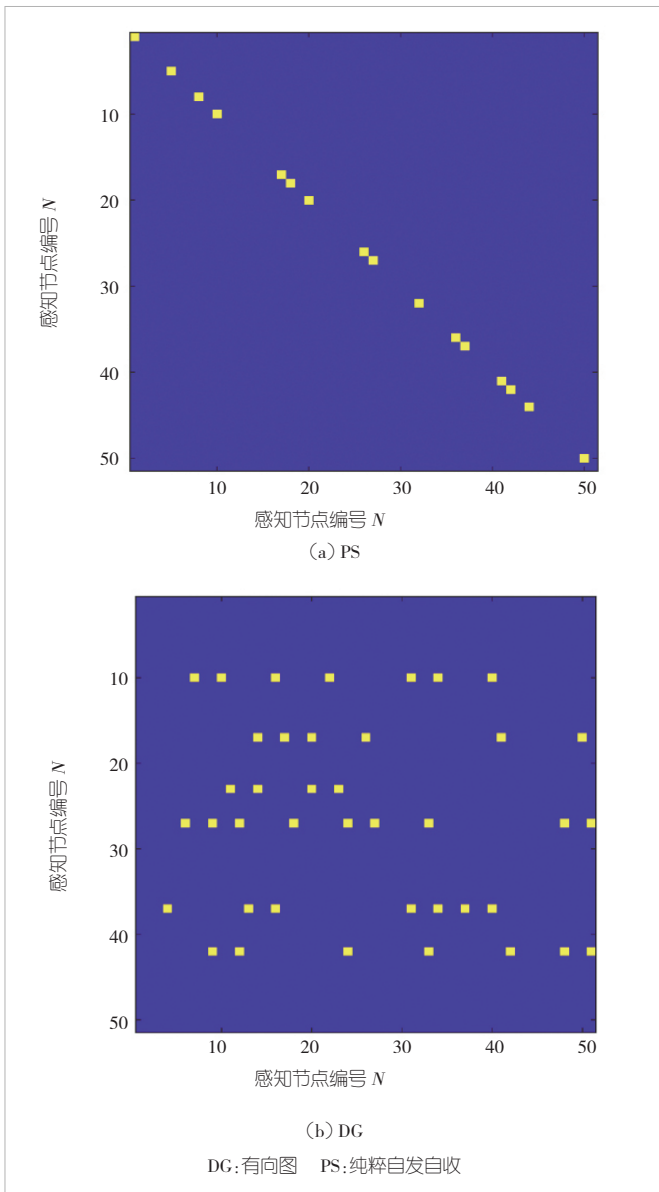


图5 不同方法邻接矩阵的比较

资源数量 M 逐渐增加, CR 也随之改善。然而, 当 M 超过特定阈值后, CR 的增益极为有限。这意味着, 尽管增加可用资源是满足 CL 要求的必要条件, 但由于环境因素的制约, 过量投入资源所带来的回报存在上限。此外, 对不同 KA 比率的结果进行比较后发现, 随着 KA 面积的扩大, 性能会出现一定程度的下滑。这是因为要满足在更大覆盖区域内的覆盖要求, 面临的挑战更为艰巨。

3.3 环境作用

广泛且多元的应用场景对感知能力有着不同的需求。为了全面满足这些需求, ISAC 系统将部署在各类环境中, 包括城市区域、水面监测场景以及低空交通环境。这些环境的

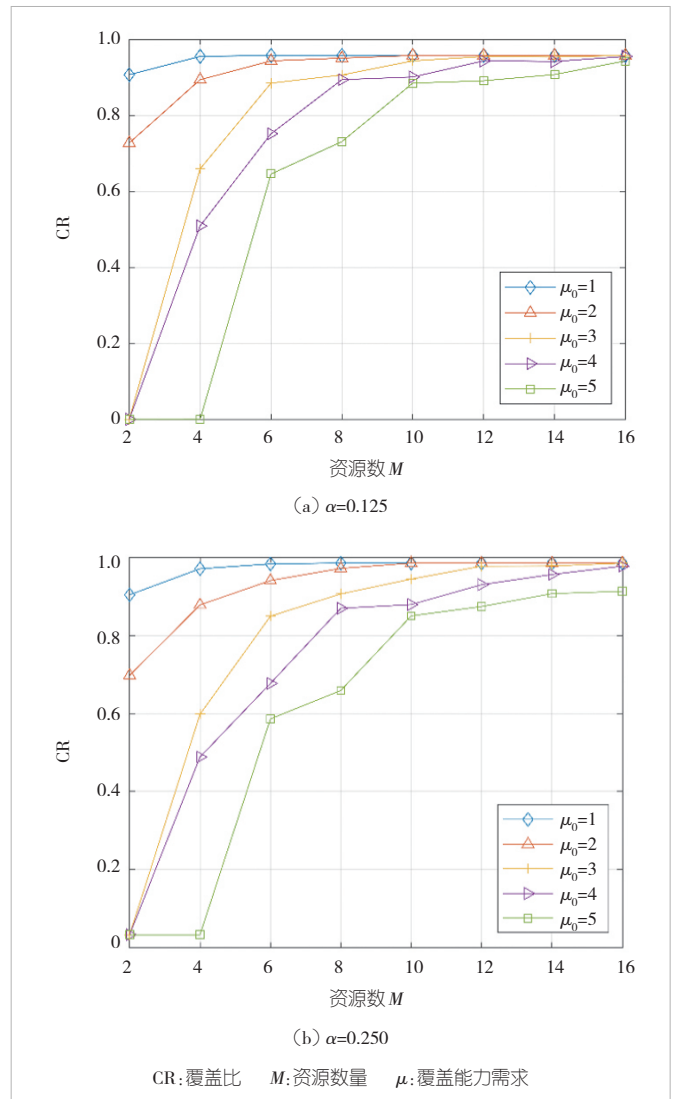


图6 不同建筑覆盖率下, 资源和覆盖率的关系

建筑密度各有不同, 从而导致不同的 LOS 覆盖条件。在本章节中, 为深入探究所提出的 DG 方法在多元环境下的适应能力, 参照过往研究思路, 我们选取了 3 种具有代表性的仿真设置, 分别为郊区、城市以及高密度城市环境^[18]。针对这 3 种设置所选用的各项参数, 已详细罗列于表 3 中。在本小节的研究里, 我们设定 $M=6$ 且 KS 内的 $\mu_0=2$ 。需要着重指出的是, 不同环境参数致使基站密度存在差异, 进而造成基站数量各不相同。因此, 为确保比较过程的公平性与客观性, 假定所有基站的成本均统一设定为 1。

图 7 清晰地展示了在不同的环境配置下、各异的环境条件下, 随着 r_{\max} 取值的不同, CR 相应的变化趋势。 r_{\max} 与节点的发射功率紧密相关, 在本实验中, 其计算方式依据表 1 所提供的数值, 通过对节点最大发射功率进行线性缩放得以

表3 城市环境参数

环境	郊区	城市	密集城区
占用比率	0.15	0.25	0.45
高度参数 γ	15	20	25
BS距离 d_0/m	500	350	250

BS:基站

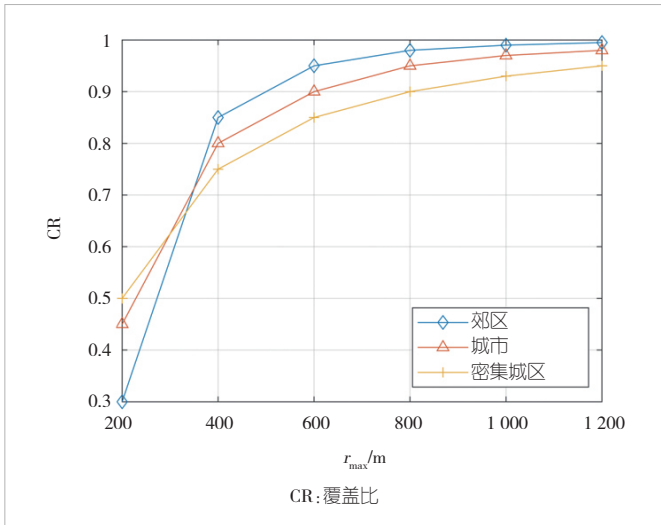


图7 不同距离下覆盖率的变化

确定。通过观察我们发现，在所有实验场景中，CR的覆盖性能均呈现出随着 r_{max} 增大而逐步改善的趋势。这背后的原理在于，单个节点的覆盖能力越强，对节点间合作的依赖程度就越低，进而更易于满足IL约束。然而，需要注意的是，由于受到实际硬件性能以及环境辐射条件的限制，单节点的覆盖范围无法无限制地扩展。

3.4 产业应用

本文提出的算法，已成功应用于本单位低空5G-A通感

一体监管的产业实践。在这一实际案例中，运用本文算法对节点资源分配进行优化，实现了园区上空关键区域的立体式全面覆盖，有效提升了监管效能与覆盖质量。

图8为本单位园区及其周边环境。本研究区域为典型的半城市环境，地势平坦，空间结构复杂多样。所研究区域周边分布着高层居民住宅区、湿地公园、教育机构及高速公路等多种土地利用类型，形成了独特的半城市化景观特征。为打造应用标杆试点，前期本单位开展了详尽的勘测工作，为园区及其周边环境构建了三维地图。该地图以网格数据的形式，存储于单位自主研发的平台数据库中，以便后续更高效地利用与分析。

基于园区整体规划和供电等要素考量，拟在楼顶设置3个不同站址的4.9 GHz通信感知一体化基站。每个基站配备3个4.9 GHz大张角通感一体化AAU，其基本性能参数如表1所示。在构建标杆应用时，需根据相关规范对反射截面积为 $0.01 m^2$ 的无人机（如大疆御3）进行探测与稳定跟踪。因此，本文将发现概率为0.8时的能量值作为归一化的单位覆盖数值。

如图9 (a) 所示，在园区附近的站点分布中，1—3号

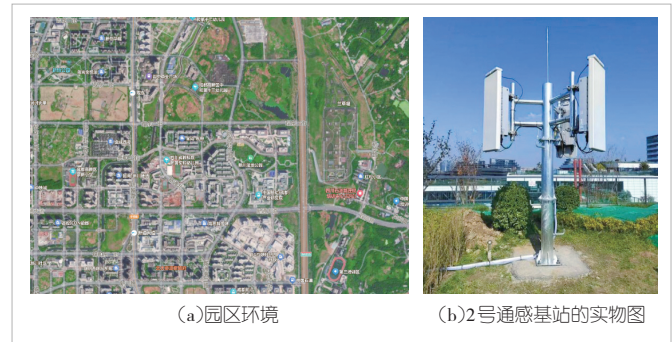


图8 园区环境和主动天线单元的实际部署图

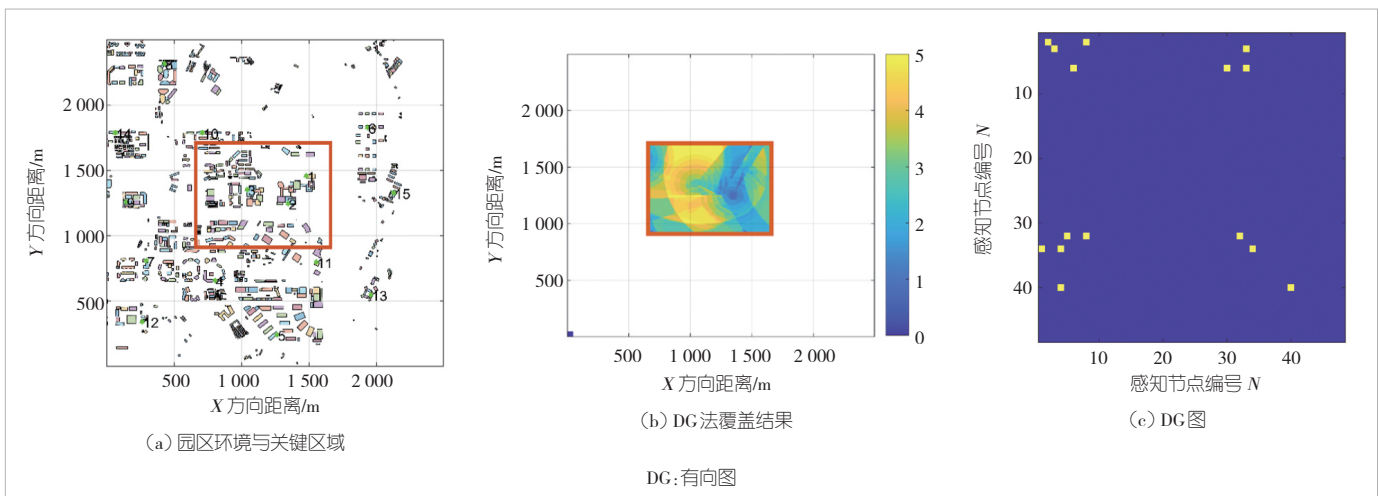


图9 园区单层防区通信感知一体化(ISAC)立体化覆盖的设计结果

基站为新建抱杆，其余的抱杆为仿真生成，最小的间距为400 m，其他设置与实验3.1一致。在低空监视场景中，仿真的CL要求 $\mu_0=1$ ，节点成本在[1,10]范围内均匀分布。由于本文算法在建模阶段对ISAC节点进行了高度抽象，实际应用时仅需根据3D地图、站点部署位置及天线安装方位，重新计算单站覆盖范围即可。

图9 (b) 展示了本文提出的DG法的二维映射结果。该方法实现了对目标区域的高效覆盖，覆盖率达0.98，且无任何干扰（干扰水平为0）。图9 (c) 呈现了算法有向图邻接矩阵的分布情况。基于优化后的有向图，采用2.4节所述方法即可完成资源分配。如图10所示，该图为部署完成后某次飞行测试中5G-A通感一体设备的测试结果，从图中可以清晰地观察到园区上空目标被稳定地探测和追踪。

未来园区周边将规划多层防护体系。如图11所示，除KS外，外围将设置警戒区域（即图中红蓝框之间的环形区域）。KS区域的CL需求值 $\mu_0=2$ ，警戒区域 $\mu_0=1$ ，其他区域 $\mu_0=0$ 。

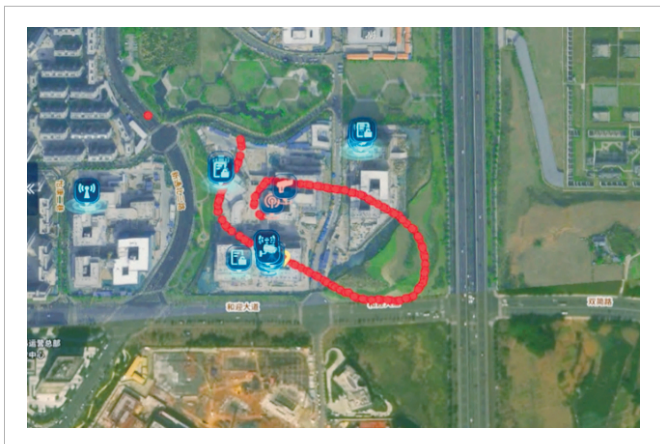


图10 园区无人机探测能力实测示意图

基于本文提出的资源优化方法，图11 (a) 展示了优化后的覆盖效果，图11 (b) 则呈现了相应的有向图结果。

研究表明，本文提出的方法能够有效支持大规模多层防区设计。该方法不仅在仿真测试中表现优异，在实际产业应用中也展现出良好的通信感知一体化性能，可实现立体式全覆盖，为低空经济的安全发展提供可靠的技术保障。

4 结束语

在低空经济这一新兴领域，通信感知一体化技术展现出巨大的应用潜力。然而，当前研究仍存在显著空白，特别是在网络化通信感知一体化系统的协同感知方面，其立体覆盖分析、性能评估及资源分配等关键问题尚未得到充分探索和解决。针对上述问题，本文提出了一种新型的DG模型，用于分析和优化ISAC系统中的资源分配。首先，我们引入了一种考虑环境约束和协作特性的感知节点覆盖描述方法。基于这一描述，我们将多个节点间的T-R关系建模为图中随资源分配动态变化的有向边。最终，基于该模型，我们构建了一个RA优化问题。通过求解该问题，能够在满足立体覆盖需求和干扰约束的条件下，以最小成本实现ISAC的立体覆盖。仿真结果表明，该方法在网络化通信感知一体化的立体覆盖分析与系统资源优化方面具有显著效果，为相关实践提供了理论依据。后续研究可着重考察本方法在复杂动态场景下的泛化能力与适应性，以进一步提升模型的实用价值与鲁棒性。

参考文献

- [1] LIU G Y, XI R Y, HAN Z X, et al. Cooperative sensing for 6G mobile cellular networks: Feasibility, performance, and field trial [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2024, 42 (10): 2863 - 2876. DOI: 10.1109/jsac.2024.3414596

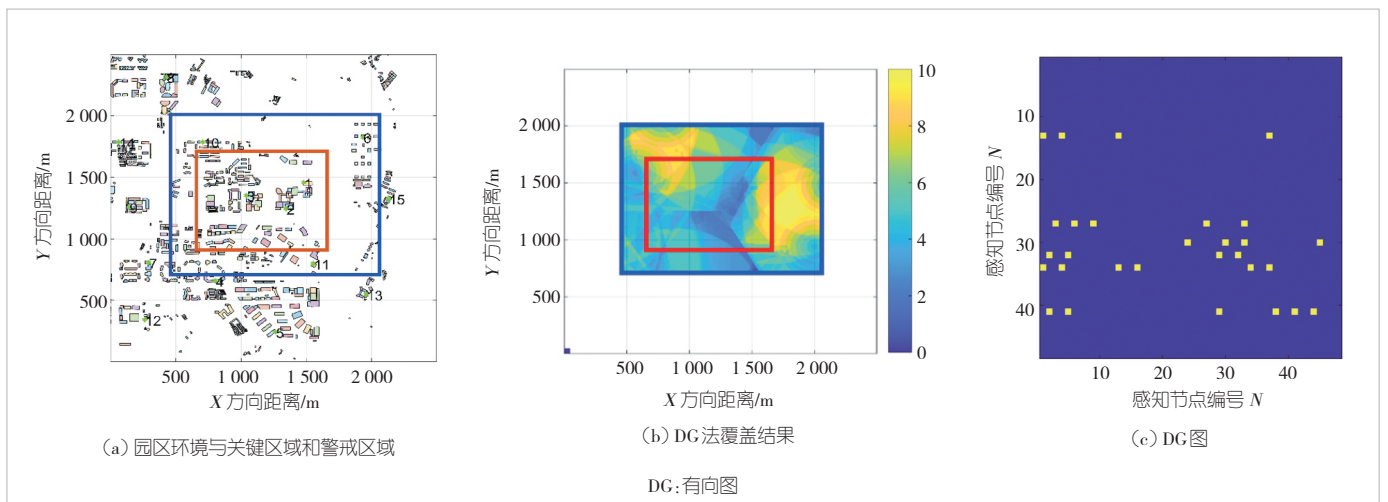


图11 园区多层防区通信感知一体化(ISAC)立体化覆盖的设计结果

- [2] HAN L, JIN J, WANG Q, et al. Trade-off for a novel integrated localization and communication system [EB/OL]. (2023-08-14) [2025-01-12]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10200308>
- [3] PUCCI L, PAOLINI E, GIORGETTI A. System-level analysis of joint sensing and communication based on 5G new radio [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(7): 2043 - 2055. DOI: 10.1109/jsac.2022.3155522
- [4] LIU F, CUI Y H, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1728 - 1767. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632
- [5] 吕明, 陈昊, 丰光银, 等. 面向通信感知一体化的信号波形设计综述 [J]. 无线电通信技术, 2024, 50(3): 469-483. DOI:10.3969/j.issn.1003-3114.2024.03.008
- [6] WANG S X, DAI W, WANG H W, et al. Robust waveform design for integrated sensing and communication [J]. IEEE transactions on signal processing, 2024, 72: 3122 - 3138. DOI: 10.1109/TSP.2024.3410142
- [7] WU J L, LI L X, LIN W S, et al. ADMM-based low-PAPR OFDM waveform design for dual-functional radar-communication systems [C]//Proceedings of ICC 2024 - IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2024: 305 - 310. DOI: 10.1109/icc51166.2024.10622752
- [8] WANG X Y, FEI Z S, ZHANG J A, et al. Sensing-assisted secure uplink communications with full-duplex base station [J]. IEEE communications letters, 2021, 26(2): 249 - 253. DOI: 10.1109/lcomm.2021.3134258
- [9] JIN B, KUANG X F, PENG Y, et al. Distributed power allocation for cognitive tracking based on non-cooperative game in decentralized netted radar [J]. Digital signal processing, 2022, 126: 103499. DOI: 10.1016/j.dsp.2022.103499
- [10] HUANG J Y, XIE J W, YANG Z Q, et al. Joint resource allocation strategy for multiple target tracking in networked collocated MIMO radar system [EB/OL]. (2025-01-06) [2025-01-16]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10824973>
- [11] WANG Y, ZHOU T, YI W. Geometric optimization of distributed MIMO radar system for accurate localization in multiple key subareas [J]. Signal processing, 2022, 201: 108689. DOI: 10.1016/j.sigpro.2022.108689
- [12] YAN J K, LIU H W, PU W Q, et al. Joint beam selection and power allocation for multiple target tracking in netted colocated MIMO radar system [J]. IEEE transactions on signal processing, 64(24): 6417 - 6427. DOI: 10.1109/tsp.2016.2607147
- [13] LIU X H, XU Z H, DONG W, et al. Cognitive resource allocation for target tracking in location-aware radar networks [J]. IEEE signal processing letters, 2020, 27: 650 - 654. DOI: 10.1109/lsp.2020.2987208
- [14] ELHABYAN R, SHI W, ST-HILAIRE M. Coverage protocols for wireless sensor networks: review and future directions [J]. Journal of communications and networks, 2019, 21(1): 45 - 60. DOI: 10.1109/jcn.2019.000005
- [15] MA C, LIANG W, ZHENG M. Delay constrained relay node placement in wireless sensor networks: a subtree-and-mergence-based approach [J]. Mobile Networks and Applications, 2018, 23: 1220-1232
- [16] CHAUDHARY M, GOYAL N, BENSLIMANE A, et al. Underwater wireless sensor networks: enabling technologies for node deployment and data collection challenges [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 10(4): 3500-3524. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3218766
- [17] XIE L, SONG S, ELDAR Y C, et al. Collaborative sensing in perceptive mobile networks: opportunities and challenges [J]. IEEE wireless communications, 2023, 30(1): 16-23. DOI: 10.1109/MWC.005.2200214
- [18] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments [EB/OL]. (2015-02-12) [2025-01-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7037248>
- [19] ZHANG Y D, LU J, ZHANG H T, et al. Experimental study on low-altitude UAV-to-ground propagation characteristics in campus environment [EB/OL]. (2013-12-01) [2025-01-10]. <https://dl.acm.org/doi/10.1016/j.comnet.2023.110055>

作者简介



杨文彬, 中国移动(成都)产业研究院低空经济技术研发运营中心云平台系统主任设计师; 主要研究领域为现代信号处理及应用、统计机器学习等; 已发表论文10余篇。



邱裕鹤, 中国移动(成都)产业研究院低空经济技术研发运营中心云平台系统总设计师; 主要研究领域为网联无人机、低空运营监管和服务等; 拥有发明专利10余项。



苏郁, 中国移动(成都)产业研究院院长、低空经济技术研发运营中心总设计师, 并担任GSMA无人机工作组主席; 主要研究领域为低空智联技术体系及应用等; 获得2024年中国通信学会科学技术奖一等奖。

面向6G典型场景的高能效立体覆盖技术研究



High Energy-Efficiency Three-Dimensional Coverage Technology for 6G Typical Scenarios

张吉发/ZHANG Jifa, 黄香港/HUANG Xianggang, 赵楠/ZHAO Nan

(大连理工大学, 中国 大连 116024;
(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20250310.1730.004.html>

网络出版日期: 2025-03-11

收稿日期: 2024-12-20

摘要: 针对无人区监测、全域应急通信和超大规模机器类通信场景, 基于无人机通信等技术, 提出了高能效多维立体资源分配方案。通过构建考虑环境约束和无人机机动特性的系统模型, 在保障用户服务质量的前提下, 最大化通信网络的能量效率。仿真实验验证了该方案在能效提升方面的有效性, 为高能效多维立体覆盖通信网络的实现提供了理论依据和实践指导。

关键词: 能效; 非正交多址接入; 立体覆盖; 无人机

Abstract: Aiming at scenarios such as unmanned area monitoring, whole-area emergency communication, and ultra-large-scale machine-type communication, a high-energy-efficiency multi-dimensional resource allocation scheme has been proposed based on technologies including unmanned aerial vehicle (UAV) communication. By constructing a system model that considers environmental constraints and the mobility characteristics of UAVs, the scheme maximizes the energy efficiency of the communication network while ensuring the quality of service for users. Simulation experiments have validated the effectiveness in enhancing energy efficiency, providing a theoretical foundation and practical guidance for the realization of high-energy-efficiency multi-dimensional coverage communication networks.

