



中文核心期刊 中国科技核心期刊 中国核心学术期刊
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

ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN

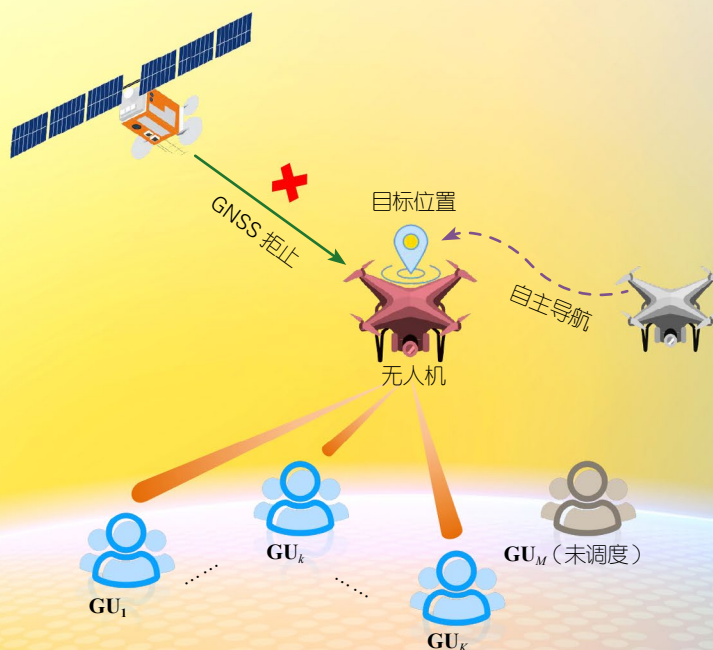
中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

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

第 32 卷 · 总第 188 期 · 2026 年 4 月 · 第 2 期

专题：广域立体覆盖低空通信技术



(封面图片详解见 P. 37)

ISSN 1009-6868



第二十八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)
糜正琨(南京邮电大学教授) 李自学(中兴通讯股份有限公司前董事长)

主任 陆建华(中国科学院院士)

副主任 方 榕(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	唐万斌	电子科技大学教授
陈前斌	重庆邮电大学教授、副校长	唐雄燕	中国联通研究院副院长、首席科学家
段晓东	中国移动研究院副院长	陶小峰	北京邮电大学教授
方 榕	中兴通讯股份有限公司董事长	汪烈军	新疆大学教授、副校长
高新波	西安电子科技大学教授、校长	王 翔	中兴通讯股份有限公司高级副总裁
葛建华	西安电子科技大学教授	王文博	雄安空天信息研究院院长
管海兵	上海交通大学教授、副校长	王文东	北京邮电大学教授
郭 庆	哈尔滨工业大学教授	王喜瑜	中兴通讯股份有限公司执行副总裁
洪 伟	中国科学院院士、东南大学教授	王耀南	中国工程院院士、湖南大学教授
江 涛	华中科技大学教授	王志勤	中国信息通信研究院副院长
蒋林涛	中国信息通信研究院科技委主任	卫 国	中国科学技术大学教授
金 石	东南大学教授、副校长	邬贺铨	中国工程院院士
李尔平	中国工程院外籍院士、浙江大学教授	吴春明	浙江大学教授
李红滨	北京大学教授	向际鹰	中兴通讯股份有限公司首席科学家
李厚强	中国科学技术大学教授	肖 甫	南京邮电大学教授、副校长
李建东	西安电子科技大学教授	解冲锋	中国电信新一代信息通信专业首席专家
李乐民	中国工程院院士、电子科技大学教授	徐安士	北京大学教授
李融林	华南理工大学教授	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	内蒙古工业大学教授、学术副校长
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、深圳大学教授	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	中国联通网络信息安全部总经理
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
苏 森	重庆邮电大学教授、校长	钟章队	北京交通大学教授
孙知信	南京邮电大学教授	周 亮	南京邮电大学教授、副校长
谈振辉	北京交通大学教授	朱近康	中国科学技术大学教授
唐 宏	中国电信 IP 专业首席专家	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 32 卷 总第 188 期 2026 年 4 月 第 2 期

中文核心期刊 中国科技核心期刊 第三届全国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

热点专题 ▶

广域立体覆盖低空通信技术

- 01 专题导读 金石, 刘凡
- 03 面向低空广域立体覆盖的ISAC理论与关键技术 何其原, 杨日艳, 谢磊
- 09 低空立体覆盖网络中的关键技术:网络规划与优化 ... 李昕昊, 李宵杰, 张翼, 韩凯峰, 朱光旭
- 18 从通信连续性到通感连续性:通感一体化切换技术 焦志琨, 陈力
- 27 基于通信感知一体化的多基站无源协作感知技术 张宏权, 杨恒, 李虎军, 刘浩田, 尉志青
- 36 GNSS拒止下低空无人机导航与资源分配优化 金海佳, 袁伟杰, 伍军
- 43 面向未知环境的频谱与激光雷达联合具身建图与导航.....
- 张佳益, 梁宏韬, 万奕尧, 周福辉, 吴启晖
- 50 突破无线移动通信蜂窝覆盖局限的路径探讨 李建东, 盛敏, 刘俊宇
- 56 50G-PON技术与应用 张宏熙, 孙砚峰, 傅华明
- 63 可重构智能表面辅助的通感一体化系统波束成形设计综述 廖勇, 韦东卫
- 73 基于信息-能源-时间三元组的算力资源综合度量与优化方法研究.....
- 刘超清, 周丹媛, 缪政, 丁亦志, 武振宇
- 81 5G网络运营安全管理系统研究与实践 任若冰, 费明, 贾国祖, 许晨敏, 郝振武

名家视点 ▶

企业视界 ▶

技术广角 ▶

《中兴通讯技术》2026 年热点专题名称及策划人

1. 6G 关键技术的标准化:

Day-1 与未来

中国移动研究院首席科学家 易芝玲

3. 智算网络

工信部信息通信科技委常委 赵慧玲

5. 星地太赫兹高速传输技术

中国科学院院士、东南大学教授 洪伟
电子科技大学教授 唐万斌
东南大学教授 郝张成

2. 广域立体覆盖低空通信技术

东南大学副校长 金石
东南大学教授 刘凡

4. 大模型推理中的存算技术

中国工程院院士、清华大学教授 郑纬民
清华大学副教授 陆游游

6. 智能多天线技术

北京交通大学副校长 艾渤
北京交通大学教授 章嘉懿

MAIN CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL
Vol. 32 No. 2 Apr. 2026

Special Topic ▶	Wide–Area 3D Coverage for Low–Altitude Communications
	01 Editorial Jin Shi, Liu Fan
	03 Integrated Sensing and Communication for Low–Altitude Wide–Area Stereoscopic Coverage: Theory and Key Technologies He Qiyuan, Yang Riyan, Xie Lei
	09 Key Technologies in Low–Altitude Three–Dimensional Coverage Networks: Network Planning and Optimization Li Xinhao, Li Xiaojie, Zhang Yi, Han Kaifeng, Zhu Guangxu
	18 From Communication Continuity to Communication–Sensing Continuity: Handover Technologies in ISAC Networks Jiao Zhikun, Chen Li
	27 Multi–Base Station Passive Cooperative Sensing Technology Based on Integrated Sensing and Communication Zhang Hongquan, Yang Heng, Li Hujun, Liu Haotian, Wei Zhiqing
	36 Navigation and Resource Allocation Optimization for GNSS–Denied Low–Altitude Wireless Networks Jin Haijia, Yuan Weijie, Wu Jun
	43 Joint Spectrum Mapping and Navigation Using Spectrum and LiDAR in Unknown Environment Zhang Jiayi, Liang Hongtao, Wan Yiyao, Zhou Fuhui, Wu Qihui
Expert View ▶	50 Exploring Pathways to Break Through Wireless Mobile Cellular Network Coverage Limitations Li Jiandong, Sheng Min, Liu Junyu
Enterprise View ▶	56 Technologies and Applications of 50G–PON Zhang Hongxi, Sun Yanfeng, Fu Huaming
Research Papers ▶	63 A Review on Beamforming Design for Reconfigurable Intelligent Surface–Aided Integrated Sensing and Communication Systems Liao Yong, Wei Dongwei
	73 Comprehensive Measurement and Optimization Method of Computing Power Resources Based on Information–Energy–Time Triplet Liu Chaoqing, Zhou Danyuan, Miao Zheng, Ding Yizhi, Wu Zhenyu
	81 Research and Practice of 5G Network Operation Security Management System Ren Ruobing, Fei Ming, Jia Guozu, Xu Chenmin, Hao Zhenwu