Keywords: energy efficiency; non-orthogonal multiple access; three-dimensional coverage; unmanned aerial vehicle

引用格式: 张吉发, 黄香港, 赵楠. 面向6G典型场景的高能效立体覆盖技术研究 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 39-47. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501007

Citation: ZHANG J F, HUANG X G, ZHAO N. High energy-efficiency three-dimensional coverage technology for 6G typical scenarios [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 39-47. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501007

随着物联网等新一代信息通信技术的普及, 接入设备和传输数据量激增, 这对下一代6G网络提出了更高的要求。6G网络需要在传输速率、可靠性、连接密度、频谱效率和能量效率等方面实现显著提升。基于5G的三大应用场景——增强移动宽带、超大规模机器类通信和超高可靠超低时延通信, 6G将通过持续的技术创新来提升性能并优化用户体验^[1]。其中, 超大规模机器类通信凭借其超大网络容量, 能够支持海量设备连接, 实现人与机器、机器与机器之间的无缝通信, 从而推动大规模物联网的快速发展^[2]。

随着物联网等技术的快速发展, 用户对随时随地高速无线接入的需求日益增长, 这对移动通信网络的覆盖范围和容量提出了更高要求。传统移动蜂窝网络主要基于二维平面部署, 导致单位面积内的频谱效率受到明显限制。与此同时, 城市化进程加速, 城市空间逐渐向立体化发展, 单位面积内的用户密度持续增加, 多元化的通信业务显著提升了单位面积网络总容量的需求。仅依靠物理层传输技术的改进和平面蜂窝网络架构的优化, 已难以满足城市化发展的需求。因此, 随着6G技术的兴起, 基于无人机的多维立体覆盖技术作为一种新型网络架构被纳入白皮书, 并受到全球专家学者的广泛关注。

无人机作为一种新兴技术, 在军事和民用领域具有广泛

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFB1807002)

的应用前景。随着技术的不断进步,无人机在通信领域的应用也日益增多,主要体现在以下3个方面:一是作为辅助基站,分担负载或替代损坏的基站为用户提供服务;二是为缺乏可靠直通链路的用户提供中继支持;三是用于信息传播和数据收集^[3]。无人机基站的优势在于其部署灵活、成本低廉,能够有效满足动态变化的通信需求。与传统地面基站相比,无人机基站具备独特的优势。通过调整飞行高度和轨迹,无人机能够避开障碍物,增加与地面用户建立视距通信链路的可能性,从而减少信号衰减和阻塞效应,提供更高质量的通信服务。然而,无人机基站的续航能力受限于机载能量,这些能量主要用于信号处理和飞行推进。因此,如何优化飞行轨迹以提高能量效率,延长无人机的续航时间,成为当前亟待解决的关键问题。

本文深入研究了基于无人机通信的高能效立体覆盖技术,重点探讨了无人机在该领域中的关键作用。首先,系统梳理了空地立体覆盖技术的现状与发展趋势。随后,针对6G通信中的三大典型应用场景——无人区实时监测、全域应急通信和大规模机器类通信,提出了创新的无人机高能效立体覆盖解决方案,并通过仿真实验验证了方案的有效性。在此基础上,进一步探讨了该技术的未来研究方向。最后,对研究成果进行了全面总结。

1 基于无人机通信的空地立体覆盖技术

随着移动通信技术的不断发展,用户对于网络覆盖的需求也日益多样化,立体覆盖技术应运而生,成为满足用户需求的重要手段之一。该技术通过优化网络架构和信号传输方式,将移动通信网络的覆盖范围从传统的二维平面扩展至三维空间,从而实现更全面、更高效的网络覆盖。本章将详细介绍立体覆盖技术中的无人机通信、非正交多址接入(NOMA)等关键技术,并对现有研究成果进行总结。

1.1 无人机通信技术

无人机通信通过将无人机作为空中信息处理和分发中心,实现了对地面基站的立体扩展和动态补充。得益于其低功耗、易部署的特性以及良好的视距(LoS)信道条件,无人机基站能够显著降低通信成本。因此,这一技术受到了全球专家学者的广泛关注。

陈新颖等在文献[4]中讨论了6G中无人机的应用场景与功能,例如辅助地面移动通信、无人机中继网络、无人机数据采集等,并且阐述了6G无人机通信中太赫兹、超大规模天线阵列等技术。LYU等在文献[5]中提出了一种创新的混合网络架构,通过引入无人机作为空中移动基站,实现了小

区边缘用户数据流量的智能卸载。该架构采用无人机沿小区边缘动态巡航的策略,并结合无人机轨迹优化、带宽资源分配和用户分区管理的联合优化机制。与传统的小型蜂窝卸载方案相比,该架构显著提升了系统通信吞吐量,为解决小区边缘用户服务质量问题提供了有效方案。HU等在文献[6]中研究了无人机辅助的移动边缘计算问题,在通信链路严重阻塞的情况下,利用无人机灵活部署的特点实现视距传输,并通过联合优化计算资源调度、带宽分配和无人机轨迹降低无人机和用户的能耗。在文献[7]中,SAMIR等研究了无人机应用于物联网设备数据采集的问题,根据物联网设备不同的服务质量需求,优化无人机的轨迹和资源分配并最大限度地增加服务物联网设备的数量。

然而,由于无人机机载能量有限,无人机基站的能量主要用于信号处理以及飞行推进,因此,如何合理地规划飞行轨迹,提高无人机基站的能量效率,延长无人机的续航能力,是一个亟待解决的问题。为此,ZENG等在文献[8]中建立了固定翼无人机的能量消耗模型,并基于该模型对无人机飞行轨迹进行了优化研究,具体包括以下3种情况:能量最小化、固定圆形轨迹下的能效最大化以及一般轨迹情况下的能效最大化问题。EOM等在文献[9]中对无人机上行通信链路进行了研究,通过优化无人机飞行轨迹提高了系统能量效率。

1.2 基于NOMA的空地立体覆盖技术

NOMA技术通过允许用户间共享时频资源,显著提高了频谱效率和系统接入设备数量,因此受到了全球学术界的广泛关注。ISLAM等在文献[10]中对NOMA中的关键技术进行了深入探讨,并分析了其与协同通信、波束成形等无线通信技术结合时的性能表现。此外,FANG等在文献[11]中通过优化子信道分配和功率分配策略,进一步提高了下行NOMA网络的能量效率。他们还提出了一种针对子信道分配问题的创新算法,并通过与正交频分多址(OFDMA)方案的对比实验,验证了所提出资源分配方法的优越性能。这些研究为NOMA技术的实际应用奠定了重要基础。

6G网络中的超大规模机器类通信场景对网络接入数量和功耗提出了更高要求,需要支持海量设备接入并实现低功耗运行。为提升频谱效率并降低能耗,基于NOMA技术的无人机辅助网络被视为解决这些挑战的有效方案。已有研究从多个角度验证了该技术的优势:LIU等在文献[12]中通过构建性能评估框架,深入研究了NOMA无人机网络的用户配对问题,提出了3种优化配对方案,并创新性地采用机器学习方法解决了无人机部署位置和移动轨迹优化问题;NASIR等

在文献[13]中从系统性能优化角度出发,在满足发射功率和天线波束宽度等约束条件下,针对最大最小速率优化问题提出了一种高效的路径跟踪算法,通过理论分析和实验验证,证实了NOMA技术在无人机通信场景中相较于传统正交多址接入技术的显著性能优势。

1.3 空基接入点应急通信中绿色立体覆盖技术

随着无人机技术的不断进步,无人机可以被当作中继或基站来建立应急通信系统。灾后地区可能因高流量负载导致通信拥堵和资源需求激增,这对网络容量和能效构成严峻挑战,进而影响整体通信性能。

MERWADAY等在文献[14]中使用遗传算法来获取无人机的最佳位置,从而提高了网络吞吐量。ZHAO等为无人机辅助的灾难应急网络建立了一个框架^[15]。在考虑到自然环境和无人机能耗限制的情况下,HUANG等针对紧急场景下的用户信息采集与传输问题,提出了一种基于凸优化方法的路径优化方案^[16],该方案重点解决了悬停点选择与移动性规划等关键技术问题。

尽管已有部分研究探讨了无人机辅助的高能效覆盖技术,但针对6G典型场景的高能效立体覆盖技术研究仍较为匮乏。为此,本文聚焦无人区实时监测、全域应急通信和大规模机器类通信三大6G典型应用场景,提出了一种无人机高能效立体覆盖方案,并通过实验验证了该方案的有效性,填补了这一领域的研究空白。

2 面向6G网络的无人区实时监测能效提升技术

6G技术预计到2030年将实现“泛在覆盖”,成为网络的主要形态。这一技术将完成在深山、深海等“无人区”的网络部署,实现空、天、地、海全域覆盖,从而推动社会治理的便捷化、精细化和智能化。然而,在无人区建造和监控基站将耗费大量人力和财力,费效比较低。在此背景下,空基接入点基站相较于传统地面基站具有显著优势,尤其是对环境变化的适应能力更强。因此,部署空基接入点基站于无人区,用于实时监测,将是一种更为高效和经济的解决方案。

2.1 模型构建

如图1所示,本研究采用空基接入点对无人区进行实时监测。该空基接入点搭载基站,在监测区域上空以盘旋方式运行,实现立体化、广域化和移动化的网络覆盖。基于此架构,本研究提出了一种联合优化方案,通过协同优化空基接入点的飞行中心点位置、飞行半径和功率分配,显著提升系统能量效率,实现绿色节能的立体覆盖。

为便于分析,本研究设定监测区域为半径2 km的圆形蜂窝小区,区域内分布有 K 个接入设备,这些设备在0~300 m的垂直空间内呈立体分布。空基接入点在高度 H 处以圆形轨迹飞行,飞行周期为 T ,需确保与 K 个设备保持实时通信并满足预设的速率要求。所提出的优化方案通过系统地调整飞行中心点、飞行半径和功率分配参数,实现了小区能量效率的显著提升。

为验证所提方案的有效性,本研究设计了一种基准方案作为对比。该基准方案采用以下策略:空基接入点以小区中心为飞行中心点,采用平均功率分配方式,并选择使推进功率最小的飞行速度 $V_{op} = (C_1/3C_2)^{1/4}$ m/s。

2.2 仿真结果

我们设置空基接入点的飞行周期为 $T=100$ s,飞行高度 $H=1$ km, $V_{min}=10$ m/s, $V_{max}=100$ m/s, $a_{max}=10$ m/s²。用户数 K 设置为200,每个用户的带宽设置为 $B=360$ kHz,门限设置为 $R_{th}=26.0$ Mbit/s。载波频率为4.9 GHz,空中基站固定消耗功率为160 W,最大发射功率设置为5 W。空地信道均采用LoS信道。蜂窝小区半径为2 000 m。除非特别说明,以上参数为默认参数。

图2为不同方案下空基轨迹对比。相较于基准方案,优化方案能根据用户分布灵活选取空中基站圆形轨迹中心,并优化轨迹半径。优化方案的能效为15.03 Mbit/J,基准方案的能效为14.60 Mbit/J,仿真结果验证优化方案的有效性。

图3展示了不同发射功率下的多种空基轨迹半径能量效率对比。我们以小区中心为飞行中心点,选取了360 m、

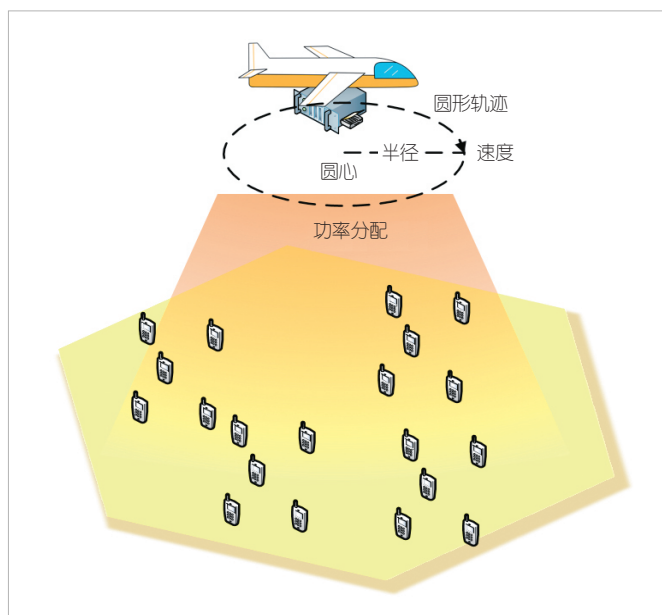


图1 空基接入点实时监测无人区

460 m和560 m这三种半径进行对比。结果显示,随着发射功率的增加,3种方案均能满足更大的用户信息量需求,因此能量效率均有所提升。当半径为460 m时,空基接入点的飞行速度接近 V_{op} ,此时能量效率达到较高水平;若速度低于或高于该值,能量效率均会下降。本文提出的优化方案在发射功率增加时,能量效率也持续上升,并且在每种发射功率下均表现出最高的能量效率。这表明优化方案不受发射功率变化的影响,能够持续有效地提升能量效率。

图4展示了用户数递增时,优化方案和基准方案在一个周期内的信息量、能耗和能量效率的变化趋势。如图所示,随着用户数的增加,信息量和能量效率均呈现上升趋势,而

能耗则有所增加。尽管优化方案的能耗高于基准方案,但由于其传输的信息量显著增加,因此优化方案的能量效率优于基准方案。

3 全域应急通信下高效绿色立体覆盖技术

凭借其卓越的灵活性和机动性,无人机能够实现快速部署和精准轨迹巡航,有效支持复杂环境下的临时通信网络构建,在全域应急通信等6G典型应用场景中具有广泛的应用前景。

3.1 方案设计

针对全域应急通信场景,我们提出了一种基于大载荷固定翼无人机的通信解决方案。该方案通过无人机搭载4G/5G蜂窝通信设备,利用卫星链路将信号回传至地面站,并进一步传输至移动4G/5G核心网,实现通信链路的建立。为提升受灾区域的通信覆盖效率,无人机侧面安装了定向天线,重点为人口密集区域提供临时、高能效的通信服务。该方案能够在灾后快速部署,为灾区用户提供具有阶段性延时的应急通信接入服务,有效满足灾区的紧急通信需求。

通常情况下,5G的载波带宽在Sub6G频谱下最高可以为100 MHz,采用30 kHz的子载波间隔,每12个子载波构成一个标准资源块。除去保护带宽后,100 MHz的载波带宽可最多分为273个资源块。如图5所示,一个正六边形蜂窝小区被均分为4个面积相近的子区域,每个子区域容纳200个用户,因此整个小区共有800个用户。为了降低用户间的同频干扰,假设每个用户独占一个资源块。由于用户数量多且分

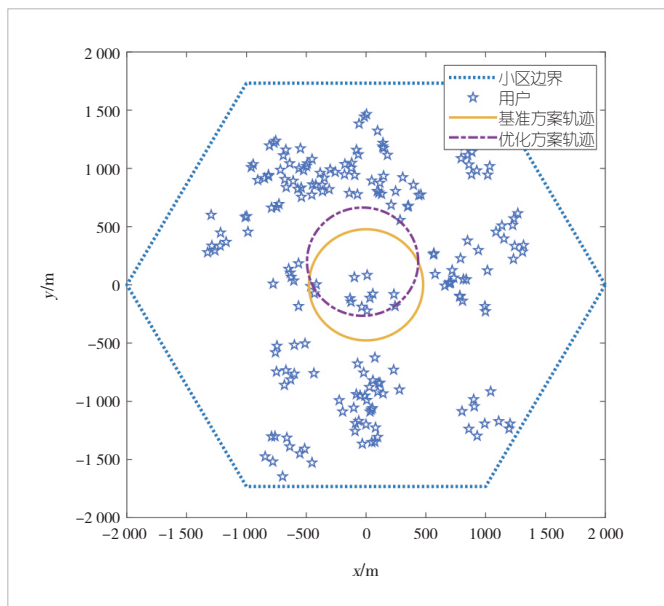


图2 优化方案与基准方案空基轨迹对比

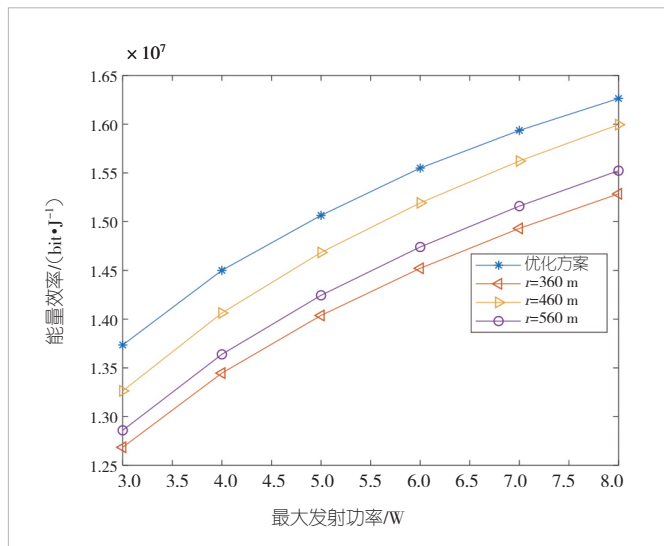


图3 不同发射功率下的多种空基轨迹半径能量效率对比

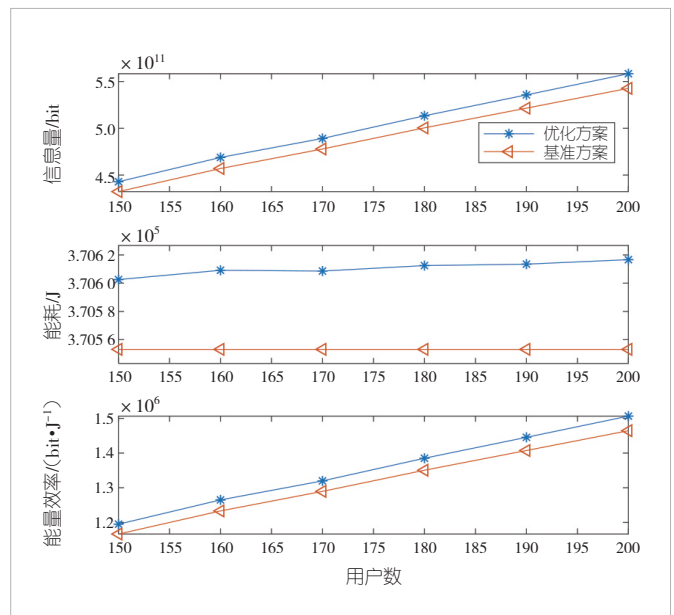


图4 不同用户数下的优化方案和基准方案性能对比

布密集，空基接入点无法实现全域同时覆盖，因此需要采用频谱资源复用策略，即每个子区域轮流占用频谱资源，其他子区域的用户在此期间处于等待连接状态。这种设计通过牺牲接入延迟来提升覆盖密度，特别适用于人口密集的应急通信场景。

基于此模型本文中我们提出了一个联合优化区域调度、空基接入点飞行轨迹和发射功率的设计方法。该方法能够根据模型参数规划最优的飞行轨迹并最大化能量效率，从而实现系统的高效绿色覆盖。

3.2 地面基站能效对比方案

为了验证空基接入点方案能效提升，本文中我们采用地面基站代替空中基站进行建模优化。与空中基站采用的多址方式相同，地面基站仍采用时分多址接入，信道采取瑞利衰落信道进行仿真。

3.3 仿真结果

在该模型中，我们将一个边长为2 000 m的正六边形蜂窝区域按地理位置均匀划分为 $M=4$ 个子区域，每个子区域包含 $K=200$ 个用户，总用户数为800个。由于受灾地区多位于偏远山区，信道差异需考虑海拔高度的影响。用户位置采用三维笛卡尔坐标系来表示，即任意子区域 $m \in M$ 中的任意用户 $k \in K$ 的位置表示为 $\mathbf{w}_{m,k} \in \mathbb{R}^3 \times 1$ 。用户分布采用集群均匀复合式分布：集群性体现在部分受灾用户可能聚集等待救援，而均匀性则表现为每个聚集群落内的用户位置服从均匀随机分布。空基接入点的飞行高度固定为距地面 $H=1\ 000$ m。

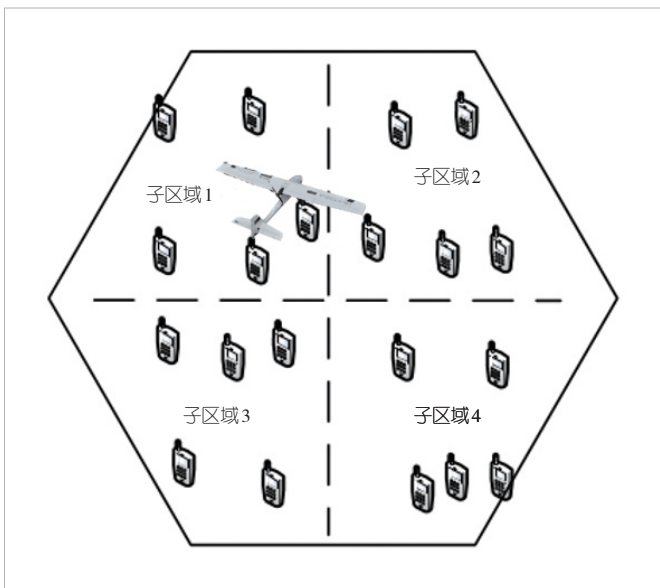


图5 全域应急通信系统模型

载波频率 $f=4.9$ GHz，光速 $c=3 \times 10^8$ m/s，噪声功率谱密度 $\sigma_0^2=10^{-20.4}$ W/Hz，空基接入点信号发射功率为5 W，与空基接入点相关的参数 $c_1=1.84 \times 10^{-3}$ ， $c_2=4\ 500$ ，无人机基站的固定功耗 $P_{BASE}=160$ W，空基接入点的最大飞行速度 $V_{max}=100$ m/s，最小飞行速度 $V_{min}=3$ m/s，最大飞行加速度 $a_{max}=5$ m/s²，重力加速度 $g=9.8$ m/s²。设置基站发射峰值功率 $P=2\ 000$ W，基站固定电路消耗功率 $P_{cir}=270$ W。假设空基接入点使用多天线，设定多天线增益系数为10。空地信道采取LoS信道。

图6从立体和俯视两个角度展示了 $T=200$ s时优化的无人机轨迹，并与传输速率最大方案的无人机轨迹进行了对比。在能效最大方案中，空基接入点的飞行速度保持相对稳定，轨迹近似为一个圆形。对于飞行器而言，直线飞行和圆形绕飞是最节能的飞行方式，因为频繁的加减速会显著增加能量消耗。这也解释了为何在对比方案中，当能量不受限时，空基接入点的坐标会集中在子区域中心。从数学极限来