期刊基本参数: CN 34–1228/TN*1995*b*16*90*zh*P*¥20.00*6500*12*2026–04

敬告读者	本刊享有所发表文章的版权, 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。
------	--

广域立体覆盖低空通信技术 专题导读



专题策划人



金石



刘凡

随着低空经济蓬勃发展，无人机物流、空中巡检、城市空中交通等应用对无线网络提出极高要求。传统地面二维覆盖难以支撑低空立体空间通信，通信感知一体化（ISAC）技术正变革低空网络的运行模式。然而，低空立体网络在高度维度增加、传播与干扰结构变化、全球导航卫星系统（GNSS）拒止环境及三维移动连续性等方面仍面临重大挑战。为此，本期以“广域立体覆盖低空通信技术”为主题，收录了6篇文章，从通感理论边界、网络规划优化、资源分配、移动性管理、协作感知及具身智能导航等角度展开探讨。

《面向低空广域立体覆盖的ISAC理论与关键技术》在分析低空广域立体覆盖需求的基础上，剖析了通信随机性与感知确定性的内在冲突，引入随机矩阵理论确立性能边界，探讨多站协同、可重构智能表面、可移动天线等关键技术及发展趋势。文章为低空物联网提供了理论支撑，并对安全、隐私与可信监管等技术路径进行了展望。

《低空立体覆盖网络中的关键技术：网络规划与优化》深入探讨了低空网络建设的两大核心环节。在网络规划方

面，提出了一种基于解耦表征学习的低空网络覆盖预测框架，有效解决了基站波束方向图无法获取及数据稀疏问题。在网络优化方面，重点阐述了初始接入阶段覆盖场景配置对低空覆盖的影响机制，以及天线面板角度的优化方法，为构建高效可靠的低空立体覆盖网络提供理论依据。

《从通信连续性到通感连续性：通感一体化切换技术》梳理了ISAC移动性管理的演进路径。从链路级层面阐述了感知辅助切换与感知服务切换两种典型范式；在网络级层面剖析了感知切换与ISAC切换的核心挑战，并提出了相应的感知切换流程，进而设计了模糊感知切换算法，仿真验证了其在保障“通信-感知双连续性”上的优越性能，为ISAC移动性管理提供了系统的理论指导。

《基于通信感知一体化的多基站无源协作感知技术》针对视距（LoS）链路不稳定、异步时间偏移（TO）与载波频率偏移（CFO）等挑战，构建了基于正交频分复用（OFDM）的多点无源协作感知信号处理方案，提出了多点相位同步互相关（MPSCC）方法以抑制测距模糊，并开发了包含LoS存在时的椭圆-到达方向（DOA）联合定位及LoS不存在时的TDOA联合定位的数据级融合算法，为未来6G ISAC网络中的高精度多节点协作感知奠定了坚实的算法基础。

《GNSS拒止下低空无人机导航与资源分配优化》针对低

空无线网络面临的全球导航卫星系统拒止与机载射频资源受限问题，提出了一套完整的下行传输框架。在导航阶段，基于地面参考锚点的方位几何特征设计了纯角度制导策略；在通信阶段，构建了联合用户调度与波束赋形的优化模型，并提出基于交替优化（AO）、逐次凸逼近（SCA）和半定松弛（SDR）的高效求解算法。仿真结果表明，该方案在递减角度误差下能可靠捕获目标，并显著提升了系统服务性能。

《面向未知环境的频谱与激光雷达联合具身建图与导航》聚焦卫星导航不可达的室内及地下等封闭场景，提出了一种频谱与激光雷达联合的具身建图与导航框架。在感知层，通过建图网络将稀疏频谱采样与局部几何信息联合反演为全局势场与障碍概率图；在决策层，引入深度强化学习网络捕捉历史轨迹与环境特征。测试表明，该方法显著降低了碰撞率与路径冗余度，为利用已有无线基础设施辅助避障导航提供了多模态联合驱动的新思路。

本期的作者来自知名高校与科研机构。专家们紧扣低空经济发展的战略需求，从低空通感一体化理论边界、立体网络规划与优化、三维移动性管理、多站协作感知、复杂环境下的自主导航以及具身智能建图等多个维度，系统地介绍了最新的研究成果。期待这些高质量的研究成果能够为中国广

域立体覆盖低空智能网的理论演进与工程实践提供有益的参考和借鉴，并在此对所有作者和审稿专家的大力支持表示由衷的感谢！

策划人简介

金石，东南大学副校长、首席教授、博士生导师，教育部“长江学者奖励计划”特聘教授，国家自然科学基金杰出青年科学基金获得者，国家“万人计划”科技创新领军人才；长期从事移动通信的教学和研究工作，在移动通信理论与关键技术、物联网理论与关键技术，以及人工智能在移动通信中的应用等领域取得系列创新成果；研究成果获得省部级科学技术一等奖10项；已发表论文900余篇，获授权国际/中国发明专利100余项，出版专著5部、教材3部。

刘凡，东南大学青年首席教授、博士生导师，国家级青年人才，科睿唯安全球高被引科学家，爱思唯尔中国高被引学者；长期从事通信感知一体化等移动通信前沿技术研究；主持国家自然科学基金青年基金（B类）、国家科技重大专项任务等项目；获中国电子学会自然科学奖一等奖、中国通信学会科技进步奖一等奖、中国电子学会优秀博士学位论文奖、IEEE通信学会莱斯奖，以及6项IEEE学会级最佳论文奖等奖项；发表论文100余篇。

面向低空广域立体覆盖的ISAC理论与关键技术



Integrated Sensing and Communication for Low-Altitude Wide-Area Stereoscopic Coverage: Theory and Key Technologies

何其原/He Qiyuan, 杨日艳/Yang Riyan, 谢磊/Xie Lei

(东南大学, 中国 南京 211189)
(Southeast University, Nanjing 211189, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602002

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.tn.20260421.1901.002>

网络出版日期: 2026-04-22

收稿日期: 2026-01-15

摘要: 围绕低空经济驱动下的广域立体覆盖需求, 概述了通信感知一体化 (ISAC) 在低空智能网中的理论与技术进展。首先, 从低空广域立体覆盖需求出发, 分析低空场景下通信随机性与感知确定性的内在冲突, 引入随机矩阵理论 (RMT) 确立通感性能的理论边界。随后, 结合低空场景传播特性, 重点分析多站协同感知、可重构智能表面 (RIS)、可移动天线 (MA)、空间-极化域联合优化, 以及安全、隐私与可信监管等关键技术。本研究旨在为构建高可靠、高精度的智能化低空智能网提供坚实的理论支撑与技术路径。

关键词: 低空经济; 广域立体覆盖; 通信感知一体化; 随机矩阵理论; 空间自由度

Abstract: Driven by the low-altitude economy, the demand for wide-area stereoscopic coverage has grown rapidly. This paper reviews the theoretical and technological advancements of integrated sensing and communication (ISAC) in low-altitude intelligent networks. First, driven by the demands of such coverage, the inherent conflict between communication randomness and sensing determinism in low-altitude scenarios is analyzed. Random matrix theory (RMT) is then introduced to establish the theoretical performance boundaries of ISAC. Subsequently, given the propagation characteristics of low-altitude environments, this paper emphatically analyzes the operational mechanisms and development trends of critical technologies, including cooperative sensing, reconfigurable intelligent surfaces (RIS), movable antennas (MA), joint optimization of spatial-polarization domain, and security, privacy and trusted regulation. Finally, this paper aims to provide robust theoretical support and technical pathways for constructing highly reliable, high-precision, intelligent low-altitude networks.