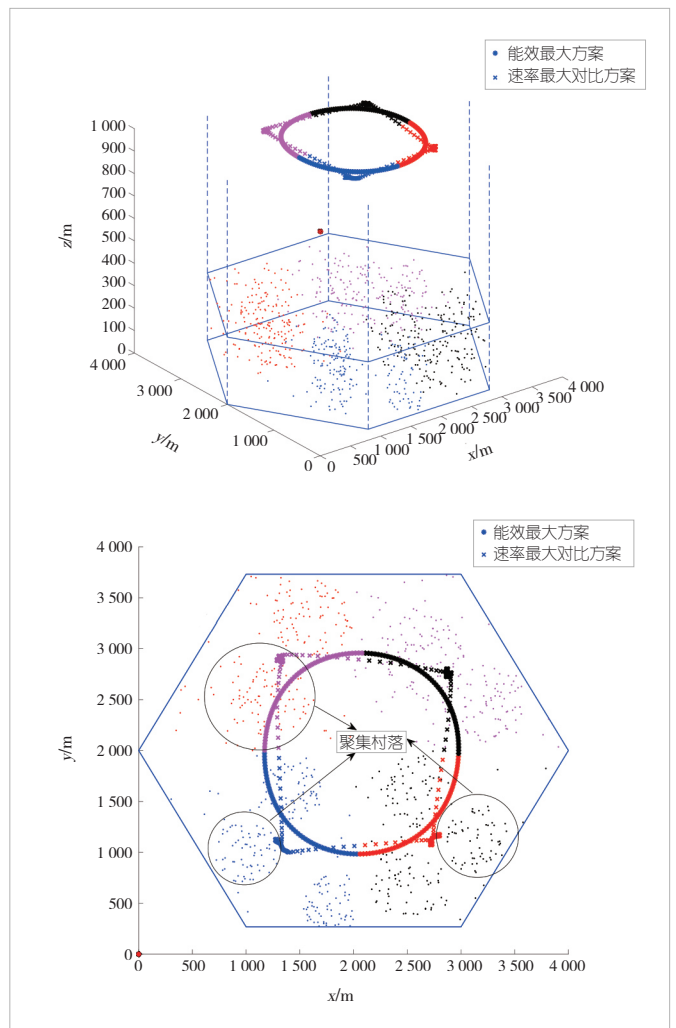


图6 飞行周期为200 s时的能效最优与速率最优的轨迹图

看, 该方案对覆盖性能的提升是显而易见的: 在周长相同的情况下, 圆的面积大于任何多边形。

图7展示了飞行周期为100 s、飞行时刻为10 s的用户收到信号功率辐射图。此时左下角的子区域全体用户接入通信网络, 而其他子区域的用户均处于服务等待阶段。这种周期循环机制的优点在于能够高效利用有限的带宽和资源, 从而服务更多用户; 其缺点是可能导致较长的延迟。然而, 在应急通信等特殊场景下, 以延迟换取更大的连接容量是可接受的。

图8展示了3种方案的总平均传输速率随飞行周期 T 的增加而增长的趋势。这一现象主要归因于空基接入点的机动性: 随着 T 的增大, 空基接入点能够在用户群落附近停留更长时间, 从而提升传输效率。理论分析表明, 当 T 足够大时, 空基接入点在节点间的飞行时间可以忽略不计, 此时平均传输速率将达到饱和状态。

图9可以看出, 本方案兼顾了应急信号覆盖传输和系统能量消耗, 因此其能量效率最大。相对于基站方案来说, 在达到相同性能的先决条件下, 本方案所消耗的能量较小。

4 基于非正交资源分配与空基接入点辅助的大规模机器类通信

超大规模机器类通信作为6G典型应用场景之一, 侧重于人与物之间的信息交换, 着眼于万物互联。为了解决接入规模、成本消耗等问题, 可采用空基接入点搭载基站的方式, 辅助地面基站为小区边缘设备提供服务。这一方案不仅能避免超高密度地面基站的部署, 还可降低成本和提升能量效率, 从而实现高密度广域覆盖。

4.1 基于非正交资源分配与空基接入点辅助的大规模机器类通信模型

为了实现致密覆盖连接且避免部署超高密度地面基站, 可采用空基接入点搭载基站的方式, 服务小区边缘用户。系统模型如图10所示, 将等效的4个地面基站与2个空基接入点覆盖的六边形区域看作一个整体, 相当于4个小区。通过上述方法可以计算得到, 这4个地面基站与2个空基接入点服务的六边形区域覆盖的用户数为2 400个用户($4 \times 400 + 2 \times 400 = 2\ 400$), 每个小区可覆盖600个用户, 其中地面基站服务中心400个用户, 空基接入点服务200个边缘用户。

采用的资源块子载波间隔为15 kB, 为经典值的一半。选取两个50 MHz带宽的载波, 共可容纳 $270 \times 2 = 540$ 个资源

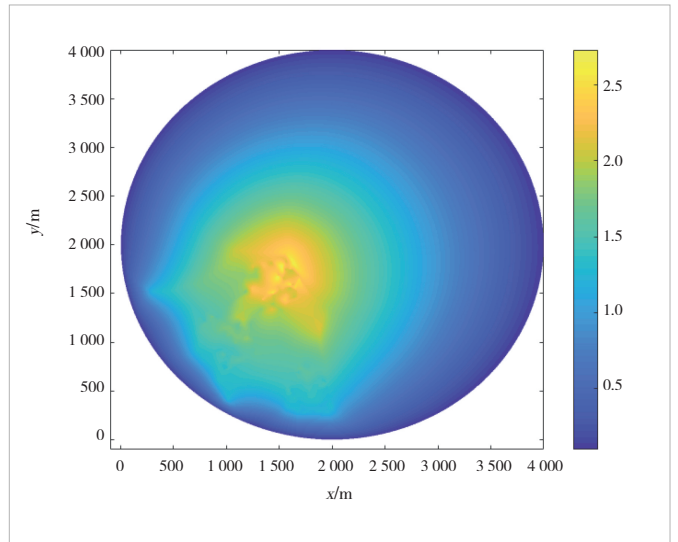


图7 飞行周期为100 s、飞行时刻为10 s的用户收到的信号功率辐射图

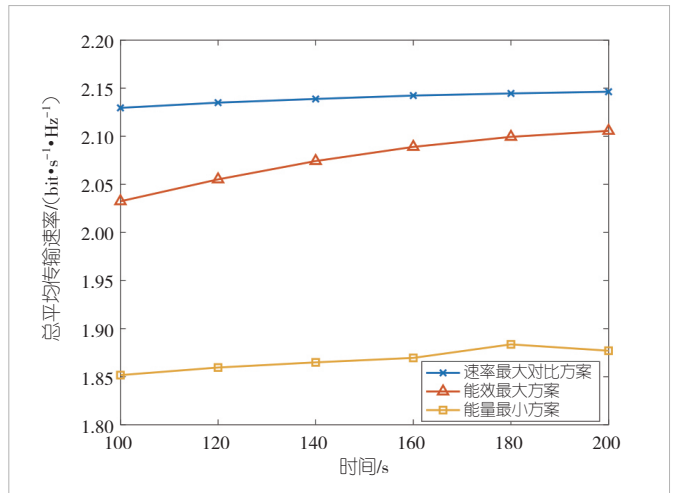


图8 不同方案的总平均传输速率随周期变化的对比

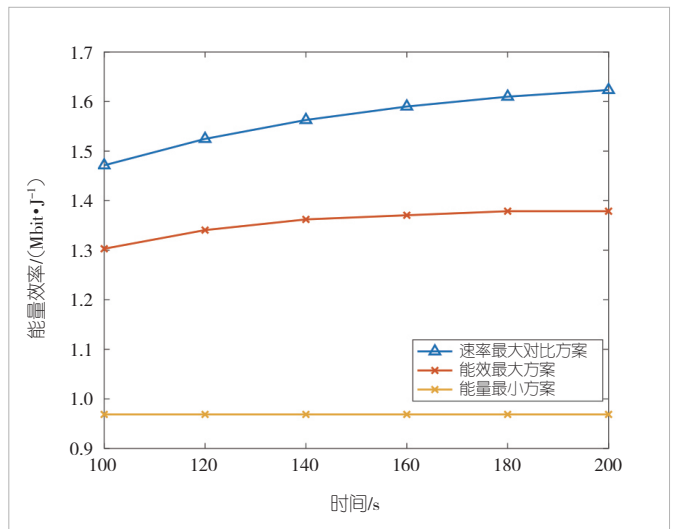


图9 不同方案能量效率周期特性对比

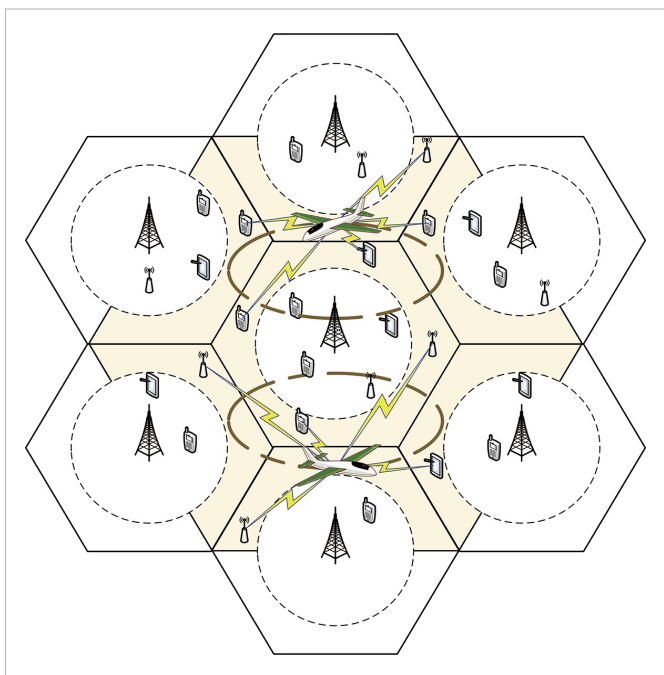


图10 基于非正交资源分配与空基接入点辅助的超大规模机器类模型

块。小区中心用户采用地面基站提供服务，小区边缘用户采用空基接入点搭载基站提供服务。地面基站使用200个资源块，采用NOMA技术，两个用户共用一个资源块，因此一个地面基站在满载时可以服务400个用户。每个人空基接入点同样使用200个资源块，采用NOMA技术，满载时可服务400个用户。在总共540个资源块中，地面基站占用200个，两个空基接入点占用剩余的340个。地面基站用户通过使用不同子载波频率来规避用户间干扰。对于两个空基接入点占用的340个资源块，每个空基接入点独占140个正交资源块，剩余的60个资源块由两个空基接入点共享，从而使每个空基接入点占用200个资源块。为了避免60个共享资源块中的干扰，将同一子载波频率的资源块分配给两个空基接入点服务的、相互距离较远的用户对，并通过场景化波束控制和飞行控制来规避干扰。这样，540个资源块得以合理使用，有效避免了地面基站与空基接入点基站用户之间的干扰。此外，空对地信道建模为LoS信道，地对地信道建模为瑞利信道。

4.2 基于非正交资源分配的空基接入点基站能量效率优化

为满足超大规模机器类通信对低成本、低功耗的需求，本研究通过联合优化空基接入点的飞行轨迹与功率分配策略，以及地面基站的功率配置，以实现系统能量效率的最大化。

假设空基接入点在运行过程中服务的用户保持不变。设

U_1 和 U_2 分别为该接入点服务的第 i 个资源块中的第1个和第2个用户。由于空基接入点的位置随时间变化，在其飞行一周的过程中，可能会出现同一资源块中的两个用户与接入点的距离发生远近切换的情况。为了简化系统模型，我们固定了解码顺序：无论两个用户与接入点的距离如何变化，始终优先解码 U_2 的信息，再解码 U_1 的信息。具体而言，系统会为 U_2 分配更大的发射功率，并将 U_1 的信号视为干扰来解码 U_2 的信号。通过优化空基接入点飞行轨迹与功率分配，最大化空基接入点能量效率并满足用户通信速率约束、功率分配约束和无人机轨迹约束的要求。

为确保小区中心区域用户获得与空基接入点用户相当的服务质量，同时降低地面基站的发射功率，需对地面基站的吞吐量进行限制，并最小化其发射功率。

4.3 只采用地面基站的等效对比方案

在服务用户数量和服务范围相同的情况下，若仅采用地面基站服务用户，可将模型简化为6个满载基站（每个基站通过NOMA技术服务400个用户），总计服务2400个用户，且服务范围与4个等效小区的整体面积相同。因此，对比方案中每个小区的覆盖半径应为：

$$r' = \sqrt{\frac{2}{3}} R \quad (1)$$

4.4 仿真结果

图11展示了无人机基站的能效在不同发射功率下随迭代次数的收敛情况。随着迭代次数的不断增加，无人机基站的能量效率逐步提升，并在4次迭代后趋于稳定。此外，当发射功率 P_{\max} 从5W增加到20W时，在不考虑多天线增益的情况下，能效可以从823 kbit/J提升至979 kbit/J，增幅可达19%。

图12展示了轨迹优化与配对方案在能效方面的对比结果。研究表明，当飞行周期为 T 时，通过计算圆形轨迹的半径可实现无人机推进功率的最小化。随着发射功率的增加，能量效率呈现上升趋势，这主要归因于无人机基站的能量消耗主要来自推进系统而非信号处理。与传统的圆形轨迹相比，本文提出的轨迹优化方案在能效和信息传输量方面均有显著提升。同时，相较于随机配对模式，本文提出的配对策略能够有效提高系统的能量利用效率。

图13展示了服务区内用户分布与空基接入点轨迹。如图所示，无人机采用圆形飞行轨迹，主要服务于小区边缘用户。服务区域呈六边形结构，具备按需扩展的灵活性。

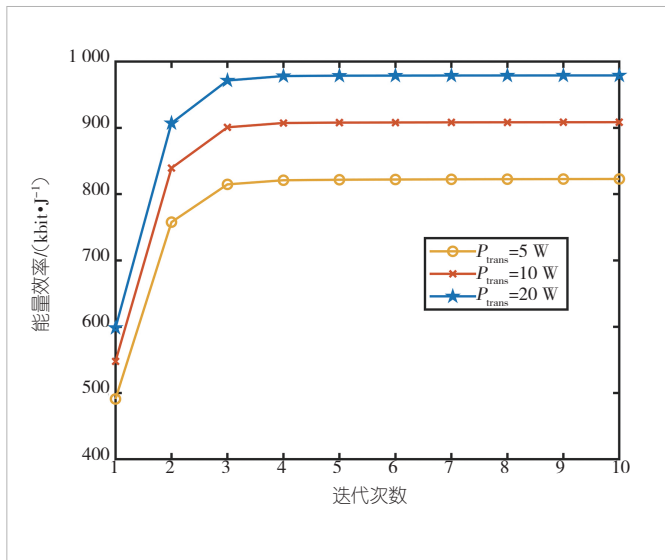


图11 空基接入点辅助方案算法的收敛性

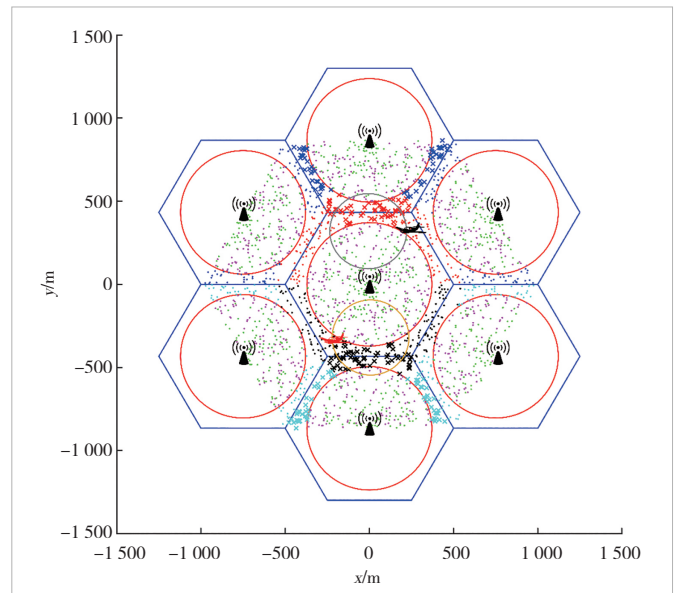


图13 六边形小区服务区用户分布与空基接入点轨迹

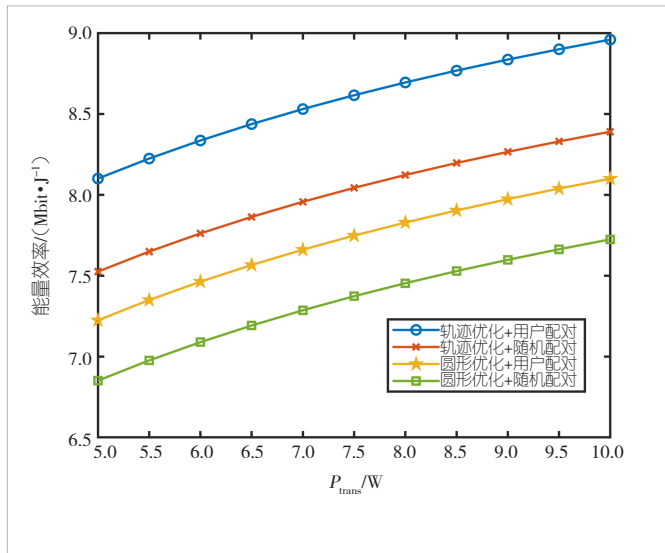


图12 轨迹优化和配对方案的能效对比

5 无人机高能效立体覆盖的未来研究方向

上述研究验证了无人机在通信立体覆盖和能效提升方面的有效性。为了促进无人机在更多6G通信场景中的应用，本章中我们讨论一些亟待解决的问题和未来研究方向。

5.1 人工智能辅助的无人机高能效立体覆盖

本文所提出的无人机高能效立体覆盖技术基于凸/非凸优化算法，但在实际应用中面临计算复杂度高、环境适应性不足等问题。近年来，随着人工智能技术的快速发展，深度强化学习在无人机轨迹优化领域展现出显著优势，其强大的动态决策能力和优异的泛化性能为技术突破提供了新思路。通过将人工智能深度融入空地协同通信系统，有望构建高

效、灵活且智能化的立体覆盖网络，从而为经济社会发展提供强有力的技术支撑和创新动能。

5.2 通感一体化场景下无人机高能效立体覆盖

通感一体化是6G通信中的一项关键技术，具备高谱效、低成本、低功耗和低干扰等优势，在车联网、智能家居等新兴应用场景中展现出广阔前景。随着6G通信从单一功能向多功能系统演进，未来将实现无处不在的泛在通信与感知能力。然而，通感一体化场景对系统模型和资源优化提出了更高要求。无人机凭借其部署灵活、易于建立视距链路等特点，能够有效支持立体通信覆盖与环境感知，为通感一体化的实现提供了重要技术支撑。

5.3 无人机通信与卫星通信技术相结合

卫星链路主要在大气层以上的宇宙空间中运行，传输损耗小且电波传播稳定。通常采用微波波段，具有宽广的频率范围，能够提供中高速的数据传输通道。这使得卫星通信能够在各种复杂环境下保持稳定，为无人机提供可靠的通信保障，确保其在恶劣环境中的安全飞行和高效作业。与固定通信设备相比，无人机部署速度更快，能够在紧急情况下迅速抵达指定区域，并通过卫星通信技术快速建立通信链路，为应急通信、灾害监测等任务提供及时支持。

5.4 无人机通信与智能反射面相结合

智能反射面（IRS）利用其大量无源反射元件，能够智能调控入射信号的相位、频率、振幅和偏振，从而实现精确的波束赋形。在无人机与目标用户无法直接通信的场景下，

IRS可作为高效的中继或反射装置,协助建立可靠的通信链路。通过IRS的反射特性,无人机通信网络能够更高效地利用频谱资源,并实现动态网络优化。此外,IRS还能通过调节反射信号的相位和幅度,实现信号的定向传输,有效降低信号泄露和窃听风险,显著提升通信安全性。

6 结束语

无人机通信作为一种新兴技术,通过将无人机作为空中信息处理和分发中心,在覆盖补盲、网络扩容、速率提升及立体扩展等领域展现出广泛的应用前景。本文首先概述了无人机通信技术及其在多维立体覆盖方面的应用,然后提出了3种利用多维立体覆盖技术提升系统能效的创新方案,并通过实验验证了这些方案在性能上的显著优势,最后讨论了无人机高能效立体覆盖的开放问题和未来的研究方向。

参考文献

- [1] 张平, 张建华. 6G 愿景及技术挑战专题导读 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(2): 1. DOI: 10.12142/ZTETJ.202102001
- [2] 杨峰义, 刘洋, 杨皓. 6G网络的一些思考 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(2): 2-5. DOI: 10.12142/ZTETJ.202102002
- [3] 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. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7470933
- [4] 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. DOI: 10.11999/JEIT210789
- [5] LYU J B, ZENG Y, ZHANG R. UAV-aided offloading for cellular hotspot [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(6): 3988-4001. DOI: 10.1109/TWC.2018.2818734
- [6] HU X Y, WONG K K, YANG K, et al. UAV-assisted relaying and edge computing: scheduling and trajectory optimization [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(10): 4738-4752. DOI: 10.1109/TWC.2019.2928539
- [7] SAMIR M, SHARAFEDDINE S, ASSI C M, et al. UAV trajectory planning for data collection from time-constrained IoT devices [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(1): 34-46. DOI: 10.1109/TWC.2019.2940447
- [8] ZENG Y, ZHANG R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2017, 16(6): 3747-3760. DOI: 10.1109/TWC.2017.2688328
- [9] EOM S, LEE H, PARK J, et al. UAV-aided wireless communication designs with propulsion energy limitations [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 69(1): 651-662. DOI: 10.1109/TVT.2019.2952883
- [10] ISLAM R S M, AVAZOV N, DOBRE O A, et al. Power-domain non-orthogonal multiple access (NOMA) in 5G systems: potentials and challenges [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2017, 19(2): 721-742. DOI: 10.1109/COMST.2016.2621116

- [11] FANG F, ZHANG H J, CHENG J L, et al. Energy-efficient resource allocation for downlink non-orthogonal multiple access network [J]. IEEE transactions on communications, 2016, 64(9): 3722-3732. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2594759
- [12] LIU Y W, QIN Z J, CAI Y L, et al. UAV communications based on non-orthogonal multiple access [J]. IEEE wireless communications, 2019, 26(1): 52-57. DOI: 10.1109/MWC.2018.1800196
- [13] NASIR A A, TUAN H D, DUONG T Q, et al. UAV-enabled communication using NOMA [J]. IEEE transactions on communications, 2019(7): 5126-5128. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2906622
- [14] MERWADAY A, TUNCER A, KUMBHAR A, et al. Improved throughput coverage in natural disasters: unmanned aerial base stations for public-safety communications [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2016, 11(4): 53-60. DOI: 10.1109/MVT.2016.2589970
- [15] ZHAO N, LU W D, SHENG M, et al. UAV-assisted emergency networks in disasters [J]. IEEE wireless communications, 2019, 26(1): 45-51. DOI: 10.1109/MWC.2018.1800160
- [16] HUANG Z R, CHEN C C, PAN M X. Multiobjective UAV path planning for emergency information collection and transmission [J]. IEEE Internet of Things journal, 2020, 7(8): 6993-7009. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2979521

作者简介



张吉发, 大连理工大学在读博士研究生; 主要研究方向为智能无线通信、通感一体化。



黄香港, 大连理工大学在读硕士研究生; 主要研究方向为智能反射面、非正交多址接入、无人机通信。



赵楠, 大连理工大学教授; 研究方向为通感一体化、无人机通信、绿色通信。

面向低空经济的无线覆盖扩展技术思考与展望



Reflections and Prospects of Wireless Coverage Expansion Technologies for Low-Altitude Economy

盛敏/SHENG Min, 陈旭晖/CHEN Xuhui,
马兴业/MA Xingye, 赵晨曦/ZHAO Chenxi

(西安电子科技大学空天地一体化综合业务网全国重点实验室, 中国
西安 710071)
(State Key Laboratory of ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250227.0944.002.html>

网络出版日期: 2025-02-27

收稿日期: 2025-01-10

摘要: 低空经济的迅猛发展对面向低空的无线覆盖扩展提出了挑战。利用现有地面和空天通信系统为低空空域提供通信覆盖, 联合智能超表面等技术辅助低空通信将是未来的研究热点。梳理了低空立体无线覆盖技术, 指出了低空经济未来的研究方向。认为低空通信将耦合感知、定位功能, 提升面向低空空域的管控和服务能力, 实现低空智能互联与智能协同, 促进低空经济的进一步发展。

关键词: 低空经济; 地对空通信; 通感一体化

Abstract: The rapid development of the low-altitude economy poses challenges to the expansion of wireless coverage for the low-altitude airspace. In the future, utilizing existing terrestrial and space-air communication systems to provide communication coverage for the low-altitude airspace and combining technologies such as intelligent reflecting surfaces to assist low-altitude communication will be the research focus. This paper combs the low-altitude three-dimensional wireless coverage technologies and points out the future research directions of the low-altitude economy. It is believed that low-altitude communication will integrate sensing and positioning functions, enhancing the management, control, and service capabilities for the low-altitude airspace. This will achieve intelligent interconnection and intelligent coordination in the low-altitude area, and further promote the development of the low-altitude economy.