Keywords: low-altitude economy; wide-area stereoscopic coverage; integrated sensing and communication; random matrix theory; spatial degrees of freedom

引用格式: 何其原, 杨日艳, 谢磊. 面向低空广域立体覆盖的ISAC理论与关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 3-8. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602002

Citation: He Q Y, Yang R Y, Xie L. Integrated sensing and communication for low-altitude wide-area stereoscopic coverage: theory and key technologies [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 3-8. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602002

1 低空ISAC的机遇与挑战

回顾移动通信技术的发展历程, 从第1代模拟通信到第5代移动通信, 其核心设计理念始终围绕服务地面用户展开。无论是基站选址、天线下倾角设置, 还是覆盖增强与干扰协调机制, 其优化对象本质上都是地面终端。这种二维平面的设计思维, 在过去几十年间极大地推动了人类社会的数字化进程。然而, 随着低空经济的蓬勃发展和无人机技术

的成熟, 人类的活动空间与服务边界正加速向低空领域延伸^[1]。低空应用场景的爆发式增长催生了无线通信系统对广域立体覆盖的迫切需求, 如图1所示。

1.1 低空经济驱动下的机遇

在低空经济快速发展的背景下, 低空空域正逐步成为承载物流配送、城市巡检、应急救援、公共安全和载人交通等多类业务的重要空间。低空智能网作为面向低空空域运行管理、飞行安全监管、业务数据承载以及航迹协同控制的新型基础设施, 正在依托新一代移动通信技术, 向“通信、感

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62501143); 江苏省基础研究计划 (自然科学基金项目) (BK20251332)

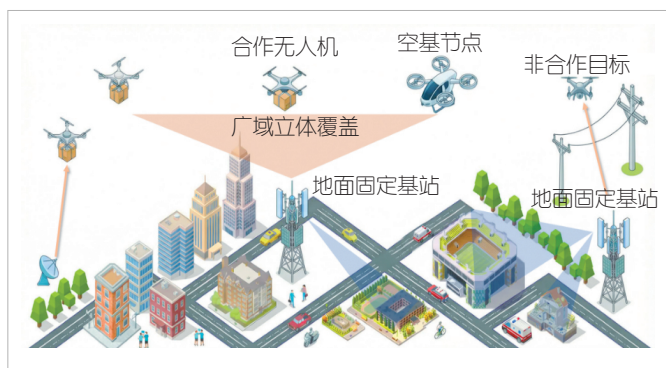


图1 广域立体覆盖范式示意图

知、智能、计算、控制”深度融合的一体化网络体系演进^[2]。与传统蜂窝网络不同，低空物联网不仅需要为合作飞行器提供稳定的控制、遥测和业务回传链路，还需要对“黑飞”无人机等非合作目标进行主动发现、识别与持续跟踪^[3]。因此，它不仅是信息传输平台，更是低空空域感知与安全监管的重要基础设施^[4]。

在此过程中，通信感知一体化技术（ISAC）展现出天然优势，并有望成为支撑低空广域立体覆盖的关键技术路径。一方面，现有蜂窝网络基站分布广、部署密度高，为低空目标感知提供了可直接复用的基础设施。由多个基站构成的感知网络能对低空目标实现连续覆盖和多视角观测，从而提升目标检测、定位与跟踪的鲁棒性^[5]。另一方面，感知过程中获取的信道状态、目标位置和速度等信息，又可以反向服务通信系统，用于波束对准、资源调度、链路预测以及切换优化，从而提升低空通信链路的稳定性和效率^[6]。对于高速移动无人机、复杂航迹任务以及动态空域环境而言，这种通感互助机制尤为重要。与此同时，通信侧的导频、反馈和协同状态信息也可感知提供参考与增益，使系统在服务合作目标的同时，具备对非合作目标的监管能力。正因为如此，ISAC在低空场景中不仅具备“连得上”的功能，也承担“看得见、管得住”的职责，这与低空物联网的实际需求高度契合^[7]。

可以预见，ISAC技术将成为低空物联网部署的重要支撑，可应用于如图2所示的智慧生活、智慧工业等场景中，具有重要的理论研究意义和实际应用价值^[8]。

1.2 面向广域立体覆盖的挑战

尽管ISAC为低空网络带来了新的发展机遇，但将传统地面蜂窝网络演进为面向低空广域立体覆盖的ISAC系统，仍面临两大挑战：

1) 理论维度的性能极限表征

通信追求信息熵最大化，倾向于使用随机信号；而感知追求检测稳定性，倾向于使用具有理想自相关特性的确定性信号。在ISAC系统中，同一发射波形必须同时服务于通信与感知，两者之间存在内在冲突。进一步地，在短时感知和有限快拍条件下，随机通信符号导致样本协方差矩阵本身具有随机性，使得感知性能会随发射数据序列变化而波动。这给低空ISAC系统设计带来挑战。如何定义并量化“随机性-确定性”权衡下的理论性能极限，特别是在利用数学工具确立通感性能解析边界方面，仍需深入研究。

2) 物理维度的空间信道重构

低空环境不仅存在传统地面通信中的路径损耗、阴影衰落和多径效应，还伴随有三维散射体、强镜面反射、动态背景杂波和目标机动性增强等特征。传统固定阵列的空间结构有限，难以适配复杂低空传播环境。因此，如何通过新型阵列架构释放额外空间自由度，是低空ISAC领域的重要研究方向。

本文将从理论性能衡量与物理空间重构两个维度展开，旨在为构建高可靠、高精度的智能化低空网络提供理论支撑与技术参考。

2 面向低空广域立体覆盖的ISAC理论

2.1 数学模型

在大规模ISAC系统中，发射信号通常具有高维随机结构。随机矩阵理论（RMT）能够刻画这些高维随机矩阵在大维度极限下的谱分布、特征值行为与确定性等效，从而将依赖瞬时随机实现的性能指标转化为可解析的统计规律。

设发射信号矩阵为：

$$\mathbf{X} \in \mathbb{C}^{N_t \times L}, \quad (1),$$

其中， N_t 表示发射天线数， L 表示观测长度或快拍数。若符



图2 低空ISAC技术的应用场景示例

号序列为独立同分布随机变量,则样本协方差矩阵可表示为:

$$S = \frac{1}{L} \mathbf{X} \mathbf{X}^H \quad (2).$$

当 $N_s, L \rightarrow \infty$ 且 $N_s/L \rightarrow c \in (0, \infty)$ 时, S 的特征值分布在一定条件下将收敛到确定性极限。这为分析大规模随机信号系统提供了理论基础。

对于通信链路,其信道容量表达式为:

$$R_c = \log \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_c^2} \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^H \right) \quad (3),$$

其中, \mathbf{H} 为通信信道矩阵, \mathbf{Q} 为发射协方差矩阵, σ_c^2 为通信噪声功率。

对于感知链路,可写为:

$$\mathbf{Y}_s = \mathbf{G} \mathbf{X} + \mathbf{N}_s \quad (4),$$

其中, \mathbf{G} 为目标散射响应矩阵, \mathbf{N}_s 为感知噪声项。若 \mathbf{X} 为随机矩阵,则常见感知性能指标(如估计误差、感知互信息量和输出信噪比)都将具有随机性,RMT可用于研究其在大维条件下的渐近行为。

RMT在ISAC中的价值主要体现在3个方面:1)将随机通信波形带来的瞬时性能波动转化为统计平均意义下的可分析规律;2)为大规模阵列下的感知性能提供确定性等效表达;3)为通信-感知联合资源分配与系统设计提供可解释的理论基准。

2.2 通信随机性与感知确定性的机理冲突

ISAC系统要求发射信号兼具信息载体与探测波形的双重角色,这导致了确定性-随机性权衡^[9]。

2.2.1 感知确定性

经典雷达理论中,为了获得良好的检测性能,发射波形的设计通常遵循严格的约束。例如,为了获得高距离分辨率,波形需要具有大的信号带宽;为了区分不同速度的目标,波形需要具备特定的多普勒敏感性;为了防止强目标掩盖弱目标,波形的自相关函数应当接近冲激函数,具有极低的旁瓣电平。同时,雷达信号处理高度依赖发射波形的先验已知性,以实现匹配滤波增益的最大化。

2.2.2 通信随机性

通信的本质是传递信息。根据香农信息论,承载信息量越大的信号,其不确定性越高,统计特性越接近于高斯白噪声。当这种携带随机数据的通信波形被用于感知探测时,会

引入新的问题。每次发射的符号序列都是随机变化的,这导致波形的时域包络和频谱结构不再固定。这种随机性直接破坏了信号的相干性。在雷达信号处理中,通常利用匹配滤波器来提取目标回波。当使用随机波形进行匹配滤波时,其输出的模糊函数在距离-多普勒平面上不再呈现规整的冲激响应形态,而是会出现剧烈起伏的、随机分布的高电平旁瓣。这些由通信数据随机性引起的旁瓣,在物理上并不代表真实的目标,但其影响不可忽略。传统的雷达信号处理方法,在面对这种具有统计随机性的旁瓣时往往失效。