Keywords: low-altitude economy; ground-to-air communication; integrated sensing and communication

引用格式: 盛敏, 陈旭晖, 马兴业, 等. 面向低空经济的无线覆盖扩展技术思考与展望 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 48-52. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501008

Citation: SHENG M, CHEN X H, MA X Y, et al. Reflections and prospects of wireless coverage expansion technologies for low-altitude economy [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 48-52. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501008

1 面向低空覆盖的技术背景及难点分析

低空经济是指以 1 000 m 以下的低空空域为载体, 将民用载人和无人飞行器的各种低空飞行业务作为牵引的综合经济形态^[1]。随着客运货运、安全监控、遥感监测等低空飞行业务的日益增多, 低空经济的发展进入了新的阶段。

1.1 低空经济发展

从 2022 年到 2035 年, 中国低空经济市场规模的年均增长率预计为 6.9%。到 2028 年, 市场规模将达到 3.7 万亿元,

而到 2035 年, 低空经济的市场规模将达到 6 万亿元。这反映了低空经济的巨大潜力, 也表明它在未来十几年内将成为中国经济增长的一个核心领域。

低空经济发展的一个关键问题是如何实现低空高效通信。2017 年 5 月, 第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 发布了 TR36.777, 旨在评估和规范 LTE 网络在支持无人飞行器 (UAV) 通信时的性能标准^[2]。2021 年 12 月, 3GPP 确定了 Release 18 标准的内容, 将提升面向低空应用场景的网络功能和覆盖能力作为 5G 演进的方向之一。这标志着 5G-Advanced (5G-A) 演进的开始。2023 年 12 月, 3GPP 确定了 Release 19 标准的内容, 将非地面网络的演进作为 Release 19 无线接入网部分的主要议题之一, 并确定 5G-A 和 6G 将

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62121001、62301382); 陕西省重点研发计划项目 (2024CY2-GJHX-82)

提供更高的下行速率、更低的延迟,以及更高精确的定位功能^[3]。这为低空经济的进一步发展提供了技术支撑。业界广泛认为,利用地面网络实现低空覆盖、空地一体化低空网络以及通感定一体化等,是面向低空经济无线覆盖扩展技术的可行发展方向。

1.2 面向低空覆盖的难点

现有5G移动通信系统的建设已经非常完备,但其组网结构主要面向地面覆盖设计,基站天线采用下倾角配置。现有的平面覆盖场景化波束主要面向楼宇、开阔广场和高层建筑提供覆盖,并没有专门针对低空空域的波束模式。如果直接沿用5G地面组网结构对低空进行覆盖,将存在以下问题^[4]:

1) 天线零位造成覆盖空洞。现阶段面向低空的通信覆盖,多数依靠基站天线的旁瓣信号以及多径反射信号。这些信号功率增益低、路径损耗大、覆盖性能较差。低空用户在移动过程中,很可能出现在基站的天线零位。如图1所示,低空用户完全无法收到覆盖服务,这会引发飞行故障等问题。

2) 同频干扰恶化服务水平。低空用户的飞行高度远高于天线,且与天线之间几乎没有障碍物。相比于地面通信中普遍的非视距(NLoS)信道,地对空信道大多是视距(LoS)的,如图2所示。这导致低空用户受到严重的同频干扰。数据显示,在相同的参考信号接收功率(RSRP)水平

下,低空用户处的信干噪比(SINR)要比地面用户平均高出10 dB^[4],低空覆盖性能遭受严重恶化。

3) 复杂邻区关系导致低空用户频繁切换,造成网络难以优化。与地面蜂窝覆盖相比,面向低空的覆盖将覆盖目标从传统的二维平面延伸为三维立体区域,使邻区关系发生变化。具体而言,面向低空覆盖时,来自不同基站扇区的波束交错重叠,低空用户同时被不同基站天线的主瓣或旁瓣信号覆盖。在这种情况下,用户关联方式将发生变化,用户接入的很可能不是距离最近的基站,加之低空用户的高动态特性,将导致用户频繁切换,从而带来巨大的信令开销。同时,邻区关系会随着低空用户飞行高度的上升变得复杂,如图3所示。传统用于地面移动通信网络的网络规划和优化方法将不再适用于低空网络。

考虑上述因素,需要设计新的覆盖方案以满足低空覆盖的特殊要求。

2 低空立体无线覆盖结构

利用5G移动通信系统现有的地面基础设施建设向低空进行通信覆盖扩展,是一种成本较低且可行的方式。尽管如此,仍需要重新思考立体覆盖结构和波束成形技术。

2.1 立体覆盖结构

由于基站发射功率有限,基站扇区波束的水平波束宽度和垂直波束宽度相互制约,因此可将基站每个扇区的波束轮廓建模成四棱锥。考虑到每个基站在水平方向部署多个扇区,可以利用基站波束对低空空域进行立体填充,形成“鱼鳞”组网^[5]、三棱柱网络^[6]等。鱼鳞组网中所有基站波束对准相同方向,为相邻小区正上方的空域提供覆盖,可使组网成本降1/3(与蜂窝结构相比)^[5]。三棱柱网络利用剖分将空域划分为多个三棱柱立体小区,多个基站波束共同对小区进行立体填充,基站扇区利用率较高。以同步信号RSRP(SS-RSRP) > -90 dBm为信号覆盖门限,可以在重叠覆盖率小于26%的前提下使空域信号覆盖率达到90%以上^[6],以实现低重叠无空洞覆盖。

2.2 波束成形技术

如果利用地面系统实现面向低空的覆盖扩展,基站则无法对正上方的空域进行波束覆盖^[7],也就无法直接复用地面基站波束,因此需要引入新的波束成形技术。波束成形技术设计需要兼顾以下几个方面:

1) 水平和垂直维度。受限于发射功率,扇区波束的水平宽度和垂直宽度相互制约,一旦需要覆盖的空域高度增

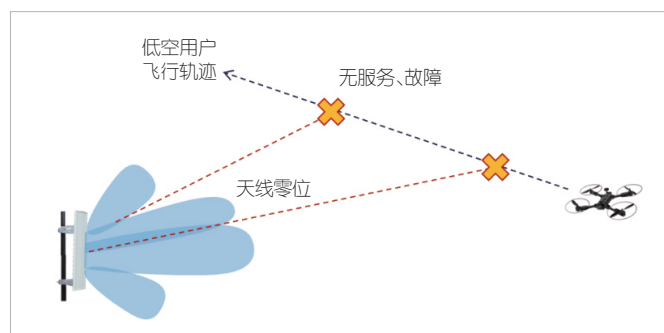


图1 天线零位引发故障示意图

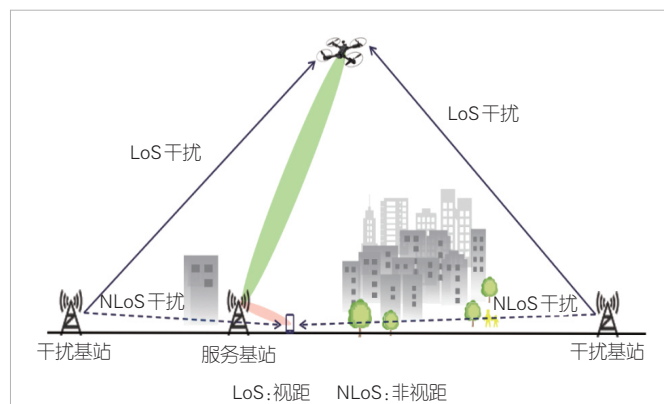


图2 地对地NLoS信道与地对空LoS信道对比示意图

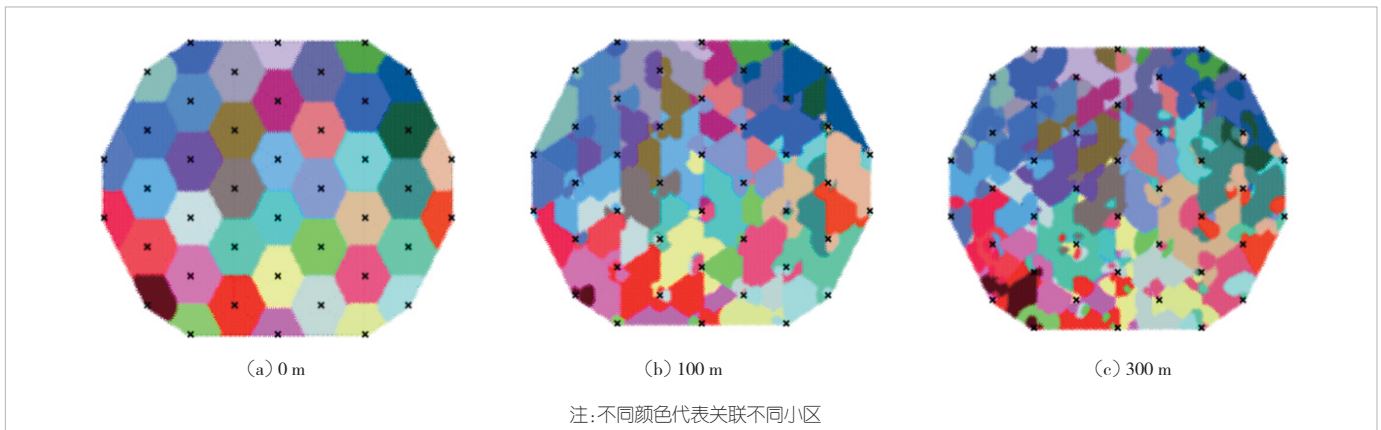


图3 低空用户处于不同飞行高度的邻区关系对比

加,提高垂直波束宽度势必会降低基站在水平方向的覆盖性能,因此需要利用波束轮廓特征实现波束自主赋形。

2) 波束灵活性与兼容性。在面向低空覆盖扩展的同时,地面的覆盖性能需要维持在理想水平,此时波束会在不同模式之间切换,因此需要具有高度的灵活性。同时,所设计的波束也要满足各种业务的技术需求,如感知、定位需求等,因此波束的兼容性也需要纳入考虑。

3) 信号覆盖与速率覆盖。为实现全域无空洞覆盖,不同基站扇区的波束间很可能会出现交叠。这会在低空用户处引起强烈的同频干扰,降低数据传输速率。因此,所设计的波束需要在信号覆盖和速率覆盖之间找到合适的折中。

3 低空立体无线覆盖方法

3.1 多基站协同覆盖技术

低空覆盖邻区关系复杂、同频干扰强烈,采用多基站协同覆盖是提升低空覆盖性能的可行方法之一。相比于单基站覆盖,多基站协同覆盖可以叠加来自不同基站的信号,共同为低空节点提供通信覆盖。这将显著增强低空节点的接收信号强度,同时有效降低小区内波束重叠引起的干扰。值得注意的是,由于低空用户干扰分布难以确定,邻区关系复杂,低空协同覆盖将不再局限于地面协同覆盖方式中的邻近基站协同。此外,多基站协同还可以有效降低低空节点接入小区的切换频率。低空节点具有高动态性,随着飞行任务的进行,往往会出现频繁的小区切换。多基站协同可以构建虚拟小区,减少小区数量,从而降低低空节点的接入切换频率,提高低空通信服务的连续性和稳定性。

3.2 空天地一体化网络技术

尽管利用地面蜂窝网络实现低空覆盖扩展具有较高的可

行性,但这种方式受限于地面网络部署范围,在偏远地区网络覆盖程度低,且受自然因素的影响较大。对此可以考虑利用空天网络面向低空进行端到端传输覆盖,作为地面向低空覆盖扩展的补充。空天网络包含高空平台和卫星网络,基于3GPP Release 17标准开发的新空口(NR)接口技术,可以实现面向低空的终端直连,不受地形地貌的限制,为低空节点提供随时随地的按需通信覆盖。

对于活动高度不同、业务需求不同的飞行器,可考虑将地面网络与空天网络结合,形成面向低空的空天地一体化网络。地面网络与空天网络两者优势互补,互为备份,为低空提供分层分域的多维多频泛在覆盖,实现全场景的按需接入。如图4所示,对于120 m以下的空域,可利用地面网络

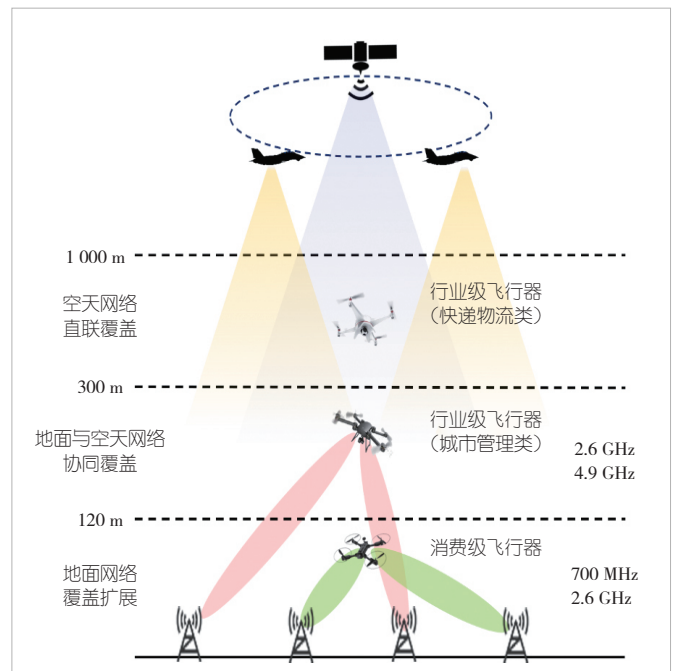


图4 空天地一体化低空覆盖场景示例

提供700 MHz和2.6 GHz的通信覆盖；对于120~300 m的空域，可采用地面网络2.6 GHz、4.9 GHz和空天网络协同覆盖；对于300 m以上的空域，可直接利用空天网络进行直联覆盖，实现全空域全场景的多维多频按需覆盖。这将有效促进低空经济的规范化、标准化以及进一步发展。

3.3 低空节点协同覆盖技术

低空节点协同可以在资源受限的场景下保障每个节点都能够得到服务。例如，基础设施部署较少的区域可能无法为所有低空节点提供直接覆盖，而低空节点通过协同动态组网，可实现基站到任意低空节点的多跳覆盖。在此基础上可进一步引入智能化决策机制，通过中心式的智能决策生成网络拓扑。例如，按照业务需求、信号强度等特征确定低空节点分簇方式，并实现低空节点拓扑的动态调控，从而实现更高效、更可靠的低空通信。随着低空飞行器及智能化的持续发展，未来各类飞行器将会搭载智能处理器，以实现低空节点的通算一体化。通过实时处理通信数据、智能分配通信资源和算力，可显著提高节点协同效率，从而为对时效性要求更高的低空飞行业务提供有力支撑。

4 地对空覆盖扩展实践效果及不足

目前中国运营商及相关企业都在着力建设面向低空覆盖的试验基地。我们联合中国移动成都产业研究院在四川省自贡市建立了地对空覆盖扩展试验基地。该基地包含10座实验级5G独立组网(SA)基站和7座公共基站，采用5G NR体制和2.6 GHz n41频段。依托试验基地，我们对300 m以下的立体空域进行了信号覆盖测试，测试结果表明，以SS-RSRP>-90 dBm为信号覆盖门限，全域信号覆盖率>94%。

尽管目前在地对空覆盖实测中可以实现良好的低空信号覆盖率，但仍存在几点不足。

1) 目前测试基地多建立于城郊，且测试所用终端较少，所受地面基站同频信号影响较小。在未来实际应用阶段，低空网络主要应用于城市场景，地面同频基站及低空用户增多。在这种情况下，如何保证和实测中相同的信号覆盖水平仍是一大挑战。

2) 低空飞行业务对高速数据传输和实时性要求较高。实现信号覆盖仅是面向低空通信的第一步。在确保信号覆盖的基础上，保障低空飞行航线指定区域的高速数据传输是未来发展的重中之重。

3) 低空通信不能完全依靠专网，这是因为它的修建和维护成本过于高昂。面向低空覆盖的网络需要和对地覆盖网络融为一体，通过智能基站动态调整覆盖模式，

实现低空/地面用户的无感切换、流畅服务。

5 低空经济未来的研究方向

5.1 低空通信与智能超表面

智能超表面(RIS)是由大量可编程元件组成的平面，每个元件可以被独立地编程调节，从而实现入射信号幅度和相位的智能调控^[9]。RIS可分为反射式RIS(R-RIS)、透射式RIS(T-RIS)以及同时透射及反射式RIS(STAR-RIS)，可针对不同应用场景辅助低空通信。

1) 密集城市场景：密集城市场景中楼宇林立，波束受遮挡严重，难以实现有效的直接覆盖。对此，可考虑在大厦侧墙上部署R-RIS，反射并增强来自地面和空天网络的信号波束，同时动态调整反射系数，消除来自其他基站波束的同频干扰，提高低空覆盖的有效性。

2) 城郊场景：城郊场景下能够部署R-RIS的载体较少，但由于信号遮挡不严重，因此可直接将T-RIS与地面基站天线结合，利用T-RIS的透射特征，操控电磁波的辐射特性，协同空天直连覆盖，实现不受现有波束模式限制的灵活低空覆盖。

3) 混合场景：对于覆盖需求种类多的场景，如同时面向低空及高层楼宇覆盖，可考虑将楼宇侧墙玻璃替换为STAR-RIS，通过灵活调整STAR-RIS的透射系数和反射系数，实现低空空域及高层楼宇室内的同时覆盖。

RIS具有低成本、低能耗、易部署的优点，相比于部署大量的基础设施和大规模天线阵列，通过部署大量低成本的、元件规模大的RIS来等效超大规模天线，可获得更高分集增益，实现更高能量效率、频谱效率的低空通信，并有助于提升感知定位精度。

5.2 通信感知定位一体化

目前，面向低空空域的管控和服务能力不足，这无疑限制了低空经济的发展。通过整合通信、感知、定位功能，网络可以在提供通信服务的同时收集周边环境的信息。这有助于降低网络部署难度，减小设备体积，并增强用户体验，提升定位精度。感知和定位功能赋能通信系统，实现高指向大增益通信。通信感知定位一体化关键技术研究涉及协议体系架构设计、天线设计等方面，需要兼顾通信、感知、定位业务需求及功能实现。在协议体系架构方面，可以复用5G核心网功能网元及架构，新增感知定位模块，并通过验证用户隐私设置，确保感知定位服务的合规性。在天线设计方面，需要兼顾异频天线的融合和天线的轻量

化。在此基础上,有望依托集中和分布协同、分布式自治网络实现空天地协同的高效通感定一体化。

6 结束语

低空经济正处于关键技术突破及技术标准化的重要阶段。低空经济相关的飞行业务具有特殊性,对数据传输速率和实时性需求较高。这对面向低空的覆盖扩展技术提出了挑战。本文介绍了利用现有地面通信系统向低空提供覆盖扩展的相关技术,例如协同覆盖、空天地一体化网络等,并梳理了低空通信与智能超表面结合、通感定一体化等研究方向,以支撑低空通信的后续研究。中国移动等运营商已建立5G-A低空专网,开展面向低空覆盖扩展的演示验证,部分网络已投入实际应用。无线通信系统服务对象的主体仍是地面用户,因此,在保障低空通信的同时,确保地面用户拥有高质量服务仍是无线通信系统的首要任务。因此,如何实现低空专网和现有5G网络的兼容仍需要深入研究。3GPP未来发布的Release 19正式标准以及后续版本标准将进一步规范面向低空的覆盖扩展技术。

参考文献

- [1] 中国政府网. 首次写入政府工作报告——“低空经济”加速起飞 [EB/OL]. (2024-04-02) [2024-11-25]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202404/content_6943071.htm
- [2] 3GPP. Study on enhanced LTE support for aerial vehicles (Release 15): 3GPP TR 36.777, V0.0.1 [S]. 2017
- [3] 3GPP. Radio resource control (RRC) protocol specification (Release 18): 3GPP TS 38.331, V18.0.0 [S]. 2024
- [4] 福建移动. 中国移动(成都)产业研究院, 华为技术有限公司, 等. 基于5G通信技术的无人机立体覆盖网络白皮书 [R]. 2021
- [5] 中国移动. 低空智联技术体系白皮书 [R]. 2024
- [6] 盛敏, 雷松涛, 刘俊宇, 等. 基于三角剖分优化的地对空无空洞协同覆盖方法: CN113596856B [P]. 2022-05-17
- [7] LIU J Y, SHENG M, LI J D, et al. Ground-to-air wireless coverage extension for 6G: a triangular prism structure-based approach [J]. Science China information sciences, 2024, 67(12): 224301. DOI: 10.1007/s11432-024-4221-x
- [8] WU Q Q, ZHANG S W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surface-aided wireless communications: a tutorial [J]. IEEE

transactions on communications, 2021, 69(5): 3313-3351. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3051897

作者简介



盛敏, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 空天地一体化综合业务网全国重点实验室主任, 科技部6G总体专家组成员, IEEE西安分会副主席, 中国电子学会会士, 国家级创新团队负责人, 青年女科学家团队负责人, 国家精品在线课程负责人, 担任《IEEE Wireless Communications》《China Communications》等多个期刊的编委会委员; 主要从事空间信息网络、移动通信网络、异构网络融合、无线自组织网络等领域的研究工作; 获国家技术发明奖二等奖2项、省部级一等奖3项。



陈旭晖, 西安电子科技大学在读博士研究生; 研究方向为空地一体化网络性能分析、低空网络组网等。



马兴业, 西安电子科技大学在读本科生; 研究方向为低空网络组网。



赵晨曦, 西安电子科技大学副教授、硕士研究生导师, 空天地一体化综合业务网全国重点实验室成员, 中国通信学会高级会员, 中国电子学会会士; 主要从事空地一体化网络组网及资源调度、低能耗移动通信网络资源调度、移动通信网络边缘缓存、多智能体强化学习等方面的研究工作。

通感低空覆盖关键技术与组网



Key Technologies and Networking in ISAC for Low-Altitude Coverage

林旭/LIN Xu, 刘涛/LIU Tao, 张诗壮/ZHANG Shizhuang,
施嵘/SHI Rong

(中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250313.0955.002.html>

网络出版日期: 2025-03-13

收稿日期: 2024-12-20

摘要: 通感一体化 (ISAC) 技术深度融合通信与感知能力, 将在重点低空区域实现通信与感知的无缝覆盖。为充分发挥面向低空经济的 ISAC 系统的潜力, 需要重点研究低空覆盖下通感一体化的关键技术与组网技术。系统阐述了波束成形与波束跟踪技术、人工智能 (AI) 赋能的 ISAC 技术、通信感知相互辅助增强技术、基于智能反射面 (IRS) 的 ISAC 技术, 以及通感一体化组网技术等。这些关键技术与组网技术, 能够有效提升低空覆盖场景下的 ISAC 系统的性能。

关键词: 通感一体化; 低空覆盖; 人工智能; 智能反射面; 通感一体化组网

Abstract: Integrated sensing and communication (ISAC) technology deeply integrates communication and sensing capabilities, and is anticipated to attain seamless communication and sensing coverage for critical low-altitude areas. To fully exploit the potential of ISAC systems oriented towards the low-altitude economy, it is necessary to focus on the key technologies and networking technologies. Beamforming and beam tracking technologies, artificial intelligence (AI)-empowered ISAC technologies, mutual assistance and enhancement between communication and sensing technologies, ISAC technologies based on intelligent reflecting surfaces (IRS), and ISAC networking technologies are systematically described. These key technologies and networking technologies can effectively improve the performance of the ISAC system in low-altitude coverage scenarios.

Keywords: ISAC; low-altitude coverage; AI; IRS; ISAC networking

引用格式: 林旭, 刘涛, 张诗壮, 等. 通感低空覆盖关键技术与组网 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 53-57. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501009

Citation: LIN X, LIU T, ZHANG S Z, et al. Key technologies and networking in ISAC for low-altitude coverage [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 53-57. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501009

1 通感低空覆盖场景

1.1 低空经济热潮

低空经济以低空空域资源为基石, 目前已在多个领域掀起发展热潮。2021年, 低空经济的概念首次被写入国家规划。2024年12月27日, 国家发展和改革委员会宣布成立低空经济发展司。可以预见, 低空经济将在中国迎来更加明晰的未来战略规划和政策引导。

技术驱动是低空经济发展的重要推动力和根本保障^[1]。无人机技术、人工智能 (AI) 技术等都是其发展的强劲动力。其中, 通感一体化 (ISAC) 技术作为信息化技术的关键代表, 在传统基站通信功能的基础上附加上了感知能力, 可用于航迹监测、低空安防等, 已成为业界公认的关键技术。

1.2 关键应用场景

通感一体化是未来通信系统的一个重要方向^[2-4], 有机

结合了感知与通信的功能, 使得网络不仅仅传递信息, 还能够实时感知环境和用户状态, 为低空覆盖各种应用场景提供更为智能的服务。如图1所示, 为了保障低空覆盖场景的应用, 通感一体化系统中的通信与感知功能需要实现融合协作。中兴通讯推出的低频以及高频毫米波的通感一体化基站兼具通信和感知功能, 采用了连续波和脉冲波组合的感知结构设计以及大张角的大规模天线阵列设计, 可满足低空全覆盖的要求, 助力低空场景的应用。

低空覆盖下无人机的可靠通信能力是低空通信的重要保障^[5], 其适用于外卖快递、医疗冷链、巡查巡检和应急救援等多种应用场景。低时延通信可保障飞行状态的实时上报。通感基站需要提供低空大面积连续覆盖, 保证通信链路稳定可靠, 满足边缘速率要求^[6]。

低空安防是低空覆盖需要支持的关键场景之一, 涉及非法入侵检测、无人机航线保护等。无人机非法入侵场景通常发生在无人驾驶航空器管制空域。对此, 通感基站需要对该

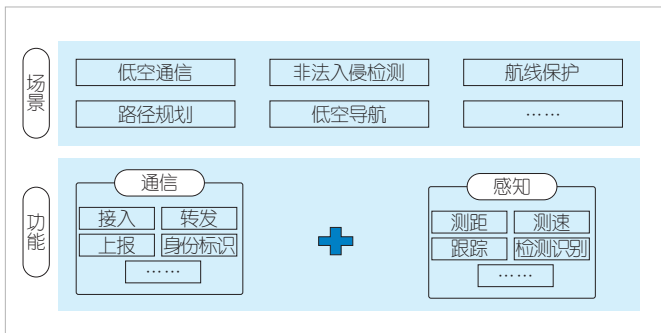


图1 低空覆盖关键应用场景及主要功能示意图

区域进行全覆盖感知，不仅要满足探测距离、探测高度、顶空盲区、感知精度和虚警概率等要求^[6]，还需要借助探测手段识别飞鸟、不同型号无人机等目标，并对非法飞行进行监测。

针对无人机路径规划和跟踪导航，通感基站会辅助进行无人机三维位置等信息的感知。当无人机在自身导航系统失灵等特殊情况下偏离预设路线或即将发生冲突碰撞时，通感基站及时发挥作用，提供外部感知支持，协助无人机完成路径规划和跟踪导航。

在这些低空应用典型场景中，ISAC系统对低空飞行器和周边环境进行实时信息交互和全面感知，使低空覆盖场景资源配置和经济效率得到优化。这凸显了通感一体化在低空经济中的重要作用。

2 低空覆盖关键技术

2.1 波束成形与波束跟踪技术

在ISAC系统中，波束成形通过调控波束的方向来对准通信目标或者感知目标，以充分利用空间增益，提升相应性能。低空覆盖关注的无人机目标既有“低、慢、小”的，也有“高、快、大”的。无人机的高移动、自身抖动等特性使得传统的波束成形与跟踪方案难以适用。在满足低空无缝覆盖的前提下，如何克服环境影响并构建稳健波束，以及如何进行精准的波束跟踪设计以实现性能提升，是具有挑战的难题。

由于低空覆盖场景复杂多样并且无人机具有高移动性和高抖动性，加上通感一体化系统需要同时满足通信与感知的性能要求，现有针对地面蜂窝网络的波束成形与波束跟踪技术难以满足其需求。为进一步提升通信与感知性能，需要在现有波束成形与跟踪技术的基础上，对波束成形与波束跟踪技术进行深入研究^[7-9]。在波束成形与波束跟踪过程中，可以通过超大规模阵列下的模拟数字混合波束扫描来提升通信和感知性能。为满足低空覆盖，减少覆盖区域空洞，高低频场景都可以加密波束。此外，为提升系统性能，也可以对自适应波束成形和波束跟踪算法进行设计。

综上所述，针对低空覆盖通感一体化场景需求以及无人机特性，设计稳健的波束成形与高效的波束跟踪方案，有助于提升面向低空覆盖的通感一体化系统的整体性能。

2.2 AI赋能的ISAC技术

AI赋能的通感一体化技术是5G-A/6G网络的关键技术，将大幅提升感知与通信性能^[10-11]。利用人工智能算法与感知技术，AI赋能的ISAC技术能够高效实时地完成目标检测、识别、跟踪和预测等。其中，系统可以利用AI技术对大量来自通感基站和各种感知设备的感知信息进行实时处理，并对感知对象进行自动识别、分类、动态跟踪和轨迹预测等，从而提高感知的准确性和实时性，如图2所示。AI赋能的协作感知技术能够通过多设备协同感知整合网络中的多源感知信息，并利用智能融合与预处理等方法来提升全局感知能力。通过算法设计和大规模数据训练，对复杂环境中目标识别和分类的鲁棒性将大大增强。

AI算法能够用于通感一体化系统的信道估计、波束成形与波束跟踪算法设计中^[12]。其中，AI算法可以提升信道估计精度，并辅助快速波束成形与自适应调整，以适应无人机的抖动和信道的变化。更进一步地，AI算法可以进行环境变化预测并辅助完成参数自适应调整。此外，AI算法还可用于通感组网的智能化架构设计，从而提升网络性能。

AI赋能的ISAC技术具有良好的低空覆盖应用前景。AI有助于提升通感一体化系统在复杂环境条件下的感知与通信能力，同时能够为多场景应用提供高效、智能的解决方案。然而，AI赋能通感一体化系统仍面临着许多挑战，例如：

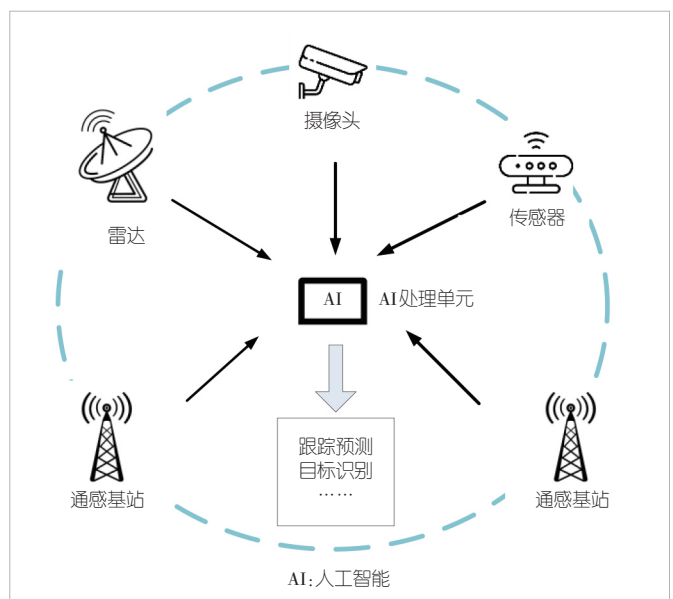


图2 AI赋能的通感一体化技术

需要设计低复杂度的AI算法来减轻算力资源负担^[13]；在动态复杂环境下，需要保证AI算法具有稳定的自适应能力；在通感一体化系统的应用过程中，数据传输安全和感知任务隐私保护也需要予以考虑。

综上所述，AI赋能的ISAC技术通过加强感知数据分析处理能力、提高信道估计精度、优化波束成形与跟踪、实现环境预测自适应以及优化组网架构等，使得低空覆盖的通感一体化系统的感知、通信性能以及智能化水平得到明显改善。

2.3 通信与感知相互辅助增强技术

在通感一体化系统中，通信与感知的融合不仅包括硬件、信号、频谱等的共享，还包括两者功能的融合促进与辅助增强。高速可靠的通信能力为感知数据的汇聚和传输提供保障，而感知能力也可以反哺通信，提升通信性能。

在低空覆盖ISAC系统中，可利用通信网络来支持多通感基站协同感知。如图3所示，各通感基站可相互分享感知结果，并尝试对周边环境进行联合感知，形成统一的认知，显著提高定位、轨迹跟踪的效果。同时，通感基站通过对无人机、环境的感知可辅助提升通信的性能^[14]。其中，利用感知到的环境及无人机的位置、姿态等信息，可辅助估计更精准的通信信道，提升通信系统容量。另外，感知也可以辅助通信进行无线资源管理。具体地，感知可以辅助通信进行波束自适应调整，利用感知信息来完成波束成形方案的设计。例如，当环境中没有无人机时，系统不发送低空同步信号块（SSB）波束；当基站感知到无人机时，系统根据无人机的位置选择合适的波束发送SSB和业务信息。

在低空覆盖通感一体化系统中，如何进一步结合波束成形、AI、波形设计等技术，有效发挥通信与感知相互辅助增强功能，是ISAC系统不断演进、充分融合的重要方向。

2.4 基于智能反射面的ISAC技术

智能反射面（IRS）作为6G的关键核心技术之一，通过在环境中部署可编程的反射元件来调控无线信号的传播，能

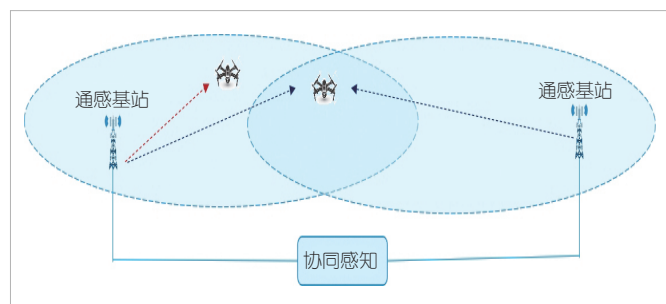


图3 通信辅助完成协同感知

够有效改善无线通信系统的性能^[15]。在通信系统中应用IRS，能有效改善信号传播环境，减少传统信道中的衰减、干扰和遮挡影响。IRS结合ISAC系统能够有效提升感知性能^[16]。如图4所示，借助IRS对入射信号进行动态调控（如幅度、相位控制等），可改善信道环境，增强通信链路质量，同时能够扩大感知覆盖范围，提高对无人机目标的感知精度^[17]。

在图4所示的系统中，IRS可以作为回波信号中继来提供非视距（NLOS）感知功能，扩大了感知覆盖范围，并且增加了额外的感知路径。此外，在IRS辅助下的波束成形与波束跟踪技术可使系统实现对动态无人机的精准定位和跟踪。这有助于IRS赋能的通感一体化系统扩大感知覆盖范围，提高系统的鲁棒性。同时，结合优化算法与强化学习对IRS进行动态配置，可实现ISAC系统中通信与感知性能的联合优化。

具体而言，IRS具有以下优势：一方面，通过精确设计相移矩阵，智能排列的无源反射元件可以独立控制入射信号的相移和幅度，实现对无线信号的灵活调控，为感知提供盲区覆盖并提高感知性能^[17]；另一方面，IRS能够增强接收信号，抑制干扰，继而提升通信性能^[15]。这使得IRS技术在低空覆盖场景下具有重要的应用价值。

然而，IRS应用于低空覆盖的通感一体化系统仍面临一些挑战。由于IRS引入额外的空间自由度，波束成形算法需要进行相应的调整优化。如果部署在无人机上，IRS在高动态场景下需要进行频繁的相移矩阵计算，这会带来较高的能耗^[12]。此外，无人机飞行抖动效应会增加IRS的相移矩阵校正难度^[18]，影响系统性能的提升。因此，在低空覆盖场景下，我们需要深入研究能耗低、稳定性高的IRS设计方案。

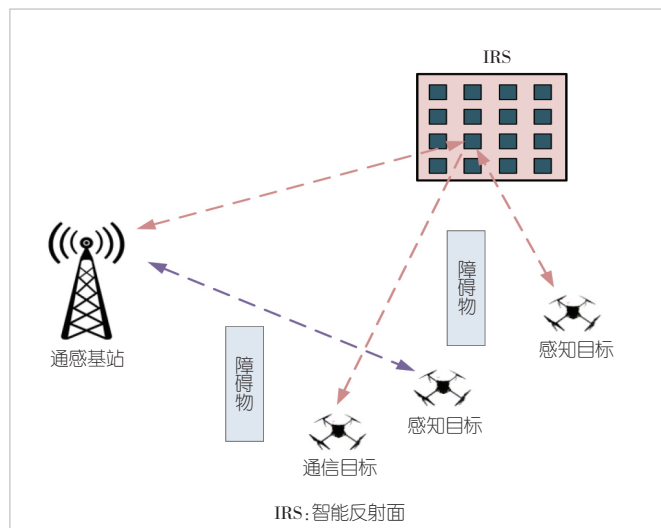


图4 基于IRS的通感一体化系统

3 组网技术

3.1 通感一体化组网

为保障低空区域内目标的无缝感知覆盖并突破单站点感知能力的瓶颈，通感一体化组网协同感知已成为发展的趋势。通感一体化组网可以充分利用移动通信系统中的宏微基站站址资源^[19]，这样能够降低通感一体化的成本，提升感知的组网能力。宏微基站的协同感知方式多种多样，可以通过选择感知节点进行感知结果共享，也可通过多点同时感知来互相补充或合并融合感知数据^[20]。采用灵活的协同感知方式不仅可以有效提升感知性能，还可以提升网络的服务能力。

宏微基站组网是构建移动通信网络的基础，它通过宏基站和微基站联合组网来保障网络性能^[20]。在引入感知功能(SF)之后，网络的能力从传统的通信能力转变为结合通信和感知的“双维度能力”。当感知任务比较复杂且单站无法满足要求时，可进行多站协同感知。充分利用各个通感基站的优质能力，补充或者合并融合待处理数据，可以提升协同感知性能。选择合适的感知节点能够进一步提升协同感知性能，其中可以利用AI算法智能选择感知节点。此外，SF支持分布式架构和集中式架构，可满足各类政企客户以及运营商客户的灵活组网场景需求。

不同于传统地面通信，通感一体化组网需要考虑更多的因素^[21]，例如：复杂多样的感知业务需求、感知网络规划指标、感知信道模型参数以及协同感知的具体形式。要实现通感一体化组网，首先要结合业务需求，明确各项通信网络指标与感知网络指标的具体要求，继而结合具体的低空覆盖应用场景特征，制定合理的组网规划方案。同时，针对不同的感知环境、感知需求以及网络拓扑，设计有效的协同感知方案也是重要的课题。

3.2 干扰控制

不同于地面通信，低空覆盖通感基站规模组网会带来额外的感知干扰。这些干扰主要有杂波干扰、自干扰、通信对通信的干扰、通信对感知的干扰以及感知对感知的干扰。其中，通信对感知的干扰包括同频干扰和邻频干扰，感知对感知的干扰如低空小区间组网带来的感知信号间干扰。

在低空覆盖场景下，小区重叠覆盖程度较大，无人机与同频邻区间上下行通信干扰严重。而以用户为中心的无蜂窝大规模MIMO(CF-mMIMO)能有效降低干扰水平^[22]。CF-mMIMO网络可以协调控制分布式天线节点的信号发射，通过减少传播路径的重叠来抑制低空复杂组网场景下通信对通信的干扰。当通感基站和地面通信基站进行插花组网时，地

面通信基站下行信号的发送会对感知信号的接收产生干扰。针对通信对感知的干扰，可以采用协调规避的方案，即在干扰小区对应时隙/符号上不发任何信号。在通感自发自收模式下，中兴通讯结合连续波和脉冲波的不同优势来提升感知范围，即连续波完成近距离感知，脉冲波完成中远距离感知。此时，感知对感知的干扰主要包括连续波的自干扰、同站扇区间干扰、站间干扰，以及脉冲波的站间干扰等^[21]。目前，人们主要通过提高设备隔离度来降低自干扰，设计干扰消除算法来削弱干扰影响，以及采用扇区间梳分、站间时分、站间频分等资源分配方式来规避干扰^[21]。此外，对于环境杂波干扰，也可采用虚警抑制、AI目标识别消除等方法来抑制。

总的来说，对于干扰问题，可以采用干扰协调以及干扰消除技术加以解决。在面向低空覆盖的ISAC系统中，为了实现组网场景下的干扰协调，可以充分考虑时域、频域、空域和码域等多个维度进行正交资源分配^[12]，以满足不同类型服务和不同场景的需求。同时，还可以通过灵活设计调度方案来进一步降低干扰的影响。干扰消除技术则从一体化波形设计、波束成形以及多点协作^[23]等方面来削弱干扰信号的影响。在低空组网的背景下，如何充分利用感知资源，引入自适应感知资源分配方案进行干扰协调，并且有效进行干扰消除，甚至在完成干扰识别后利用干扰实现低空绿色经济，是低空覆盖场景的关键问题之一。

4 结束语

本文旨在对低空覆盖下通感一体化的关键技术与组网技术展开介绍。首先基于通感一体化，剖析低空经济的主要应用场景，论述通感一体化系统在其中起到的关键作用。随后介绍波束成形与波束跟踪技术、AI赋能的ISAC技术、通信感知相互辅助增强技术，以及基于IRS的ISAC技术。其中，波束成形与波束跟踪技术通过调节大规模天线阵列的波束方向和形状，可有效应对低空环境中的信号衰减和干扰影响，提升系统性能；而AI赋能的ISAC技术将人工智能算法引入数据分析处理环节，可协助实现对目标的实时感知、识别与跟踪等，增强低空覆盖ISAC系统的智能化水平；通信感知相互辅助增强技术凸显了通感一体化系统的技术优势；基于IRS的ISAC技术引入了NLOS自由度，有望进一步提升感知和传输性能。低空经济通感一体化组网通过协同感知提高了通感性能，而组网干扰控制技术可以紧密结合波束成形、AI等关键技术，通过干扰协调、干扰抑制算法等进一步保障低空通感网络在复杂组网环境下的性能。除了以上技术之外，适配低空覆盖场景的通感一体化波形设计、基于虚拟阵列的多天线感知等技术，同样具备较高的研究价值。

致谢

感谢中兴通讯股份有限公司艾星星、李永彪、程巍、李军、李增、马聪等专家对本研究做出的贡献!