2.3 基于通信信号的感知性能极限分析

为了度量随机通信信号驱动下的平均感知性能,已有研究提出了遍历线性最小均方误差(ELMMSE)概念^[10]。设目标参数为 $\boldsymbol{\theta}$,基于观测 \mathbf{Y}_s 的线性估计为 $\hat{\boldsymbol{\theta}}$,则其均方误差为:

$$\text{MSE} = \mathbb{E} \left\| \boldsymbol{\theta} - \hat{\boldsymbol{\theta}} \right\|^2 \quad (5).$$

当发射信号 \mathbf{X} 为随机变量时,可进一步在 \mathbf{X} 的统计意义下取期望,定义遍历误差指标。该类指标能够反映系统在不同通信数据激励下的平均感知能力,而非仅针对某一次固定数据块的瞬时结果。该研究初步验证了在有限快拍条件下,忽略通信数据随机性将导致对感知能力的过度理想化评估。

感知互信息量(SMI)是近年来用于度量随机信号条件下感知性能的重要指标之一^[11]。其基本思想是:接收回波观测中包含了多少关于目标散射响应的信息。对于已知发射信号 \mathbf{X} 的线性高斯回波模型,感知互信息定义为:

$$I_s = I(\mathbf{G}; \mathbf{Y}_s | \mathbf{X}) \quad (6).$$

SMI表示在已知发射信号条件下,观测 \mathbf{Y}_s 对目标响应 \mathbf{G} 所消除的不确定性大小。若进一步假设 $\text{vec}(\mathbf{G}) \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_c)$,则在线性高斯条件下,互信息可写为:

$$\bar{I}_s = \mathbb{E}_{\mathbf{X}}(I_s) = \mathbb{E}_{\mathbf{X}} \left(\log \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_s^2} \boldsymbol{\Phi}(\mathbf{X}) \mathbf{R}_c \boldsymbol{\Phi}^H(\mathbf{X}) \right) \right) \quad (7),$$

其中, $\boldsymbol{\Phi}(\mathbf{X})$ 为由发射信号结构决定的等效观测矩阵, σ_s^2 为感知链路噪声功率。感知互信息越大,回波观测中包含的目标信息越丰富,系统对目标参数估计、分类与可辨识的潜在能力就越强。虽然SMI不直接等价于检测概率,但在高斯线性模型下,SMI与估计精度密切相关。文献[11]利用随机矩阵理论推导出单目标场景下感知互信息量的闭合表达式,其性能如图3所示。这一理论突破揭示了重要物理意义:尽管瞬时感知性能是随机的,但在大维度极限下,它收敛于一个

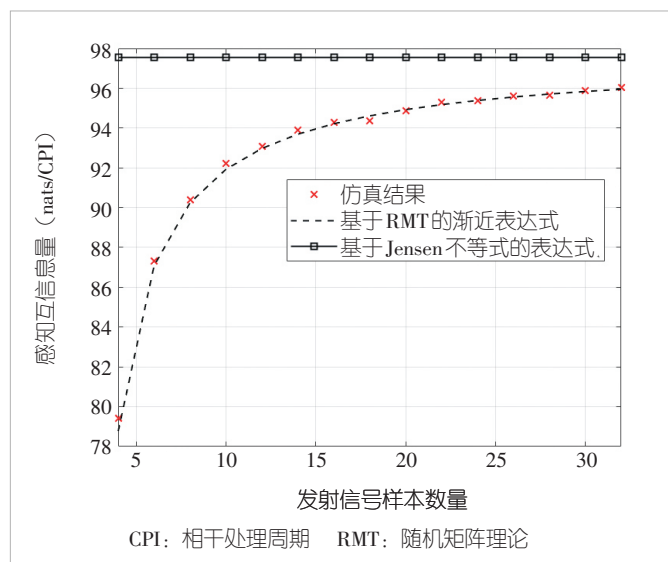


图3 基于高斯通信信号的感知互信息量示意图

确定的值。这为大规模ISAC系统提供了稳定的理论基准，证明了利用随机信号进行高精度感知的可行性。

2.4 低空ISAC中的通信-感知统一指标与性能权衡

ISAC的核心在于如何在同一资源约束下实现通信与感知的协同最优。在理论建模中，通感联合优化常采用如公式(8)所示的形式：

$$\max \alpha f_c + (1 - \alpha) f_s \quad (8),$$

其中， f_c 为通信性能指标， f_s 为感知性能指标， f_c 和 f_s 均转化为最大化形式， $\alpha \in [0,1]$ 为权重系数。对于通信系统，常见性能指标包括：1) 频谱效率/遍历容量：衡量单位带宽内的平均传输能力；2) 误码率：衡量传输准确性；3) 中断概率：衡量链路可靠性；4) 时延与时延抖动：衡量控制链路与时延业务的可达性；5) 覆盖概率：衡量在给定高度与区域内维持链路质量的能力。对于感知系统，常见性能指标包括：1) 检测概率/虚警概率；2) 参数估计均方误差与克拉美罗界(CRB)；3) 输出信杂噪比(SCNR)；4) 感知互信息量；5) 轨迹跟踪误差与目标分辨能力。对于低空场景，上述问题还需叠加目标机动性、三维覆盖、杂波环境和监管安全等约束。

虽然现有研究在复合信号处理方面取得了实质性进展，但当前的评估体系仍面临两个挑战：1) 评价指标的不兼容性：感知指标与通信指标在物理意义与数学形式上缺乏内在一致性；2) 统一理论框架的缺失：现有优化设计多采用约束优化范式，即在单方面性能约束下优化另一方面性能，缺乏能够深度耦合通感本质特征的统一目标函数。

因此，如何突破单一通信或雷达学科的视域局限，通过构建统一的数学模型，形成一套完备且统一的性能衡量体系，是ISAC面临的重要理论挑战。

3 面向低空广域立体覆盖的ISAC关键技术

3.1 多站协同感知

低空广域立体覆盖本质上不是单基站问题，而是多站协同问题。单站感知容易受到遮挡、旁瓣混叠、目标RCS波动与杂波掩蔽的影响，而多站协同可通过多视角观测提升探测概率、定位精度和跟踪连续性。近年来，协同低空ISAC研究重点关注参数估计、数据关联、时空同步和融合架构等问题^[12]。从网络演进角度看，未来低空智联网更接近于由多个地面站点、边缘节点甚至空基节点共同构成的分布式系统。这一方向的难点在于高精度时钟同步、前传/回传约束下的信息压缩、跨站校准、异构观测对齐以及分布式跟踪鲁棒性等。

3.2 可重构智能表面

可重构智能表面(RIS)通过调控电磁反射特性，为低空ISAC提供了重塑传播环境的能力。对于采用天线下倾角优化且主要服务地面的现有蜂窝网络而言，RIS将感知与通信能量重新定向到低空区域，能够有效缓解基站仰角覆盖不足、楼宇遮挡和街区盲区问题。另外，有源RIS通过引入放大能力，可在低信号强度场景下增强有效照射能量。近期研究进而提出了RIS辅助协同成像式ISAC网络，并在理论上推导了相应的克拉美罗下界(CRLB)。结果显示，在相同功率约束下，有源RIS较无源RIS具有更好的低空监视能力，在特定仿真设定下可支持约300 m高度目标的有效成像检测^[13]。

不过，RIS在低空场景中的工程应用仍面临若干关键问题，包括级联信道估计难、相位误差和硬件非理想影响大、部署位置优化复杂，以及在高动态场景下控制开销较高等。因此，RIS在低空ISAC中更适合被用作特定盲区补偿、重点区域增强和协同感知辅助技术。

3.3 可移动天线技术

可移动天线技术(MA)的核心思想是将天线位置作为可优化变量，使系统能够在有限物理区域内主动搜索更优空间采样点，从而改变等效信道、增强目标回波、规避强杂波耦合并重构波束形态。在低空场景中，MA的优势尤为明显。首先，低空传播具有强空间非均匀性，不同位置的传播强度、极化特性和干扰耦合差异显著，MA可据此搜索最优的天线物理位置；其次，面对城市低空强反射和多径鬼影，MA可通过位置微调改善目标与杂波的可分离性；最后，在