参考文献

- [1] 夏泳, 田洛. 面向低空经济的空联网络组网关键技术研究综述 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2024, 36(4): 619–632. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.202407020164
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书 [R]. 2021
- [3] LIU F, CUI Y H, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1728–1767. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632
- [4] 刘光毅, 楼梦婷, 王启星, 等. 面向6G的通信感知一体化架构与关键技术 [J]. 移动通信, 2022, 46(6): 8–16. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.002
- [5] MU J S, ZHANG R H, CUI Y H, et al. UAV meets integrated sensing and communication: challenges and future directions [J]. IEEE communications magazine, 2023, 61(5): 62–67. DOI: 10.1109/MCOM.008.2200510
- [6] 赵川斌, 罗宏亮, 高飞飞. 基站对低空无人机通感算一体化应用组网研究 [J]. 移动通信, 2024, 48(9): 57–63, 70. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20240511-0001
- [7] ZHAO N, WANG Y L, ZHANG Z B, et al. Joint transmit and receive beamforming design for integrated sensing and communication [J]. IEEE communications letters, 2022, 26(3): 662–666. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3140093
- [8] CUI Y P, ZHANG Q X, FENG Z Y, et al. Seeing is not always believing: ISAC-assisted predictive beam tracking in multipath channels [J]. IEEE wireless communications letters, 2024, 13(1): 14–18. DOI: 10.1109/LWC.2023.3303949
- [9] ZHANG Y B, LI Q, WANG J J, et al. Toward throughput maximization of integrated sensing and communications enabled predictive beamforming for 6G [J]. IEEE network, 2024, 38(4): 292–300. DOI: 10.1109/MNET.2023.3326067
- [10] WEI Z Q, QU H Y, WANG Y, et al. Integrated sensing and communication signals toward 5G-A and 6G: a survey [J]. IEEE Internet of Things journal, 2023, 10(13): 11068–11092. DOI: 10.1109/JIOT.2023.3235618
- [11] ZHANG Y F, GAO Z, ZHAO J J, et al. AI empowered channel semantic acquisition for 6G integrated sensing and communication networks [J]. IEEE network, 2024, 38(2): 45–53. DOI: 10.1109/MNET.2024.3354264
- [12] 吴韵怡, 刘晨熙, 蔡昌俊, 等. 面向6G智能协作感知的无人机通信系统 [J]. 移动通信, 2023, 47(9): 77–83. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20230909-0001
- [13] WU N, JIANG R K, WANG X Y, et al. AI-enhanced integrated sensing and communications: advancements, challenges, and prospects [J]. IEEE communications magazine, 2024, 62(9): 144–150. DOI: 10.1109/MCOM.001.2300724
- [14] 李佳澎, 张奇勋, 马丁友. 通感一体化中感知辅助通信的发展现状与展望 [J]. 移动通信, 2023, 47(9): 96–100. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20230911-0001
- [15] JI B F, HAN Y, LIU S W, et al. Several key technologies for 6G: challenges and opportunities [J]. IEEE communications standards magazine, 2021, 5(2): 44–51. DOI: 10.1109/MCOMSTD.001.2000038
- [16] YU Z Y, REN H, PAN C H, et al. Active RIS-aided ISAC systems: beamforming design and performance analysis [J]. IEEE transactions on communications, 2023, 72(3): 1578–1595. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3332856
- [17] 夏方昊, 王新奕, 郑重. 智能超表面辅助通信感知一体化 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(3): 58–62. DOI: 10.12142/ZTETJ.202203010
- [18] 刘晨熙, 马睿, 彭木根. 无人机通信感知一体化: 架构、技术与展望 [J]. 电信科学, 2023, 39(2): 1–9. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023029
- [19] 中国通信学会. 通感算一体化网络前沿报告(2021年) [R]. 2021
- [20] 刘家祥, 蒋峥, 孙震强, 等. 6G通感一体化组网融合技术 [J]. 移动通信, 2022, 46(5): 56–61. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2022.05.009
- [21] 中国移动. 5G-A通感一体典型场景技术解决方案白皮书 [R]. 2024
- [22] ZHENG J K, ZHANG J Y, DU H Y, et al. Mobile cell-free massive MIMO: challenges, solutions, and future directions [J]. IEEE wireless communications, 2024, 31(3): 140–147. DOI: 10.1109/MWC.004.2300043
- [23] 尉志青, 牛阳阳, 王溢, 等. 通信感知一体化干扰管理: 现状与展望 [J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(6): 31–39, 88. DOI: 10.13190/j.jbupt.2022-125

作者简介



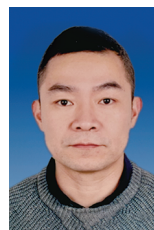
林旭, 中兴通讯股份有限公司算法部高级系统工程师; 主要研究方向为无线通信信号处理、通信感知一体化等; 发表论文10余篇, 申请专利近20项。



刘涛, 中兴通讯股份有限公司算法部部长; 主要研究方向为5G、5G-A物理层先进赋形算法和接收机技术; 发表论文3篇, 申请专利20余项。



张诗壮, 中兴通讯股份有限公司无线及算力研究院副院长, 教授级高工; 主要研究方向为5G-A、NTN和6G等; 主持完成信源编码、统一移动网络硬件平台、5G大容量基带池等重大项目, 为中国移动通信系统关键技术创新做出了重要贡献; 获2016年国家科技进步奖特等奖1项; 发表论文5篇, 申请专利10余项。



施嵘, 中兴通讯股份有限公司无线及算力研究院院长; 主要研究方向为无线通信、智算等; 主持国家级项目1个、企业级项目15个; 2021年, 获国家科学技术进步奖; 发表论文2篇, 申请专利3项。

基于X86通用硬件平台的高性能5G核心网UPF实现



High-Performance 5GC UPF Based on X86 Hardware Platform

李勇/LI Yong¹, 马建伟/MA Jianwei¹, 应晓冬/YING Xiaodong¹,
娄方亮/LOU Fangliang², 蔡茹莹/CAI Rujun¹

(1. 英特尔(中国)有限公司, 中国 上海 200241;
2. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)
(1. Intel (China) Ltd, Shanghai 200241, China;
2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250219.1538.004.html>

网络出版日期: 2025-02-20

收稿日期: 2024-08-15

摘要: 5G网络应用对核心网用户面网元(UPF)性能提出了更高要求。研究了基于X86通用硬件平台的高性能5G核心网UPF方案,通过利用第三代至强处理器和800系列网络适配器的内置硬件特性,不需要额外的专用硬件加速器,使UPF整机转发吞吐量可达462 Gbit/s。该方案对动态设备个性化(DDP)技术进行了深度开发,实现了UPF整机转发吞吐量比前代平台提升334.8%、转发延迟降低50.7%的性能突破,并可以有效节省系统总体成本。

关键词: 5G核心网; UPF; 至强处理器; DDP技术

Abstract: High-performance 5G core (5GC) user plane function (UPF) is critical to meet the needs of 5G network applications. A high-performance 5GC UPF solution is proposed in this paper, based on the hardware features of the 3rd Gen Intel Xeon Scalable processors and Ethernet 800 Series Network Adapters, without any additional hardware acceleration. Test results indicate that the forwarding performance can reach up to 462 Gbit/s. This UPF solution achieves 334.8% throughput improvement and 50.7% latency reduction compared with the previous generation hardware platform, based on the deep development of dynamic device personalization (DDP) technology. It can also cut down total system cost.

Keywords: 5GC; UPF; Intel Xeon processor; DDP technology

引用格式: 李勇, 马建伟, 应晓冬, 等. 基于X86通用硬件平台的高性能5G核心网UPF实现[J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 58-62. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501010

Citation: LI Y, MA J W, YING X D, et al. High-performance 5GC UPF based on X86 hardware platform [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 58-62. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501010

业务场景的创新和数据使用量的激增驱动着移动通信网络持续演进。5G网络正在全球范围内推进商用部署。5G采用网络功能虚拟化(NFV)技术和软件定义网络(SDN)技术,使网络架构进一步解耦和IP化。基础设施层以X86通用服务器为主,通过云化硬件资源承载上层网络功能,相比于传统专用硬件架构,其在资源调度、部署效率、备灾修复和运维成本等方面具有显著优势^[1-3]。5G核心网基础设施层主要采用英特尔至强系列处理器。近年来,至强系列占中国X86通用服务器市场近9成^[4]。

5G核心网分为控制面和用户面,基于服务化架构可拆解为包括UPF在内的各个网络功能组件,通过应用程序接口连接,可面向多样化的业务需求进行灵活部署。用户面网元(UPF)作为5G核心网的关键组件之一,承载着用户数据处

理及转发的重要功能,直接影响网络效率和用户体验,对带宽、时延、稳定性要求较高^[5-7]。因此,打造高性能UPF是实现高速率、低时延、大连接5G网络应用的必要一环。

UPF的性能由组网架构、硬件平台、部署策略等多方面因素决定。2020年,中兴通讯基于第二代至强6230N处理器和频率分组技术(SST)使UPF整机性能达到173 Gbit/s^[8]。同年,三星基于第二代至强8280处理器,通过云原生架构软件优化,使UPF整机性能达到305 Gbit/s^[9]。本方案主要从硬件平台的角度切入,基于第三代至强平台和中兴通讯5G Common Core核心网方案,进一步提高5G核心网UPF性能。一方面,发挥通用硬件平台的内置优势特性,包括多核处理器的虚拟化配置、SST技术、数据平面开发套件(DPDK)、万兆以太网卡动态设备个性化(DDP)技术等,不需要额外

的现场可编程门阵列 (FPGA)、专用集成电路 (ASIC)、图形处理器 (GPU)、神经网络处理器 (NPU) 等硬件加速^[10-11]；另一方面，5G Common Core方案基于云化硬件资源而设计，控制面集中式部署，用户面分布式部署^[12]。其中，用户面UPF基于矢量数据包处理 (VPP) 框架，采用消息多队列无锁处理、业务首包深度报文解析 (DPI)、流表等技术，与底层通用硬件平台相辅相成，充分发挥硬件平台性能。

1 硬件平台技术

1.1 系统架构

本方案将两台至强服务器分别作为控制节点和计算节点。虚拟化UPF部署于计算节点上，通过用户面N3/N6接口完成用户数据流在基站和公用数据网之间的上下行转发。系统整体架构如图1所示，其中每台服务器搭载1—4路处理器和多块网络适配器。

1.2 硬件特性

第3代至强处理器采用10 nm工艺，最高配有40个高性能处理器核，支持8通道DDR4—3200 MT/s，拥有64条PCIe 4.0、3条UPI通道。该处理器的主要特性表现在以下几个方面：在网络工作负载方面，相比于前代平台，可实现32%~97%的性能提升，支持DPDK方案替代内核网络协议栈转发模式，满足UPF性能要求；在安全方面，支持软件保护扩展 (SGX)、平台固件恢复 (PFR)、加解密加速技术 (QAT) 等，满足通信领域的安全要求；在性能控制方面，采用SST技术，使当前运行高优先级任务的处理器核运行在更高频率，而其他处理器核保持在较低频率，在确保性能稳定的同时最大限度地控制能耗，优化系统运行成本。

英特尔800系列网络适配器以PCIe 4.0接口与处理器互

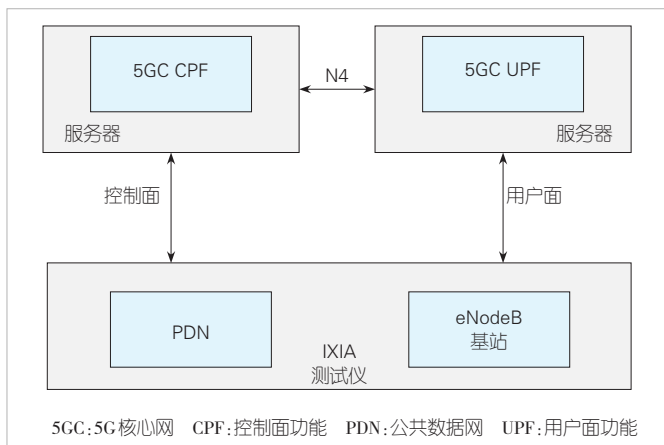


图1 系统整体架构

连，网络侧支持1~4个以太网端口，单端口支持100、50、25、10、1 GbE多档速率，最大支持200 Gbit/s吞吐量。DDP技术具备使网卡硬件部分可编程等功能，使网卡硬件具备部分可编程能力，通过加载固件配置文件 (profile)，可以动态解析内层报头，配置特定通信协议的数据包转发流水线，结合网卡的流引导 (FDIR) 和散列 (RSS) 技术，实现网络报文解析及分发功能的硬件卸载。800系列网络适配器涵盖多种协议类型的配置文件，除了传输控制协议 (TCP)、用户数据报协议 (UDP)、互联网协议 (IP)、虚拟扩展局域网协议 (VxLAN) 等通用协议外，还包括GPRS隧道协议 (GTP)、以太网上点对点协议 (PPPoE)、互联网安全协议 (IPSec)、二层隧道协议 (第三版) (L2TPv3)、分组转发控制协议 (PFCP)、多协议标签交换 (MPLS) 等电信网络协议^[8]。

1.3 DDP技术应用

核心网UPF作为用户面数据流通道，海量数据经网卡流入。在传统UPF方案中，网卡无法解析GTP报文的内层报头，只能缺省地认定其为普通四层报文。处理器则需要分配若干核专门负责数据分发，即以软件方式完成内层报头解析，再分发至不同处理器核进行处理转发，如图2所示。一般情况下，多核处理器负责分发和转发的核数比约为1:2。这种方式会占用处理器的算力资源，加重UPF系统的数据处理延迟，并且往往使分发核成为整个系统的性能瓶颈。

为此，我们采用DDP技术，优化UPF系统的数据流框架，如图3所示。网卡通过加载DDP固件配置文件，扩展报

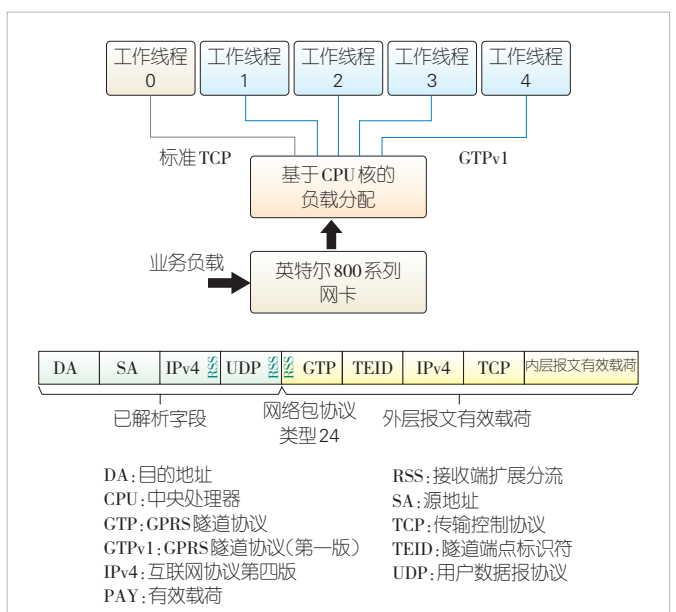


图2 使用处理器核分发的数据流框架

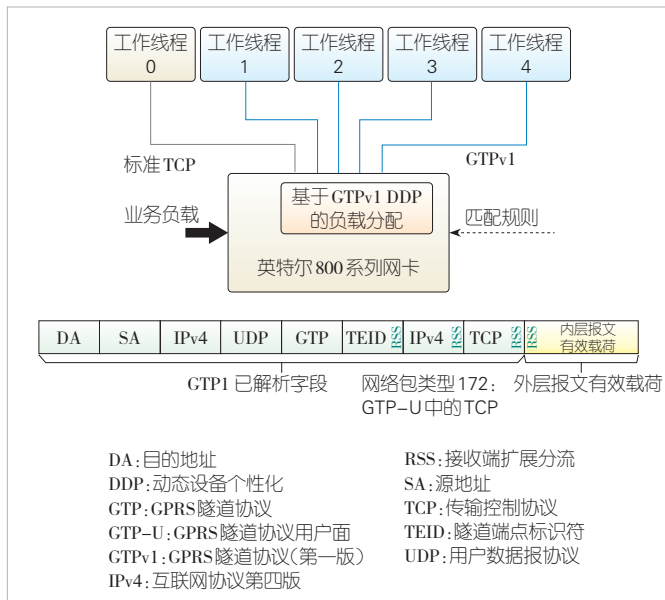


图3 使用动态设备个性化技术的数据流框架

文识别内层报文的传输层，可直接在网卡上对内层报文使用FDIR和RSS功能，将其散列于不同的网卡队列，再送至不同的处理器核并行处理。由于报文分发到队列的全流程由网卡完成，无需处理器分配专用的接收（RX）核或发送（TX）核，因此相应的核资源得以释放，提升了系统性能。从NFV架构的角度看，底层硬件平台中网卡和处理器各司其职，整个系统更具确定性，延迟与抖动也能在一定程度上得到改善。

在此基础上，本方案对DDP功能进行二次深度开发，使来自相同终端IP地址的所有数据包分类分发到同一网卡队列，再由固定的处理器核以运行到完成（RTC）模式处理。为了绑定处理器核与报文IP地址，需提取上行链路的GTP-U封装报文的源地址和下行链路的普通IP报文的目的地地址，经由DDP技术修改GTP-U协议和普通IP报文类型的匹配关键字作为数据分发规则。此方案保证同一个用户的上下行数据始终在同一个处理器核上进行处理，减少了核间通信，可以充分将用户的上下文信息保存在对应缓存中，实现了非对称报文的对称哈希和双向流亲和性，提升了整个UPF系统性能。另外，利用用户IP做哈希，系统在5G控制面上可以预先算出某个用户的数据会在哪一个核上处理，以便于提前将用户的管理核策略信息推送至特定核上。

2 方案配置

2.1 测试拓扑

部署5G核心网控制面功能和用户面功能的两台服务器（中兴通讯5300 G4X）通过交换机（中兴通讯5960-4M）连接

到IXIA测试仪（IxNetworks-XGS2）。测试仪模拟5G移动用户端经由运营商基站接入网络的控制面和用户面业务，系统运行于中兴通讯TECS云管理平台。相关测试拓扑如图4所示。每台服务器搭载2路第三代至强处理器（6330N×2或8380×2），每路6330N处理器配备2块800系列网络适配器（E810-CQDA2），每路8380处理器配备3块800系列网络适配器。

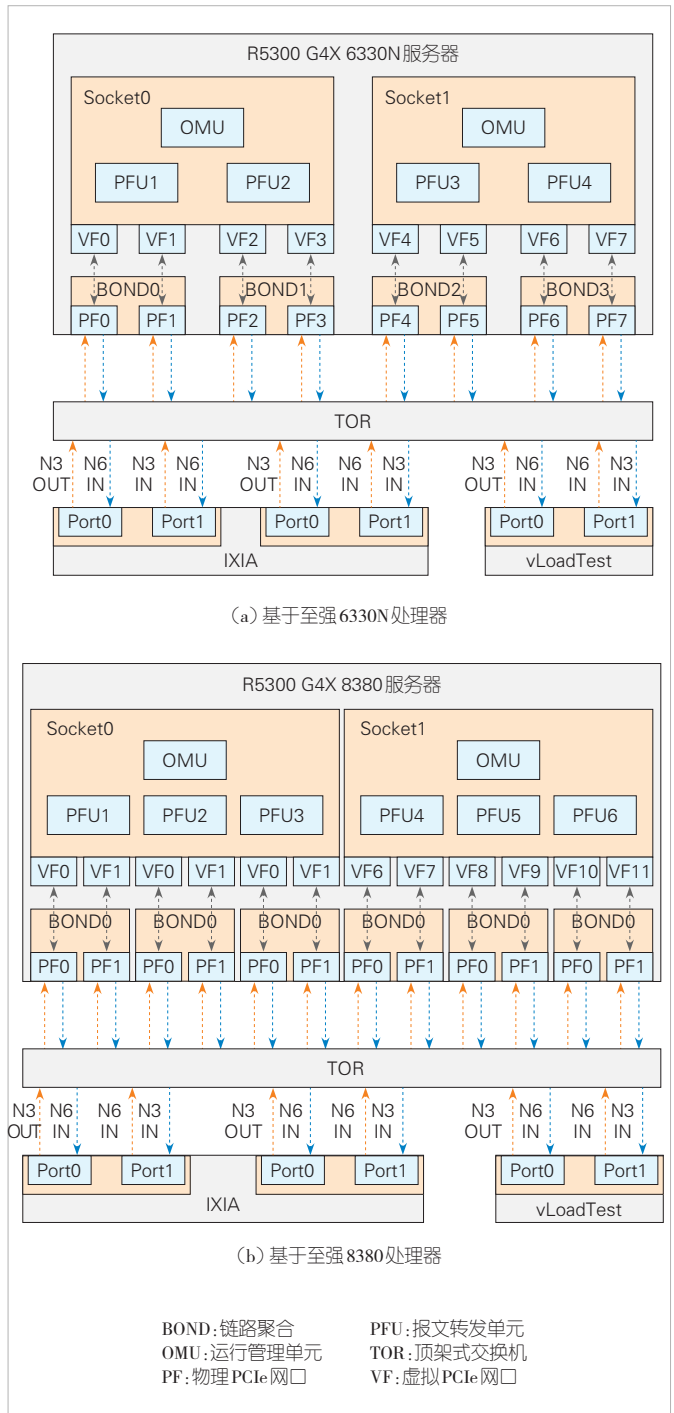


图4 基于英特尔至强6330N和8380处理器硬件平台的测试拓扑

2.2 虚机配置

在用户面网元的虚机配置方面，6330N处理器有28个物理核，超线程得到56个虚拟核，每路6330N部署1个运行管理单元（OMU）虚机和2个报文转发单元（PFU）虚机；8380处理器有40个物理核，超线程得到80个虚拟核，每路8380部署1个OMU虚机和3个PFU虚机。其中，每个OMU占用4个虚拟处理器核，每个PFU占用24个虚拟处理器核。

2.3 测试模型

按照运营商标准话务测试模型进行测试，主要参数设置如下：最大可接入用户数为600 000，实际接入用户数为6 000；内容计费配置方面，7层为40 000条，3—4层为10 000条；策略与计费控制方面，静态策略45，动态策略5；流量比例方面，HTTP流量占比85%，UDP流量占比15%；平均包长为690字节。

3 测试结果

3.1 转发性能

首先测试UPF的基本转发性能和带业务处理能力的转发性能，测试结果如图5所示。带业务处理能力指的是UPF使能离线计费和DPI功能。基于6330N处理器，不使能DPI等业务处理能力的UPF转发吞吐量达到287 Gbit/s（51.3 MPPS），工作线程平均利用率达到84%；使能DPI等业务处理能力的UPF转发吞吐量达到177 Gbit/s（31.6 MPPS），工作线程平均利用率达到85%。基于8380处理器，不使能DPI等业务处理能力的UPF转发吞吐量达到462 Gbit/s（81.4 MPPS），工作线程平均利用率达到83%；使能DPI等业务处理能力的UPF转发吞吐量达到280 Gbit/s（49.4 MPPS），工作线程平均利用率达到84%。显然，两种型号的处理器硬件

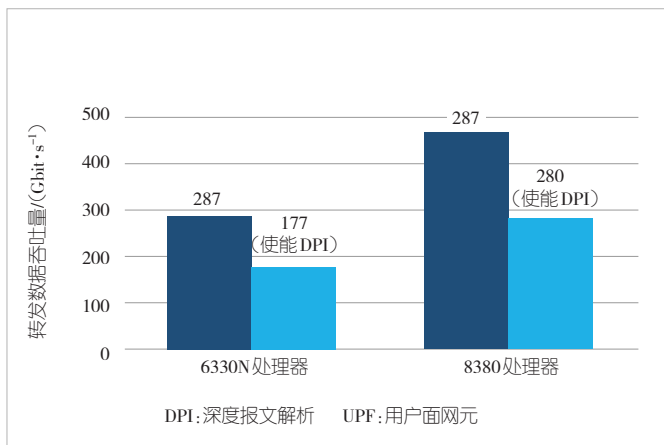


图5 基于第3代至强6330N处理器和8380处理器的UPF性能

自身性能都得到了充分发挥。

我们比较了通用硬件平台的升级和硬件技术的创新对UPF性能的综合影响，并选取第1代至强处理器的同档型号6138和第2代至强处理器的近似型号6230N作为参考，结果如图6所示。与前两代硬件平台相比，基于第3代至强6330N的UPF转发数据吞吐量显著提升。其中，第2代和第3代硬件平台都具备DDP功能，在不使能DPI等业务处理能力的设置下，与不带DDP功能的第1代硬件平台相比，吞吐量分别提升162.1%和334.8%。随着第2代硬件平台到第3代硬件平台的迭代升级，UPF吞吐量提升65.9%。

3.2 转发延迟

应用DDP技术可大大降低UPF系统转发的延迟。这是因为，DDP技术可以减少数据的核间通信，提高高速缓存利用率，进而使UDP报文的平均转发延迟从150 μ s下降至74 μ s。

3.3 系统总体成本

在比较UPF系统总体成本时，我们主要关注硬件设备采购费和运行电费两部分。在同等UPF性能要求下，基于6330N和8380处理器、配合800系列网络适配器的UPF方案，具有更好的功耗性能比，比基于前代6230N的UPF方案的总体成本更低，并且这种优势会随着时间的推移更加明显。根据运营商对单个UPF的性能要求，我们还要考虑设备数量向上取整的问题。表1展示了不同硬件平台在各档性能要求下所需的设备数量（使能DPI）。以400 Gbit/s为例，系统只需要2台基于8380处理器的服务器或3台基于6330N处理器的服务器，而若基于6230N处理器则至少需要4台服务器才能达到性能要求。因此，根据当下及未来的实际网络需

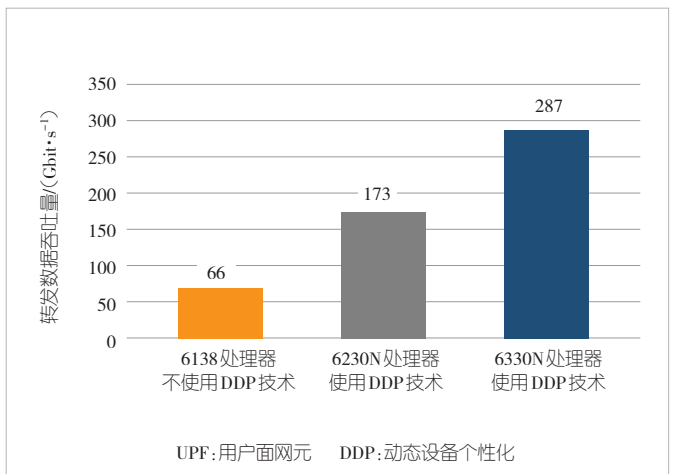


图6 3代硬件平台对应的UPF性能比较

表1 各档网元性能要求下所需服务器的数量

处理器类型	吞吐量/(Gbit·s ⁻¹)				
	100	200	300	400	500
6230N (132)	1	2	3	4	4
6330N (177)	1	2	2	3	3
8380 (280)	1	1	2	2	2