多用户或多目标场景下, MA 能降低信道相关性, 提高波束灵活度, 为通信容量与感知精度的协同优化提供新自由度。

已有研究表明, MA 使 ISAC 系统在相同射频链条件下获得比固定阵列更高的通感综合性能, 相关工作在特定模型下报告了相对于固定位置天线的显著性能增益^[14]。进一步的前沿方向还包括可旋转天线、位置-朝向联合优化以及 MA 与极化域联合设计等, 它们有望进一步提升低空场景下的波束管理与杂波抑制能力^[15]。

3.4 空间-极化域联合优化

低空环境中的杂波更加复杂, 通常具有特定的极化敏感性(如垂直表面保持垂直极化), 且在空间场中呈现非均匀分布^[16]。建筑物、路面、水面、树冠和金属设施会产生不同极化响应与空间分布。如果仅依赖固定阵列和数字滤波, 系统往往需要在检测概率、虚警控制和复杂度之间进行折中。未来一个重要方向是将阵列位置自由度、极化自由度与结构化波束设计联合起来, 形成空间-极化域联合优化框架^[17]。这种思路适合低慢小目标监管: 通过极化差异初步滤除主背景, 然后利用天线位置或阵列结构搜索残余杂波的空间零陷, 最后结合联合波束赋形提升目标 SCNR。与传统空域优化相比, 这类方法更符合低空场景的物理本质, 也更有希望获得更大的性能提升。

图4展示了多极化天线阵列对于杂波抑制的性能, 相比于固定天线的均匀线阵, 将静止目标的输出信杂噪比提升了约 20 dB。该结果说明, 在检测低速目标时, 特殊的天线布置方式可以增强系统的杂波抑制能力。因此, 与固定天线阵列相比, 天线角度/位置的变化提供了额外的优化空间, 初步验证了利用可移动天线提升杂波抑制性能的可行性。

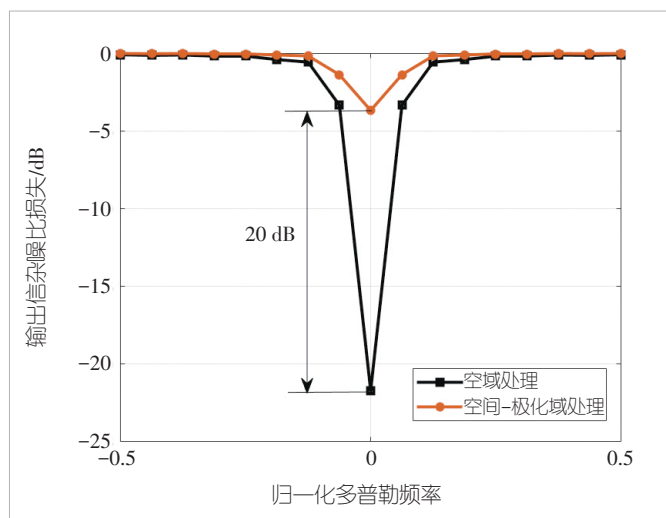


图4 多极化阵列下的杂波抑制性能

3.5 安全、隐私与可信监管

低空 ISAC 直接服务于飞行安全与空域监管, 因此其安全性不是附加问题, 而是系统设计的内生要求^[18]。与传统通信系统相比, ISAC 系统同时承载信息传输和环境认知的功能, 这意味着其一旦受到欺骗、干扰、重放或数据投毒攻击, 影响的不仅是链路质量, 还可能造成对空域态势的错误判断。最新研究已开始关注低空无线网络在信道接入攻击、干扰对抗、身份认证和隐私保护方面的脆弱性。因此, 未来低空 ISAC 系统必须形成物理层抗干扰、网络层可信协作、数据层隐私保护、监管层审计追踪的一体化安全体系。

4 未来研究方向

1) RMT 与 MA 的联合理论建模

现有研究通常关注高维随机信号分析和可移动天线优化, 缺乏统一的数学框架。未来可从位置相关的随机信道矩阵出发, 研究 MA 对特征值分布、确定性等效和通感权衡边界的影响, 进一步建立位置-信道-性能的闭环分析模型。

2) 面向有限维的性能修正

RMT 的多数结论建立在大维极限假设上, 而实际低空系统的天线规模、快拍长度和观测窗口均有限。如何从渐近结果出发, 推导有限维修正项、偏差上/下界和鲁棒设计算法, 是理论走向工程可用的关键。

3) 统一通感指标与跨层优化机制

在当前的低空 ISAC 技术研究中, 通信与感知指标难以统一。未来需要构建兼顾频谱效率、覆盖概率、感知精度、监管安全、时延和能耗的统一目标函数, 并研究其与边缘计算、协同控制和空域管理之间的跨层耦合机制。

4) 面向真实场景的低空传播与杂波测量建模

目前针对低空城市环境的传播和杂波分析相对较多, 而对城郊、农田和机场周边等场景的系统测量和统一数据库仍然不足。未来应加强典型场景下的多频段测量、传播统计建模与公开数据集建设, 为算法评测与系统对比提供统一基准。

5) 向 6G 体系化能力演进

从标准化趋势看, ISAC 正从概念验证逐步转向体系化研究^[19]。这意味着未来低空 ISAC 的研究重点将不再局限于算法层面, 而是转向能否纳入系统架构、接口定义、关键性能指标 (KPI) 体系和工程评估流程。这也将推动低空 ISAC 从理论研究走向实际应用。

5 结束语

本文针对低空广域立体覆盖的需求, 深入剖析了 ISAC 技术面临的理论与技术挑战。面向低空广域立体覆盖的

ISAC, 不是传统通信系统功能的简单叠加, 也不是雷达能力的蜂窝化迁移, 而是面向未来低空物联网的一种新型基础设施形态。其核心任务是通过通信、感知、智能、计算与控制的深度融合, 支撑低空飞行器安全运行、非合作目标监管和空域态势持续认知。从理论上讲, 低空ISAC的关键在于解决通信随机性与感知确定性之间的深层矛盾, 并借助随机矩阵理论分析理论边界。从物理层看, 低空ISAC的关键在于通过协同多站、可重构智能表面、可移动天线和空间-极化域联合优化等手段重构传播环境和空间自由度, 使系统性能逼近理论边界。可以预见, 未来的低空网络不再只是提供连接的通信网络, 而将演变为兼具环境认知、风险理解、智能决策和安全监管能力的综合性信息基础设施。ISAC将成为这一演进过程中的关键枢纽技术, 并为低空经济的规模化、智能化和可持续发展提供核心支撑。

参考文献

- [1] 3GPP TR 36.777 Study on enhanced LTE support for aerial vehicles (Release 15) [S]
- [2] 杨婷婷, 黄宁, 孙黎, 等. AI Edge: 面向智能应用的移动信息服务基础设施 [J]. 中国科学: 信息科学, 2025, 55(10): 2637–2642
- [3] 中国信息通信研究院. 2024年低空物联网发展研究报告 [R]. 2024
- [4] 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
- [5] IMT-2030 推进组. 6G 通信感知一体化协作感知关键技术前沿报告 [R]. 2024
- [6] Xie L, Song S H, 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
- [7] Liu R, Li M, Luo H H, et al. Integrated sensing and communication with reconfigurable intelligent surfaces: opportunities, applications, and future directions [J]. IEEE wireless communications, 2023, 30(1): 50–57. DOI: 10.1109/mwc.002.2200206
- [8] Mozaffari M, Saad W, Bennis M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: applications, challenges, and open problems [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2019, 21(3): 2334–2360. DOI: 10.1109/COMST.2019.2902862
- [9] Xiong Y F, Liu F, Cui Y H, et al. On the fundamental tradeoff of integrated sensing and communications under Gaussian channels [J]. IEEE transactions on information theory, 2023, 69(9): 5723–5751. DOI: 10.1109/TIT.2023.3284449
- [10] Lu S H, Liu F, Dong F W, et al. Random ISAC signals deserve dedicated precoding [J]. IEEE transactions on signal processing, 2024, 72: 3453–3469. DOI: 10.1109/TSP.2024.3427373
- [11] Xie L, Liu F, Luo J J, et al. Sensing mutual information with random signals in Gaussian channels [J]. IEEE transactions on communications, 2025, 73(10): 9437–9452. DOI: 10.1109/TCOMM.2025.3564767
- [12] Xie L, Song S H, Letaief K B. Networked sensing with AI-empowered interference management: exploiting macro-diversity and array gain in perceptive mobile networks [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(12): 3863–3877. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3322828
- [13] Chen Z X, Huang Y X, Ji Z Z, et al. RIS-aided cooperative ISAC network for imaging-based low-altitude surveillance [PP/OL]. (2026-01-22)[2026-02-25]. <https://arxiv.org/abs/2601.16033>
- [14] Ma W Y, Zhu L P, Zhang R. Movable antenna enhanced integrated sensing and communication via antenna position optimization [J]. IEEE transactions on signal processing, 2026. DOI: 10.1109/TSP.2026.3674463
- [15] Zheng B X, Ma T T, You C S, et al. Rotatable antenna enabled wireless communication and sensing: opportunities and challenges [J]. IEEE wireless communications, 2025. DOI: 10.1109/MWC.2025.3611919
- [16] Xie L, He Z S, Tong J, et al. Regularized covariance estimation for polarization radar detection in compound Gaussian sea clutter [J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2022, 60: 5109416. DOI: 10.1109/TGRS.2022.3144658
- [17] Zhou Z J, Ding J Z, Zhang R. Polarforming design for movable antenna systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2026, 15: 161–165. DOI: 10.1109/LWC.2025.3622756
- [18] Xie L, Wang P L, Shen G X, et al. Secure communication in MIMOME movable-antenna systems with statistical eavesdropper CSI [PP/OL]. (2026-01-21)[2026-02-25]. <https://arxiv.org/abs/2601.14755>
- [19] 3GPP TR 22. 837 Feasibility study on integrated sensing and communication (Release 19) [S]

作者简介



何其原, 东南大学在读硕士研究生; 主要研究领域为通信感知一体化。



杨日艳, 东南大学在读硕士研究生; 主要研究领域为通信感知一体化。



谢磊, 东南大学副研究员; 主要研究领域为通信感知一体化、无线通信、雷达信号处理、物理层安全和计算机视觉等; 曾入选教育部海外引才专项计划和东南大学-华为“紫金青年学者”, 主持国家自然科学基金青年项目和江苏省自然科学基金青年项目等; 发表论文20余篇。

低空立体覆盖网络中的关键技术: 网络规划与优化



Key Technologies in Low-Altitude Three-Dimensional Coverage Networks: Network Planning and Optimization

李昕昊/Li Xinhao^{1,2}, 李宵杰/Li Xiaojie³, 张翼/Zhang Yi¹,
韩凯峰/Han Kaifeng⁴, 朱光旭/Zhu Guangxu¹

(1. 深圳市大数据研究院, 中国 深圳 518172;

2. 香港中文大学(深圳), 中国 深圳 518172;

3. 东南大学, 中国 南京 211189;

4. 中国信息通信研究院, 中国 北京 100083)

(1. Shenzhen Institute of Big Data, Shenzhen 518172, China;

2. The Chinese University of Hong Kong, Shenzhen, Shenzhen 518172, China;

3. Southeast University, Nanjing 211189, China;

4. China Academy of Information and Communication Technology, Beijing 100083, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602003

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260424.1635.002>

网络出版日期: 2026-04-26

收稿日期: 2026-01-25

摘要: 随着低空经济的蓬勃发展, 无人机(UAV)物流、空中巡检及城市空中交通等应用场景对无线通信网络提出了全新的挑战, 传统的地面二维网络覆盖已无法满足低空立体空间的通信需求。深入探讨了低空立体覆盖网络中的两大核心环节: 网络规划与网络优化。在网络规划方面, 介绍了一种基于解耦表征学习的低空网络覆盖预测框架, 重点分析了如何利用专家知识与深度学习解决基站波束方向图无法获取以及数据稀疏性问题。在网络优化方面, 聚焦于低空通信场景下的覆盖增强策略, 重点阐述了初始接入阶段的覆盖场景配置对低空覆盖的影响, 以及天线面板角度的优化方法。本研究旨在为构建高效、可靠的低空立体智能网络提供理论依据与技术参考。

关键词: 网络优化; 网络规划; 低空经济; 通信网络; 天线朝向优化; 覆盖场景优化; 立体覆盖

Abstract: With the vigorous development of the low-altitude economy, application scenarios such as unmanned aerial vehicle (UAV) logistics, aerial inspection, and urban air mobility pose brand-new challenges to wireless communication networks. Traditional ground-based 2D network coverage can no longer meet the communication needs of the low-altitude 3D space. This paper deeply explores two core links in the low-altitude 3D coverage network: network planning and network optimization. In terms of network planning, this paper presents a low-altitude network coverage prediction framework based on disentangled representation learning, focusing on analyzing how to use expert knowledge and deep learning to solve the problems of unavailable base station beam patterns and data sparsity. In terms of network optimization, this paper focuses on coverage enhancement strategies in low-altitude communication scenarios, elaborating on the impact of coverage scenario configuration on low-altitude coverage during the initial access phase, as well as the optimization mechanism of antenna panel angles. This paper aims to provide a theoretical basis and technical reference for building efficient and reliable low-altitude 3D intelligent networks.

Keywords: network optimization; network planning; low-altitude economy; wireless communication networks; antenna orientation optimization; coverage scenario optimization; 3D coverage

引用格式: 李昕昊, 李宵杰, 张翼, 等. 低空立体覆盖网络中的关键技术: 网络规划与优化 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 9-17. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602003

Citation: Li X H, Li X J, Zhang Y, et al. Key technologies in low-altitude three-dimensional coverage networks: network planning and optimization [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 9-17. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602003

1 低空立体网络概述

随着低空经济快速发展, 无人机(UAV)物流、空中巡检和城市空中交通等应用对无线通信网络提出了更高

要求。低空立体网络并非单一的UAV通信问题, 而是融合空域运行、无线连接、感知定位以及算力与数据闭环的复杂系统工程。低空立体网络的相关研究通常被概括为低空“智能网联”, 即在低空空域内构建面向低空应用的通信、感知、导航、气象和算力等多网协同能力^[1]。

基金项目: 广东省基础与应用基础研究重大项目(2023B0303000001); 国家自然科学基金项目(U25A20394, 62522118); 国家自然科学基金面上项目(62271081)

在标准化层面,蜂窝网支持UAV已成为低空网络的重要研究方向。以5G新空口(NR)为例,3GPP已开始针对高度变化带来的传播与干扰差异,引入高度相关测量上报、分层配置以及基于航迹信息的资源与移动性管理机制,以提升低空场景下的网络适配能力^[2]。

低空场景与地面二维覆盖的本质区别,不仅在于增加了高度维度,更在于传播与干扰结构发生了系统性变化。经典蜂窝网络主要面向地面终端优化设计:基站天线通常下倾以抑制小区间干扰并增强地面覆盖;因此UAV在空中往往处于天线旁瓣覆盖内,链路增益稳定性差^[3]。与此同时,空中传播更接近自由空间,视距(LoS)传播概率上升带来两个直接后果:其一,空中终端会受到来自多个小区的下行同频干扰;其二,上行发射也可能对多个邻区站点产生明显干扰,影响地面用户体验。因此,空地协同首先是一个“干扰外溢与干扰承受能力”问题,而不仅是“空中信号够不够强”的覆盖问题。低空立体覆盖网络的规划与优化一般会存在3类结构性矛盾。第一类矛盾是“空中覆盖提升”与“地面体验保护”的冲突:如果为了服务空中用户将辐射能量上抬(减小下倾或增加上倾/上瓣能量),地面用户可能受到更强的同频干扰或覆盖变差;而若完全维持地面最优配置,则空中链路质量与稳定性不足。该冲突已在面向UAV走廊/空中通道的网络设计研究中得到证实:为实现真正的3D连接,往往需要调整原本只为地面优化的天线参数与小区形状,但这一调整会与地面用户需求产生矛盾,需要在目标函数里显式建模权衡^[4]。第二类矛盾是“全空域泛在覆盖”与“走廊化供给”的取舍:从监管与安全角度,未来UAV更可能在被划定的航道/走廊中运行;网络侧因此可能从追求“全空域一致覆盖”转向“重点走廊可靠覆盖”,这促使网络规划与优化的目标函数发生转变,并影响数据采集策略与关键绩效指标(KPI)的设定。围绕该取舍,已有的高维贝叶斯优化研究指出:当目标从“空域处处可用”转向“走廊可靠”时,优化得到的配置可能更利于空中可靠性且对地面影响较小;反之若以“整个天空都好”为目标,地面速率可能下降^[4]。第三类矛盾是“标准化可获得信息”与“现场可用信息”的差距:从算法角度,路径损耗与天线增益、波束与多径角谱都需要足够可观测;但在实际网络中,精细的天线方向图/波束细节、设备侧参数以及大规模低空测量数据往往难以充分获取。仅以路径损耗建模为例,过往的工作^[5]指出,若要建模路径损耗往往需要基站天线增益、方位角等参数,而这些信息可能因技术或安全等原因难以获得,于是往往转而采用参考信号接收功率(RSRP)/参考信号接收质量(RSRQ)等更“终端可观测”的指标作为路径损耗建模任务