求，对硬件平台进行合理配置，可以有效节省服务器数量，降低系统总体成本。

4 结束语

本文介绍了基于通用硬件平台的高性能虚拟化5G核心网UPF方案。该方案可使用户面数据转发性能最高达到462 Gbit/s。具体而言，当采用基于6330N处理器的硬件平台时，用户数据转发性能可达287 Gbit/s，比前两代近似型号的硬件平台分别提升65.9%和334.8%。运用DDP技术卸载处理器核的分发工作，使更多处理器核的性能得以发挥，并使转发延迟降低50.7%。本方案在实现更高性能的同时，使系统总体成本更具优势。

测试表明，依靠通用硬件本身的升级换代带来的能力提升和包括DDP技术在内的配套技术的创新优化，可实现5G核心网UPF性能快速增长。完全基于通用硬件平台的5G网络架构，比原有专有通信设备或额外增加专用加速硬件的网络架构更简约、更开放、更具性价比，符合移动通信网络的演进趋势，亦能满足运营商和设备商在未来众多5G业务场景中的性能诉求。

参考文献

- [1] IMT-2020(5G)推进组. 5G核心网云化部署需求与关键技术白皮书[R]. 2018
- [2] LI Y, CHEN M. Software-defined network function virtualization: a survey [J]. IEEE access, 2015, 3: 2542-2553. DOI: 10.1109/ACCESS.2015.2499271
- [3] 张雪. 5G核心网云网一体化运维 [J]. 电信科学, 2021, 37(8): 128-135. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2021200
- [4] IDC. China x86 server market overview [R]. 2023
- [5] 3GPP. System architecture for the 5G system: 3GPP TS 23.501 [S]. 2019
- [6] 马瑞涛, 王光全, 任驰, 等. 3GPP R16 5G核心网标准及关键技术研究 [J]. 电子技术应用, 2020, 46(11): 30-35, 40. DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200993
- [7] 薛妍, 杨立, 谢峰. 6G时代新用户面设计和关键技术 [J]. 移动通信, 2022, 46(6): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2022.06.001
- [8] ZHANG J, LOU F, MA J. 中兴通讯高性能5G核心网UPF实现 [R]. 2020
- [9] GLUSTSOV A, QUBAIAH K, MA J. Samsung achieves 305 Gbit/s

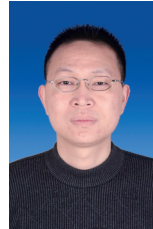
on 5G UPF core utilizing Intel architecture [R]. 2020

- [10] 王立文, 王友祥, 唐雄燕, 等. 5G核心网UPF硬件加速技术 [J]. 移动通信, 2020, 44(1): 19-23, 32. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2020.01.004
- [11] 王升, 班有容, 陈佳媛, 等. 硬件加速在核心网转发面应用的思考 and 实践 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(3): 31-36. DOI: 10.12142/ZTETJ.202003007
- [12] LI Y, ZHANG J, GU G. ZTE's high performance 5G core network UPF implementation based on 3rd generation Intel Xeon scalable processors [R]. 2021

作者简介



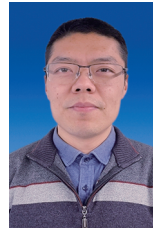
李勇，英特尔（中国）有限公司技术主管；主要研究方向为移动通信网络、云计算等。



马建伟，英特尔（中国）有限公司网络架构师；主要研究基于英特尔平台的通信NFV网元解决方案的性能优化、节能、数据安全等。



应晓冬，英特尔（中国）有限公司网络架构师；主要从事核心网、云网络相关研发工作。



娄方亮，中兴通讯股份有限公司技术总工；主要从事核心网相关研发工作。



蔡茹馨，英特尔（中国）有限公司技术专员；主要从事基于英特尔平台的通信网络、云计算相关研发工作。

智能实时音视频网络的总体设计



General Design of Smart Real-Time Audio/Video Network

陈俊江/CHEN Junjiang^{1,2}, 申光/SHEN Guang^{1,2}

(1. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;

2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518055)

(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;

2. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202501011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20250219.1532.002.html>

网络出版日期: 2025-02-19

收稿日期: 2024-05-16

摘要: 互动性更高、沉浸感更强的实时音视频业务交互需求, 驱动着音视频承载网络升级变革。针对传统音视频网络服务质量 (QoS) 效果不佳、网络流量不均衡、吞吐量低等一系列挑战, 创新性地提出智能实时音视频网络 (SRTN) 理念。基于云网融合、云边缘协同等思想, 设计了多业务融合调度系统, 研发出一系列创新技术和方案, 提供低时延、高质量、大并发、高可靠的智能化音视频交互服务。SRTN有望成为一种面向下一代音视频应用的全新基础设施, 为用户提供更优质的音视频智能体验。

关键词: 实时音视频通信; 云网融合; 融合调度; 统一媒体网络

Abstract: Real-time audio/video communication applications are becoming more interactive and immersive, which will drive the transformation and upgrade of the underlying network. To cope with the challenges of the traditional network, such as poor quality of service (QoS) performance, unbalanced network traffic, low throughput, the innovative concept of Smart Real-Time Network (SRTN) is proposed based on the ideas of cloud network convergence and cloud-edge-end collaboration. A scheduling system that supports multi-audio/video application scenarios is designed, and a series of innovative technologies are developed to provide smart audio and video interaction services with low latency, high QoS, large concurrency, and high reliability. SRTN is expected to become the new infrastructure for next generation audio/video applications and provide users with better smart experience.

Keywords: real-time audio/video communication; cloud network convergence; integrated scheduling; unified media network

引用格式: 陈俊江, 申光. 智能实时音视频网络的总体设计 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(1): 63-70. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501011

Citation: CHEN J J, SHEN G. General design of smart real-time audio/video network [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(1): 63-70. DOI: 10.12142/ZTETJ.202501011

1 音视频网络面临的挑战

随着5G、人工智能 (AI)、元宇宙等前沿技术的持续演进, 数字世界和物理世界的融合也在加速推进。音视频成为了这一融合进程的催化剂, 同时音视频流量正在以指数级速度迅猛增长。当前移动音视频流量每年的增长率超过50%, 2023年音视频流量占据全部移动网络的80%以上^[1-2]。人们对于音视频的交互模式正在发生根本性变革: 从传统的单向媒体分发到双向交互, 原来仅支持观看录像, 现在可以进行互动直播; 从传统的点对点互动到多点互动, 原来仅能双人对讲, 现在可以进行多人视频会议; 从传统的单一内容模态到多内容模态, 内容载体不断丰富, 从文本到图片再到音视频等富媒体。

音视频交互模式不断升级, 在此基础上逐渐发展出了当下备受关注的实时音视频通信 (RTC) 技术。RTC技术被广泛应用于办公、教育、医疗、交通等领域^[3], 已经融入到社

会各行各业发展中, 塑造社会生产、生活、交易、治理新形态。互动性更高、沉浸感更强的RTC业务, 对音视频承载网络提出了更高的要求。不仅如此, 中国针对算力网络出台的一系列政策, 以及中兴通讯提出的视频算力网络理念^[4], 都驱动着音视频网络进行变革, 朝着更低时延、更高质量、更高并发、更高可靠的方向不断演进。

面对更高的演进目标, 当下的音视频网络还面临着如下挑战:

1) QoS效果不佳: 音视频网络拓扑复杂, 网络环境多变, 数据传输链路冗长, 很难做到高质量QoS保障; 同时, 音视频网络的逻辑路径与底层物理链路错配, 无法保障业务端到端低时延。例如: 跨地区远距离传输时延大、丢包严重, 叠加业务传输路径与基础通信网络不匹配, 引发流量迂回增长链路, 进一步增大时延, 最终导致终端播放时出现抖动、花屏等质量问题, 进而影响体验。

2) 网络流量不均衡、吞吐量低：系统难以根据实时网络拓扑、网络状态、节点资源、算力资源等数据进行精准实时规划、调度和传输，缺乏智能化控制体系，无法最大化利用网络资源、合理分配网络流量，进而无法支撑大规模业务场景。例如：当固定路径的网络环境变差时，如果得不到实时更迭，就会影响业务数据的传输质量，并且，如果所有的业务数据都走固定的最优路径，也会导致该最优路径迅速饱和，而其他路径却空闲，造成路径拥塞和节点单点瓶颈。

3) 应用场景单一、重复建设：各业务与网络强耦合，仅针对本业务的音视频网络进行管理和维护；各业务之间的网络割裂，只能应对本业务的单一场景，不能提供多业务多层次服务能力；同时，各业务的音视频网络的部分技术重复，功能相似，也会造成重复建设，浪费资源，增加成本。例如：视频会议、在线教育、视频监控等业务的音视频网络是3套相互独立的系统，各自建设，各自运维，场景单一，开销较大，如图1所示。

2 智能实时音视频网络的系统架构

我们提出了智能实时音视频网络(SRTN)^[5]，可以更好地解决上述难题，使得云网融合更充分、控制调度更灵活、数据传输更快捷、支持业务更丰富，为用户提供更优质的智能化体验。SRTN可以更好地支撑视频算力网络建设，从而促进社会和经济的发展。

智能实时音视频网络是基于分布式云、边缘计算、软件定义网络^[6]等技术构建的。它以多业务融合调度系统和统一媒体网络为支撑，全面感知网络的实时状态和网元节点的负载状况，高效管理网络中的连接资源和算力资源，统筹规划终端连接到接入节点以及接入节点之间的最优路径，可有效应对数据传输中的弱网问题，提供低时延、高质量、大并发、高可靠的智能化音视频交互服务，形成了一种全新架

构的音视频网络形态。

2.1 网络架构

2.1.1 云网融合

SRTN系统的网络架构如图2所示。该系统基于云网融合思想，将自身网络的组网架构，与运营商基础通信网络的组网架构保持一致，采用网状和树状相结合的模式：在大区骨干节点（对应运营商的省级节点）采用网状结构，大区骨干节点之间可直接进行交互；在大区下沉节点（对应运营商的地市节点）采用树状结构，大区下沉节点需经过本大区骨干节点与其他大区节点进行交互。

将网状和树状特性应用到不同区域，可以综合提升全网能力。在大区骨干节点之间实现动态路径有助于降低时延，提高质量。在大区内部下沉节点实现路径复用则有助于减少流量消耗，节约成本。

除此之外，基于这种网络重叠的组网架构，可以避免流量迂回，增强QoS保障。

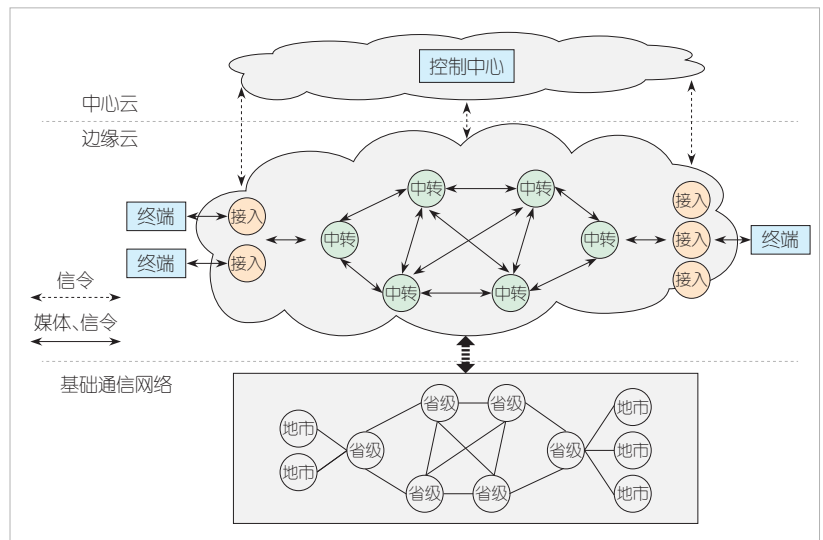


图2 智能实时音视频网络架构

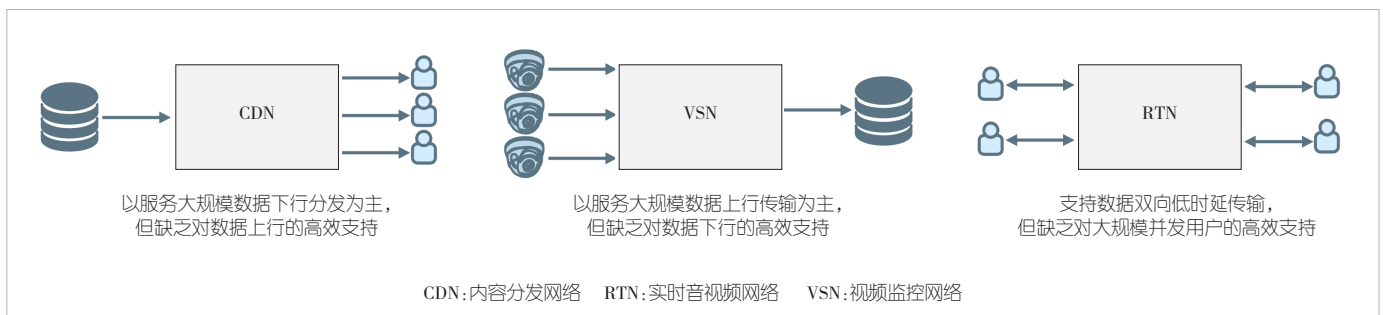


图1 传统单一的音视频网络应用场景

1) 避免流量迂回。在运营商网络层面，省级下沉地市节点之间交互的流量和出省的流量，都会经过省级节点。如果上层音视频网络为某大区下沉节点，规划了经由该大区其他下沉节点再到其他大区的路径时，就会造成流量在运营商网络层面回绕，带来流量迂回问题。SRTN 系统利用上述组网架构，可以避免经由大区内部其他下沉节点再到其他大区的路径，可直接规划下沉节点经由骨干节点再到其他大区的路径。

2) 增强 QoS 保障。SRTN 系统在为业务提供最优路径传输时，会向运营商网络发送特定的指令信息，请求增强针对该业务传输的 QoS 保障服务。当识别到 SRTN 系统服务的业务流量时，运营商网络会动态提升该路径在运营商网络层面的 QoS 级别。通过 SRTN 系统与运营商网络之间的联动协作，从端到网络层面整体增强 QoS 能力，实现网络资源能够根据业务需求灵活调配，即实现“网随云动”的效果。

2.1.2 云边端协同

SRTN 系统将控制网元和传输网元进行分离解耦，使得各个网元边界清晰，各尽其职。基于云边端协同思想，分布在网络中不同位置的各个网元，通过信令和媒体交互进行耦合，协同工作。

1) 云-中心云节点：控制中心所在的平面称为控制层，其部署在中心云。

2) 边-边缘云节点：边缘节点所在的平面称为传输层，其部署在边缘云，可细分为接入节点和中转节点。接入节点广泛覆盖 SRTN 系统的边缘，是在物理上距离终端最近的一类节点。中转节点分布在 SRTN 系统的各个大区，各节点之间的连接关系是一种多对多的网状架构。

3) 端-终端：终端通过接入节点连接到 SRTN 系统。

2.2 功能架构

2.2.1 控制中心

SRTN 系统的功能架构如图 3 所示。在 SRTN 系统中，控制中心充当大脑中枢，负责对接入节点和中转节点进行管理、规划和调度，体现的是对数据的管理。控制中心可细分为网络感知、智能规划、融合调度等模块。

1) 网络感知：负责根据实时网络拓扑，与各边缘节点进行信令交互，使各边缘节点进行网络探测和数据采集，并对各边缘节点传送到

控制中心的网络探测信息、节点信息、算力信息等数据进行汇聚、过滤、筛选等处理。

2) 智能规划：负责基于网络感知数据，生成多策略量化网络拓扑，规划中转节点之间的最优路径，并结合终端和接入节点信息，规划终端可连接的接入节点。

3) 融合调度：负责对不同业务提供不同策略的调度能力，结合业务请求消息、网络感知数据和智能规划结果，为终端匹配最优接入节点，并为接入节点匹配最优网内传输路径。

2.2.2 接入节点

在 SRTN 系统中，接入节点充当神经末梢，可将终端高可靠、高稳定地接入到系统，体现的是数据在最后一公里的传输。接入节点可细分为探测管理、路径管理、媒体管理、流媒体等模块。

1) 探测管理：可根据控制中心的网络感知下发的探测驱动请求，与本接入节点相邻的中转节点进行网络探测；可根据终端的探测管理发起的网络探测请求，与终端进行网络探测；也可根据网络感知下发的数据采集请求，上报网络探测信息、节点信息、算力信息等数据。

2) 路径管理：负责向控制中心的融合调度匹配最优网内传输路径，并将路径信息封装在业务数据包头。

3) 媒体管理：负责负载均衡选择流媒体实例，并通过保活接口检测每个流媒体实例的状态，能够在流媒体实例异常后进行自动切换。

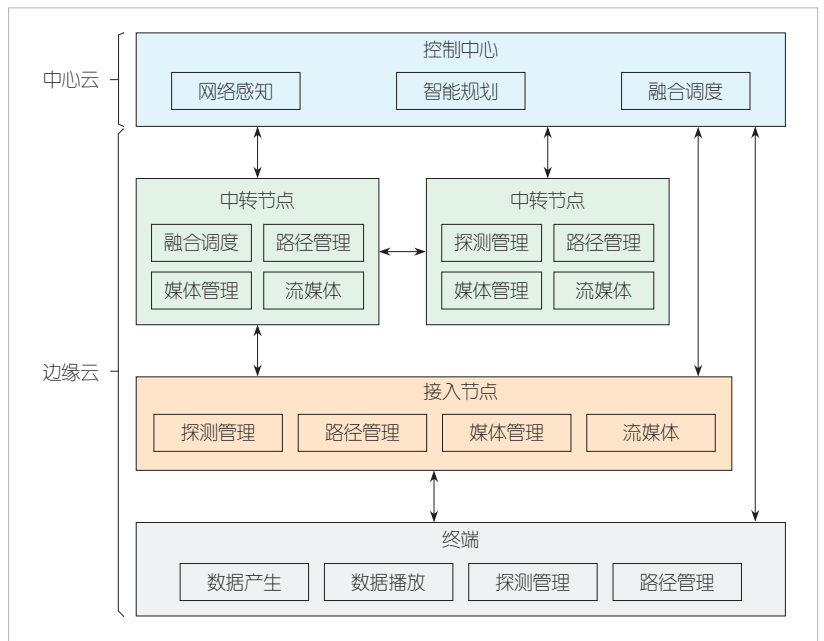


图3 智能实时音视频网络的功能架构

4) 流媒体：一组由流媒体实例组成的集群，负责数据接收和数据转发。它可接收终端或者中转节点的业务数据，并将业务数据按照其下一跳地址和端口转发到终端或者中转节点，同时具备抗弱网能力和多路径传输能力。

2.2.3 中转节点

在SRTN系统中，中转节点充当神经元，可实现中转节点之间高速度、高质量传输数据，体现的是数据在网络内部的传输。中转节点也可细分为探测管理、路径管理、媒体管理、流媒体等模块。

1) 探测管理：与接入节点的探测管理相似，负责网络探测和数据上报。不同之处在于，网络探测信令的驱动器只有控制中心，并且探测对象是与本中转节点相邻的中转节点。

2) 路径管理：负责解析业务数据包头的路径协议，获取本节点的下一跳节点信息。

3) 媒体管理：与接入节点的媒体管理相似，负责流媒体实例调度、保活和切换。

4) 流媒体：与接入节点的流媒体相似，负责数据接收和数据转发。不同之处在于，接收和转发数据的对象都是中转节点或者接入节点，对于抗弱网能力要求不高，但是流媒体的集群规模更大、性能更高，可实现高吞吐量传输。

2.2.4 终端

终端是指支持音视频等数据产生、播放的物理设备、软件应用或者软件开发工具包(SDK)。例如，视频会议业务包含PC端、手机移动端、会议室终端等；云电脑业务包含瘦终端、后端服务器等；扩展现实(XR)业务包含眼镜终端、头戴终端、后端服务器等。终端可细分为探测管理、路径管理、数据产生、数据播放等模块。

1) 探测管理：负责根据终端路径管理的要求，向接入节点发起网络探测请求，汇聚终端与接入节点之间的网络探测数据，为终端的路径管理提供数据支撑。

2) 路径管理：负责为控制中心的融合调度匹配最优接入节点，促使终端的探测管理进行网络探测，并根据网络探测信息选定多路径冗余策略。

3) 数据产生：负责数据采集、生成等处理，将业务数据转发到接入节点。

4) 数据播放：负责数据渲染、播放等处

理，接收从接入节点转发到终端的业务数据。

3 智能实时音视频网络的关键技术

SRTN系统集成了统一协议、接入调度、路由调度、网络传输等一系列创新技术，具有统一化、控制化和实时化等明显特征，构建了端到端通信级的音视频网络系统。

3.1 统一协议技术

SRTN系统对外支持多种协议，内部采用私有协议。终端在接入到系统时，会在接入节点完成协议转换，将外部的实时传输协议(RTP)、基于超文本传输视频数据协议(HTTP-FLV)、基于超文本传输的自适应码率流媒体协议(HLS)、实时流传输协议(RTSP)、网页实时通信(WebRTC)^[7]、实时消息传输协议(RTMP)、GB/T 28181、快速UDP网络连接(QUIC)^[8]等各种协议卸载，做归一化处理。通过统一协议技术，系统可实现最大化承载主流业务流量，避免内部节点协议转换，提高传输效率，为业务数据在系统内部快速传输提供了必要条件。接入节点支持的终端类型以及主流协议，如图4所示。

3.2 接入调度技术

SRTN系统为终端精准调度最优接入节点，为实现终端到接入节点的最后一公里高可靠、高稳定接入提供了可行性，如图5所示。

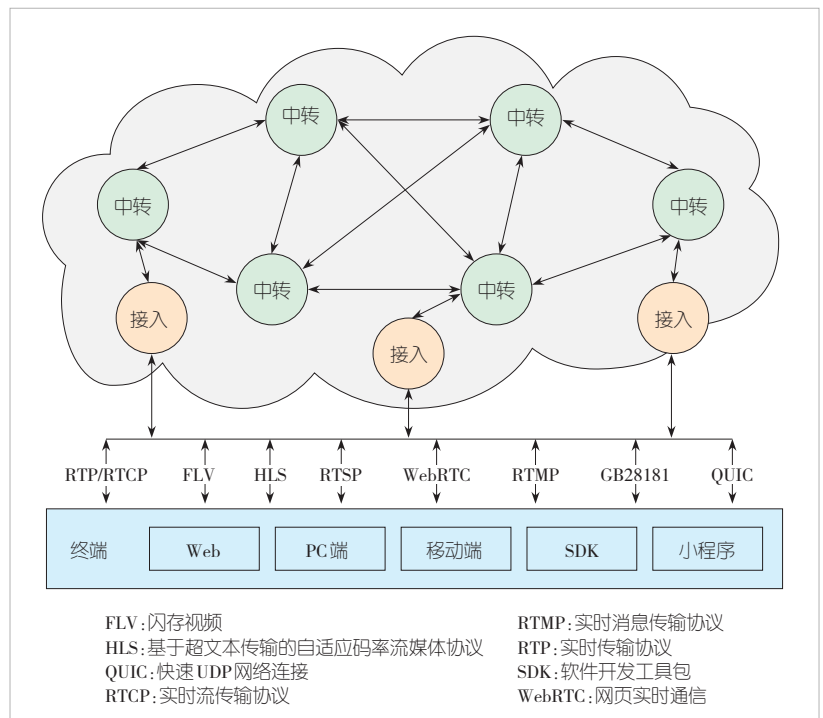


图4 统一协议技术

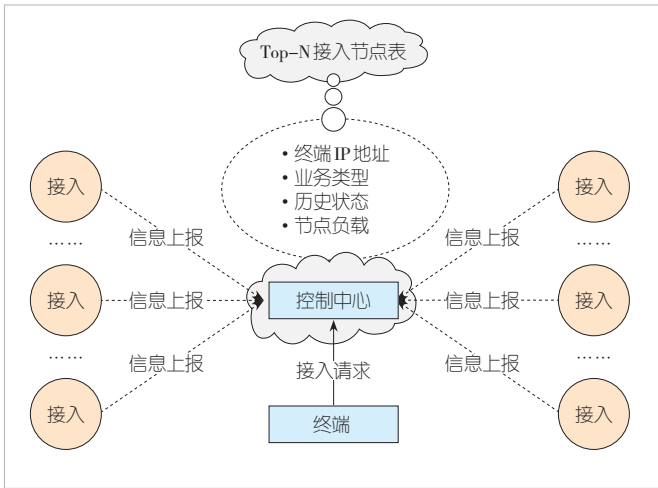


图5 接入调度技术

终端向控制中心获取接入节点，控制中心会结合终端的IP地址、业务类型，接入节点的负载、历史状态等数据，基于多参数接入调度模型，为终端分配最优的Top-N接入节点。

1) 终端IP地址处理：控制中心的融合调度结合网络感知中接入节点的IP信息，检索距离终端物理位置最近的若干个接入节点。

2) 业务类型处理：融合调度向智能规划获取该业务类型对应的量化网络拓扑。量化网络拓扑具体表现为上述接入节点到其中转节点的量化分数值。然后，根据预先设定的量化分数标准，将那些量化分数低于该标准的接入节点剔