的目标。

面对上述挑战,必须从低空立体网络全生命周期的角度重新审视“网络规划”与“网络优化”这两个核心环节。一般而言,低空立体网络规划是指在网络建设或扩容初期,根据目标区域或航道的覆盖与容量需求,科学确定基站的选址、天线挂高及初始工程参数配置,其核心在于“从无到有”或“查漏补缺”地构建物理连接底座。这里存在两大核心应用:一是根据现网已布放基站工程参数(简称“工参”)配置(选址、天线挂高、初始基站参数配置等),识别低空航道不同高度网络的覆盖空洞;二是针对需要弥补的覆盖空洞,优化新基站工参配置。针对上述应用与挑战,关键技术是利用基站工参配置实现对低空网络覆盖(如RSRP、SINR等)的预测。低空立体网络优化是在低空网络建成后的运行维护阶段,通过精细调整天线机械/电子下倾角、发射功率、波束方向等参数,解决低空立体场景下的信号弱覆盖、高干扰等问题,其重点在于“精益求精”地提升服务质量(QoS)。然而,现有的4G/5G网络规划与优化手段主要依赖于地面二维路测数据和经验模型,难以直接应用于复杂的低空三维场景。低空路测成本高昂导致数据极度稀疏,且基站波束等关键信息往往呈黑盒状态,这使得低空网络的精准规划与高效优化成为亟待解决的瓶颈问题,因此亟需一种能够融合真实网络数据与智能算法的架构。

以图1所示的低空立体网络为例,本文聚焦低空立体网络智能规划与优化的两类关键技术路线,其共同输入为真实世界蜂窝网络数据(基站工参、三维环境数据、实测信号采样等),目标是构建高效、可靠的低空智联网络覆盖能力:

1) 低空立体网络规划关键技术:采用解耦表征学习框架解决数据稀疏下的覆盖预测问题。该技术可实现对已有基站覆盖的评估,进一步识别覆盖空洞;并可对任意待布放基站在给定工参下的覆盖进行预测,进而指导工参配置优化。

2) 低空立体网络优化关键技术:通过低空同步广播块(SSB)波束码本设计与覆盖场景配置优化,结合天线机械/电子角度协同优化,实现覆盖增强。所提关键技术可以兼顾低空与地面的网络覆盖需求,并能以实采数据加解析模型双驱动的方式对热点地区进行在地化信道建模^[6],并以黑盒零阶优化^[7]的方式对紧密耦合的全网通信性能进行优化。

2 低空立体网络规划

2.1 现状与挑战

传统4G/5G覆盖预测主要面向地面场景,常采用经验模型、随机几何模型或射线追踪方法。但经验模型难以准确刻



图1 低空立体网络智能规划与优化架构的关键技术路线

画环境影响,射线追踪方法又存在建模和计算代价高的问题。近年来,结合测量数据的深度学习方法以及“仿真+测量”的混合范式,为提升覆盖预测精度与效率提供了新思路^[8-10]。

随着低空经济发展,低空覆盖预测的重要性日益突出。与地面场景不同,低空链路更易受直射径和多基站波束协同影响,因此基站波束的对空辐射特性成为预测中的关键因素。然而,天线方向图通常难以直接获取,只能借助工参信息间接表征。

基于工参进行低空覆盖预测仍面临两方面挑战:一是UAV采样通常呈现局部、不均匀分布,难以支持采样外位置的准确预测;二是工参维度高、变化复杂,如何利用有限样本实现对任意工参配置的泛化预测,仍是一大难点。为此,可采用结合专家知识的解耦表征学习方法,从有限运维参数和稀疏采样中学习基站辐射特性,从而实现未知区域的低空覆盖预测^[11]。

2.2 解耦表征

如图2所示,为了利用基站工参配置实现低空覆盖预测,首先需从繁多的基站工程参数中选择与覆盖相关的工参,并将其分类为绝对位置、动态波束、静态波束和加性功

率特征。在工参分类的基础上,基于通信专家知识实现特征压缩,一方面,在空间域特征转化中,结合低空采样点,将基站绝对位置、动态波束特征以及低空采样点位置特征,转化为低维的采样点在基站波束域的极坐标相对位置(距离和角度),在减少输入特征维度的同时使用更易学习的极坐标表征;另一方面,在标签解耦中,不直接对RSRP覆盖进行预测,而是在dB域剥离加性功率特征(功率和带宽)的影响,进一步减少需输入的特征。在前述特征压缩基础上,根据对数距离路径损耗模型(LDPL)模型,信号传播过程中天线的波束增益和路损是天然解耦的,且影响路损的距离和频段特征是近似解耦的,且这些因素的影响在dB域是加性的关系。因此不同的特征可以被送到不同的神经网络学习,学习的表征通过加性融合得到,即

$$y_{m,n} = f_1(x_1) + f_2(x_2) + f_3(x_3) \quad (1),$$

其中, $y_{m,n}$ 表示第 m 个栅格、第 n 个波束待预测的覆盖目标(经标签解耦), x_1 、 x_2 、 x_3 分别为距离、频段和影响波束增益的特征, f_1 、 f_2 、 f_3 分别为特征映射函数,为了提高特征表示能力,这些函数各自采用多层感知机网络实现。需要指出的是,在解耦表征学习网络设计中,也可以用其他神经网络