除掉。

3) 历史状态处理：根据终端历史登录成功率、历史业务状态等信息，从上述接入节点中生成黑白名单。对于历史登录成功率较高且历史业务状态良好的接入节点，将其列入白名单，对于列入白名单的接入节点，可以优先分配，即使该接入节点不是距离终端物理位置最近的；对于历史登录成功率较低或历史业务状态不佳的接入节点，将其列入黑名单，可以淘汰。

4) 节点负载处理：融合调度从上述接入节点中，筛选出当前负载最轻的Top-N接入节点。

3.3 路由调度技术

SRTN系统对全网进行多策略最优路由规划，为实现接入节点之间的网络内部高速度、高质量数据传输提供了可行性，如图6所示。

接入节点向控制中心获取路由，控制中心会结合业务类型、网络状态、节点负载、接入节点IP地址等数据，基于多策略路由调度模型，规划从源接入节点到目标接入节点的最优的Top-N路由。

1) 控制中心的智能规划解析业务类型，从多策略路由调度模型中获取该业务类型对应的策略。例如，当业务对质量要求较高，甚至不惜成本追求质量时，系统就会采取质量优先策略。此外，还有成本优先策略，容量优先策略，以及结合质量、成本、容量的综合策略等。

2) 根据路由策略计算量化分数。智能规划从网络感知中

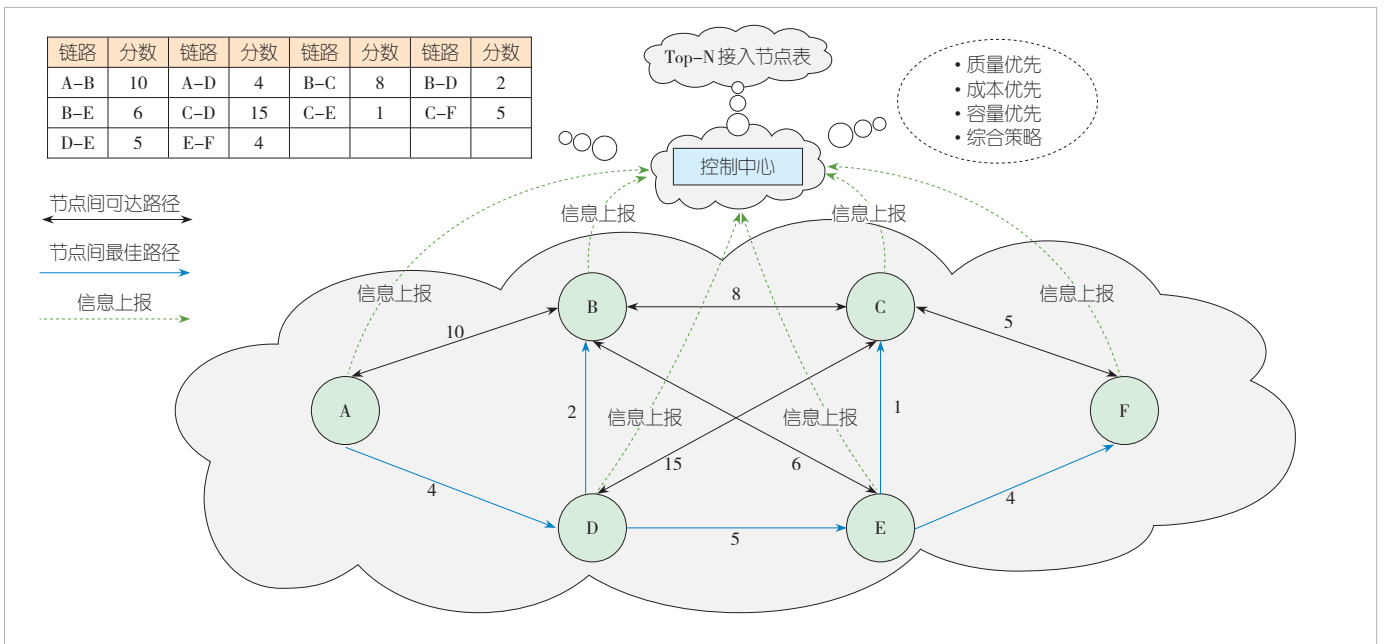


图6 路由调度技术

抽取度量指标，将其组合并赋予权重，构建数学模型，映射成质量、成本、容量等维度，量化为链路分数。例如，质量优先策略以链路的丢包率、时延、抖动等指标构建模型，映射为该链路分数。同理，其他模型也是不同的度量指标组合。

3) 根据量化链路分数规划最优路由。经过上述计算得出全网所有链路的分数图谱，通过最短路径算法得到从源节点到目标节点的最优的Top-N路由。

3.4 网络传输技术

SRTN 系统通过多路径冗余传输实现终端到接入节点的最后一公里高可靠、高稳定接入，并通过源路由传输实现接入节点之间的网络内部高速度、高质量数据传输。

3.4.1 多路径冗余传输

根据 3.2 章节的接入调度技术，终端获取到最优 Top-N 接入节点。终端选取两个最优接入节点并同时向其发起网络探测，再将探测数据归一化为链路分数，并根据链路分数划分最后一公里链路的优劣：分数在 0~0.3 表示链路优秀，分数在 0.4~0.6 表示链路良好，分数在 0.7~1 表示链路弱网。终端根据最后一公里链路的优劣情况，选取多路径冗余策略进行数据传输，如图 7 所示。

单路径传输：适合链路存在优秀的情况，通过一条链路传输所有数据。如果两条链路中存在一条优秀，则通过该条链路进行传输；如果两条链路都是优秀的，则选择链路分数值较低的链路进行传输。

双路径冗余传输：适合两条链路都是弱网的情况，所有的数据都会先在终端复制一份，并叠加 FEC 冗余包进行扩展，再通过两条链路传输相同的数据。

双路径低成本冗余传输：适合上述中的其余情况，通过

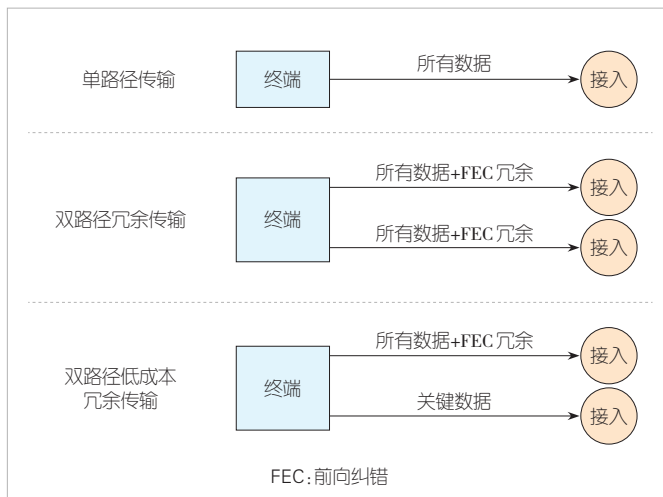


图7 多路径冗余传输技术

一条相对较好的链路传输所有数据，并叠加 FEC 冗余包进行扩展；通过另一条相对较差的链路传输数据量较小的关键数据，如关键 I 帧、音频包、信令、FEC 冗余包等。如果两条链路都是良好的，则选择链路分数值相对较低的链路传输所有数据；如果一条链路良好、一条链路是弱网，则通过良好的链路传输所有数据，通过弱网的链路传输关键数据。

3.4.2 源路由传输

根据 3.3 章节的路由调度技术，接入节点获取最优 Top-N 路由，之后采用基于源路由的方式进行传输，如图 8 所示。

源接入节点：按照自定义私有协议格式，将最优路由信息封装在业务数据包路由头，解析出本节点的下一跳节点 IP 地址，结合固定的端口号，将封装好的业务数据包传输到中转节点。

中转节点：接收接入节点传输的业务数据，对业务数据包路由头进行解封装，从而获取路由信息，去掉本节点的信息并更新路由长度，提取下一跳节点的 IP 地址，并结合固定的端口号，将业务数据包传输到下一跳节点。以此类推，如果中转节点有多跳，均按照此方法先解析业务数据包路由头，然后去掉本节点的信息并更新路由长度，最后提取出下一跳节点 IP 地址进行传输。最后一个中转节点，将业务数据包传输到目标接入节点。

目标接入节点：接收到中转节点传输的业务数据，对业务数据包路由头进行解封装，判断是否没有下一跳节点信息，如没有，则视为最后一跳，进而将整个数据包路由头去掉，提取出原始业务数据，并将原始业务数据传输到目标终端。

当数据传输过程中网络环境为弱网情况时，系统会采取抗弱网和高可靠策略。由于每个节点的流媒体都带有 Jitter Buffer 策略，当本节点接收的数据出现丢包时，会向上一跳节点请求重发。若上一跳节点的 Jitter Buffer 命中，可直接返回数据，不用再向源头请求重发，减少时延。除此之外，当节点或者节点之间的链路异常故障时，源接入节点能够根据其维护的 Top-N 路由表立即切换，避免网络延迟和抖动，实现实时迁移。

4 智能实时音视频网络的应用场景

SRTN 系统提供通用数据加速能力，支持多种场景和业务，既能够满足 RTC 业务需求，也能够支持传统非实时类业务应用，在一张网络上承载全场景音视频业务。

4.1 实时交互类业务

实时交互类业务可以分为端到端场景、端到数据中心场

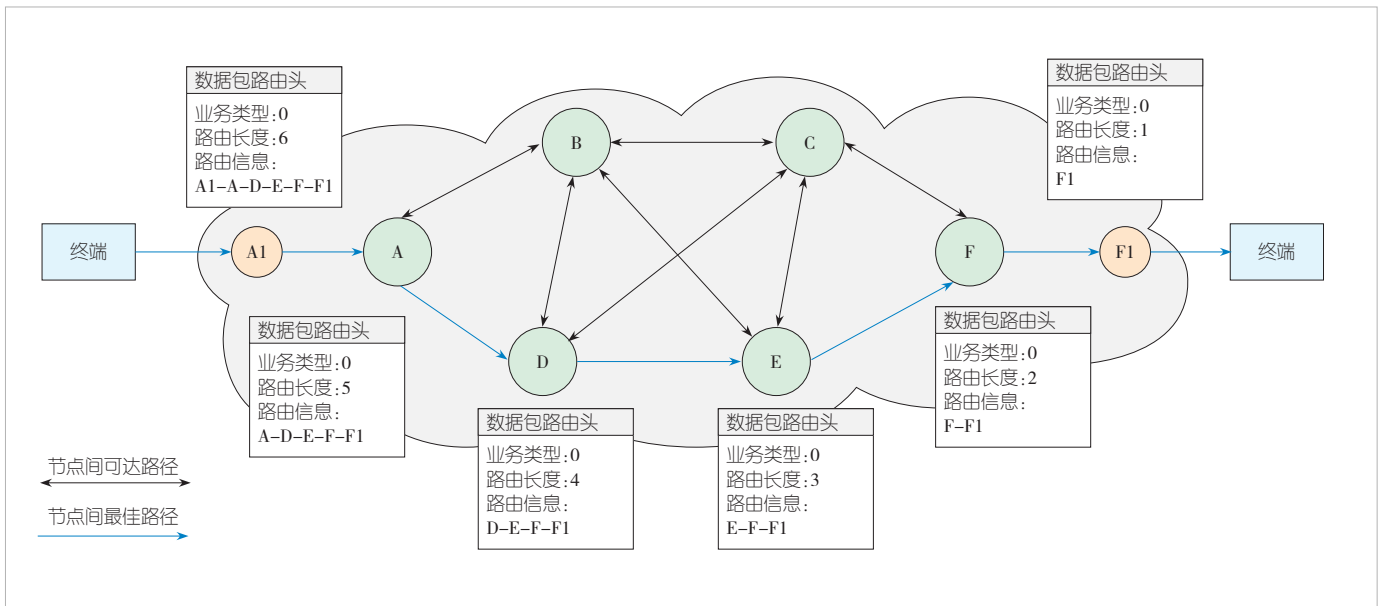


图8 源路由传输技术

景、端到边缘场景等，如图9所示。

4.1.1 端到端交互场景

端到端（E2E）交互场景，提供业务终端到业务终端的全链路实时加速服务，时延小于200 ms。通过接入调度、路由调度、网络传输等技术，系统会将业务终端择优连接到的接入节点，并经过最优路由链路通信，解决最后一公里和网内传输问题。此类场景适用于端到端强交互类业务，如视频会议、互动直播等。

1) 视频会议：是指远程参与者能够在不同地点，利用网络传输实时音视频数据，使与会者能够看到、听到对方，并进行实时的双向交流和协作，实现类似于面对面会议的形式。

2) 互动直播：是指传统视频直播的增强应用，在视频

直播中增加互动功能，既具有面向用户进行大并发的直播功能，又具有与用户建立双向视频互动的功能。基于互动直播的场景包括在线教育、远程面试等。

4.1.2 端到数据中心交互场景

端到数据中心（E2DC）交互场景，提供业务终端经过边缘节点至数据中心的云边加速服务，时延小于100 ms。通过接入调度、路由调度、网络传输等技术，系统将业务终端与数据中心连接通信，能够节省出入云带宽，解决最后一公里和网内传输问题。此类场景适用于云边交互类业务，可以为跨地域开展业务的应用提供实时内容加速，提供比传统互联网更可靠、更低时延的服务，如云电脑、云渲染等。

1) 云电脑：又称为云桌面、云手机，是指将计算资源和操作系统从本地设备转移到云端数据中心。用户无须拥有实体计算机，只需通过轻量级终端来联网远程访问，即可拥有云端计算资源和应用程序，享受到便捷、安全、可靠的服务。

2) 云渲染：是指将3D软件或者游戏部署在云端数据中心，用户在本地终端发出指令操作，云端实例上运行的各类应用接收指令。渲染画面能够为用户提供接近本地的低时延高质量的操作体验。基于云渲染的场景包括弹幕游戏直播、云原生录制、虚拟特效等。

4.1.3 端到边缘交互场景

端到边缘（E2Edge）交互场景，提供业务终端到边缘节点的边缘加速服务，时延小于50 ms。通过接入调度、网络传输等技术，将业务终端与边缘节点连接通信，解决最后

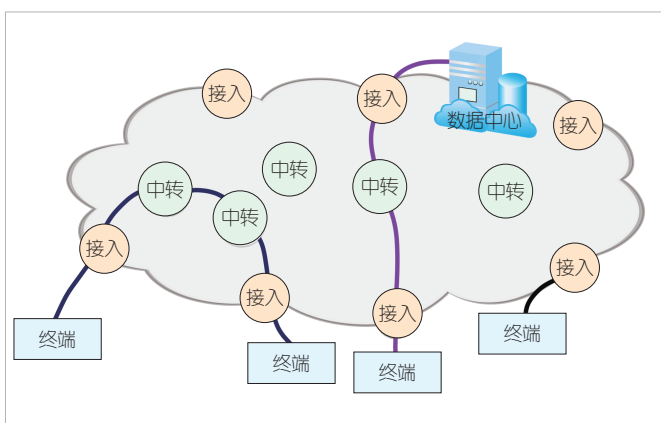


图9 实时交互类业务的应用场景

一公里问题。此类场景适用于边缘交互类业务，此时应用服务端部署在边缘节点，终端择优接入到服务中，如基于边缘技术栈构建的云XR、远程医疗等。

1) 云XR：是指结合云计算和AR/VR技术的创新解决方案，用户将AR/VR应用部署在云端边缘节点，云端提供强大的计算和存储资源，终端只保留最基本功能，无需昂贵的硬件设备，即可享受到沉浸式体验。基于云XR的场景包括沉浸式视频会议、虚拟观演、虚拟旅游等。

2) 远程医疗：是指医生在云端边缘节点的手术控制中心，利用操作台和控制器操作本地手术区域的机器人系统，通过机械手臂和传感器，将医生的操作指令精确传达到手术区域，实现高精度的手术操作。

4.2 非实时交互类业务

非实时交互类业务，通过SRTN系统调度和传输，也能够拥有实时交互类体验，达到低时延、高质量的效果。该类业务根据客户端和服务端位置不同，也适用于上述3类交互场景，主要有以下两种业务类型：

1) 视频物联：是指将摄像头等视频设备与传感器等物联网设备相连接，实现视频数据的采集、传输、处理和应用，进而实现智能化的监测、分析和决策。基于视频物联的场景包括安防监控、设备监控、环境监测等。

2) 在线直播：是指以互联网技术为基础，基于网络直播平台，通过在线单向传输的方式，将音视频信息传递给有观看需求的用户。

5 结束语

随着音视频流量的指数级增长和RTC产业规模的持续扩张，音视频承载网络正朝着更低时延、更高质量、更高并发、更高可靠的方向演进。本文提出SRTN综合解决方案，构筑一张统一融合网络，最明显的特征在于统一化、控制化和实时化。该方案有效解决了传统音视频网络方案架构不合理、控制调度不灵活、数据传输不快捷等问题，支撑了视频算力网络建设，赋能了应用场景创新，为RTC产业发展壮大提供了基础保障。

参考文献

- [1] Cisco. Cisco annual internet report (2018–2023) white paper [R/OL]. (2020–03–09)[2024–08–15]. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- [2] Sandvine. The global Internet phenomena report January 2024 [EB/OL]. [2024–08–15]. <https://www.sandvine.com/phenomena/>
- [3] DAVIDS C, GURBANI V K, ORMAZABAL G, et al. Research topics related to real-time communications over 5G networks [J]. ACM SIGCOMM computer communication review, 2018, 46(3): 1–6. DOI: 10.1145/3243157.3243165
- [4] 刘群. 视频算力网络, 使能全场景视频应用 [EB/OL]. (2022–10–25)[2024–08–15] https://www.zte.com.cn/china/about/magazine/zte-technologies/2022/10-cn/_3/__.html
- [5] 吕达, 郑清芳. 构建智能实时网络, 使能5G视频业务繁荣 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(1): 60–67. DOI: 10.12142/ZTETJ.202101013
- [6] KREUTZ D, RAMOS F M V, VERISSIMO P E, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey [J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14–76. DOI: 10.1109/JPROC.2014.2371999
- [7] W3C. WebRTC: real-time communication in browsers [EB/OL]. [2024–08–15]. <https://www.w3.org/TR/webrtc/>
- [8] QUIC, a multiplexed stream transport over UDP [EB/OL]. [2024–08–15]. <https://www.chromium.org/quic/>

作者简介



陈俊江，中兴通讯股份有限公司系统架构工程师；主要研究领域为实时音视频通信、音视频传输及编解码、文件系统及存储等；先后从事视频物联、视频中台、视频会议、云电脑等系统和产品的技术研发、架构设计和标准制定。



申光，中兴通讯股份有限公司视频系统部部长；主要研究领域为视频编解码、多媒体通信、即时消息、云基础设施等；先后从事宽带智能网、多媒体会议、统一通信、云计算、虚拟数据中心等系统和产品的规划、研发、设计和标准制定工作。

中兴通讯技术杂志社

促进产学研合作青年专家委员会

主任 陈 为(北京交通大学)

副主任 秦晓琦(北京邮电大学) 卢 丹(中兴通讯股份有限公司)

委 员

曹 进	西安电子科技大学	史颖欢	南京大学
陈 力	中国科学技术大学	唐万恺	东南大学
陈 为	北京交通大学	王景璟	北京航空航天大学
陈琪美	武汉大学	王兴刚	华中科技大学
陈舒怡	哈尔滨工业大学	王勇强	天津大学
陈思衡	上海交通大学	温森文	华南理工大学
官 科	北京交通大学	吴泳澎	上海交通大学
韩凯峰	中国信息通信研究院	武庆庆	上海交通大学
何 姿	南京理工大学	夏文超	南京邮电大学
侯天为	北京交通大学	徐梦炜	北京邮电大学
胡 杰	电子科技大学	徐天衡	中国科学院上海高等研究院
黄 晨	紫金山实验室	杨川川	北京大学
李 昂	西安交通大学	尹海帆	华中科技大学
刘 凡	东南大学	于季弘	北京理工大学
刘春森	复旦大学	张 娇	北京邮电大学
刘俊宇	西安电子科技大学	张宇超	北京邮电大学
卢 丹	中兴通讯股份有限公司	章嘉懿	北京交通大学
陆游游	清华大学	赵昱达	浙江大学
宁兆龙	重庆邮电大学	赵中原	北京邮电大学
祁 亮	上海交通大学	周 伊	西南交通大学
秦晓琦	北京邮电大学	朱秉诚	东南大学
秦志金	清华大学		

刊物相关信息



投稿须知



投稿平台



过刊下载



论文索引与
引用指南

中兴通讯技术

(ZHONGXING TONGXUN JISHU)

办刊宗旨:

以人为本, 荟萃通信技术领域精英
迎接挑战, 把握世界通信技术动态
立即行动, 求解通信发展疑难课题
励精图治, 促进民族信息产业崛起

产业顾问:

段向阳、高 音、胡留军、华新海、刘新阳、
陆 平、史伟强、屠要峰、王会涛、熊先奎、
赵亚军、赵志勇、朱晓光

双月刊 1995 年创刊

第 31 卷 总第 181 期

2025 年 2 月 第 1 期

主管: 安徽出版集团有限责任公司

主办: 时代出版传媒股份有限公司

深圳航天广宇工业有限公司

出版: 安徽科学技术出版社

编辑、发行: 中兴通讯技术杂志社

总编辑: 王喜瑜

主编: 王利

执行主编: 黄新明

副主编: 卢丹

编辑部主任: 王萍萍

责任编辑: 徐烨

编辑: 杨广西、朱莉、任溪溪

设计排版: 徐莹

发行: 王萍萍

编务: 王坤

《中兴通讯技术》编辑部

地址: 合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室

邮编: 230061

网址: tech.zte.com.cn

投稿平台: tech.zte.com.cn/submission

电子信箱: magazine@zte.com.cn

电话: (0551) 65533356

发行方式: 自办发行

印刷: 合肥添彩包装有限公司

出版日期: 2025 年 2 月 25 日

中国标准连续出版物号: ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN

定价: 每册 20.00 元