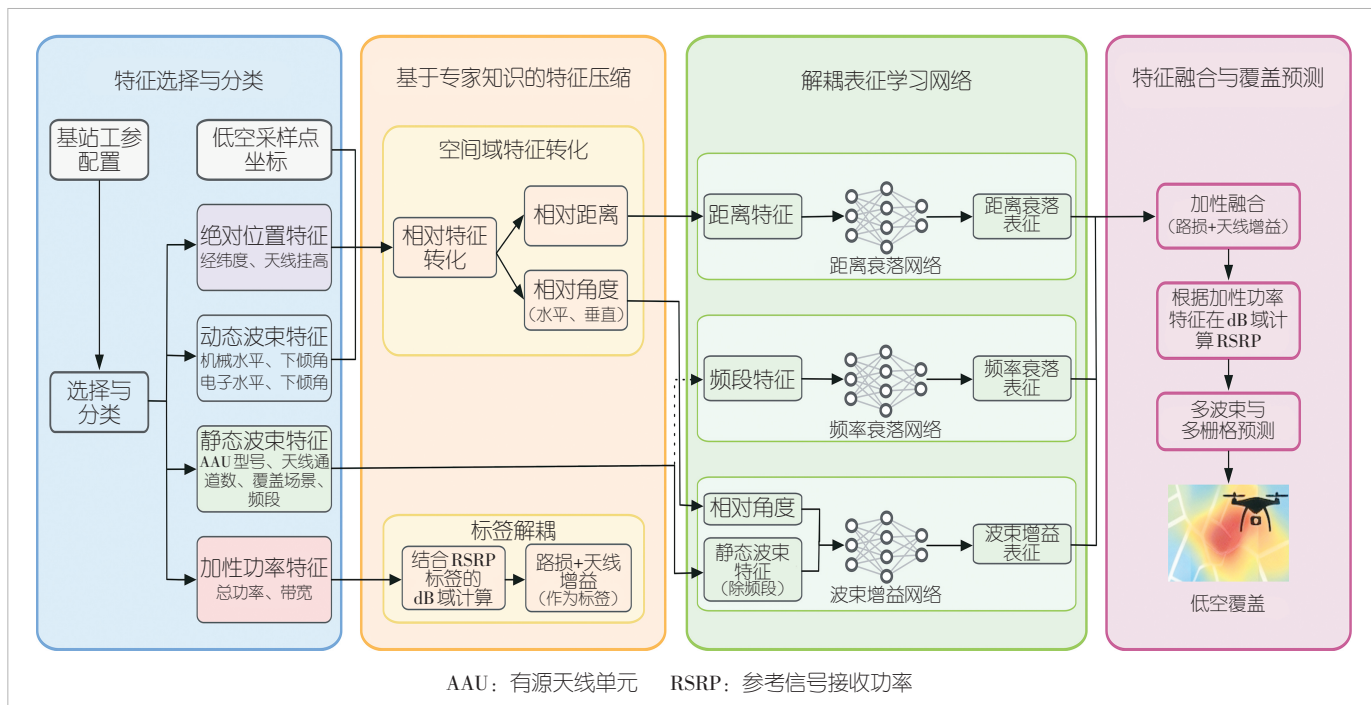


图2 解耦表征学习框架

实现特征映射。完成特征融合后，仅需结合已知的加性功率特征对RSRP进行反推，再对不同波束、栅格RSRP进行预测，即可得到相应的低空覆盖。

理论分析表明，这种受先验知识约束的模型结构在保持与全连接网络相当的学习能力的同时，显著降低了过拟合风险，提升了泛化能力。

2.3 结果

为了验证解耦表征学习方法的性能，研究团队在江西南昌150 m、300 m、500 m低空共采集了93 839个覆盖样本，涉及142个基站（即有142组工参配置）。实验中通过绑定基站和对应的低空覆盖样本，并按基站划分数据集，确保实验验证泛化性的科学性。

在消融实验中，训练、验证、测试集划分比例为1:1:8，通过20次随机划分并平均，分别验证了采用和不采用基于专家知识的特征压缩和解耦表征网络的性能。表1展示了不同模块设计的有效性。值得指出的是，根据所考虑模型先验知识的不同，所介绍的解耦表征学习方法有可能进一步提高性

能。该消融实验结果仅为所考虑信号传播模型下的实验结果。

除此之外，为了验证解耦表征学习方法的泛化性，研究团队使用南昌采集的数据集训练所得到的预测方法，对赣州的地面基站进行覆盖预测，并使用赣州低空150 m高度一条航道上的RSRP实测值进行性能评估。如图3所示，基于基站工参得到的低空覆盖预测结果以栅格均值形式进行了可视化。

为了进一步对航道上的预测和实际采集进行评估，图4

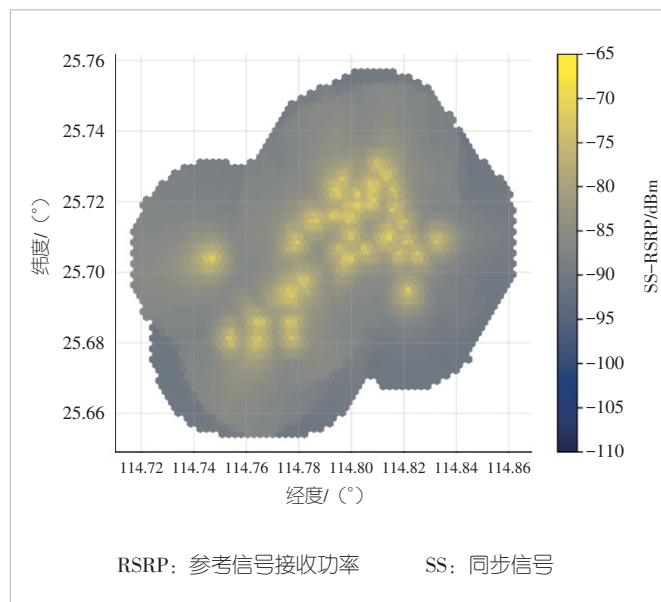


图3 基于基站工参的覆盖结果(栅格均值)

表1 消融实验结果

基于专家知识的特征压缩	解耦表征网络	平均绝对误差/dB
采用	采用	6.3
采用	未采用	6.5
未采用	未采用	7.7

(a)至图4(c)给出了赣州场景中低空实测覆盖、基于工参的预测覆盖以及对应的预测绝对误差空间分布。其中,图4(a)展示了沿低空航道采集的实测SS-RSRP分布,图4(b)

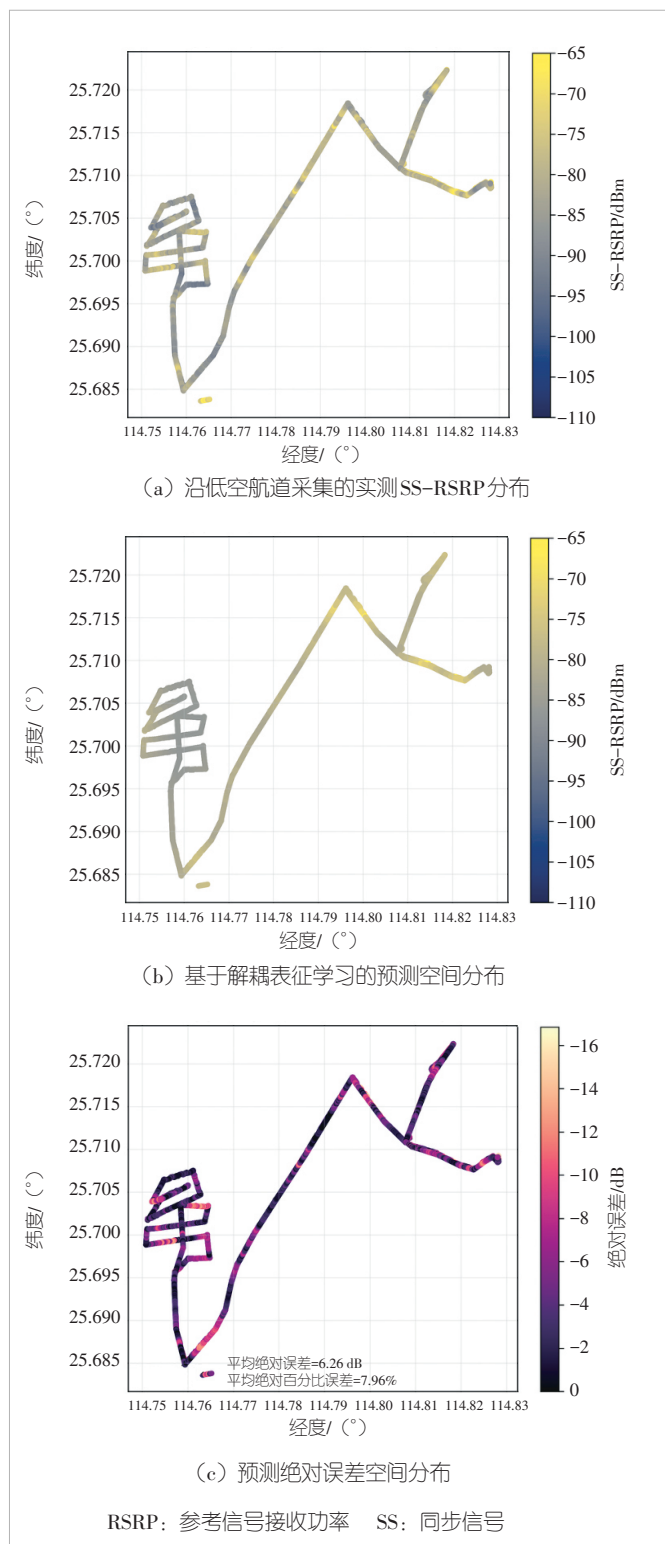


图4 典型区域低空SS-RSRP实测与预测结果对比分析

为工参预测得到的SS-RSRP空间分布,其整体趋势与实测结果保持一致,尤其是在主航道区域,预测结果能够较好地重现信号强弱变化的空间结构。这一现象表明,所提出的解耦表征学习方法在跨城市、跨基站配置的场景下,仍能保持稳定的空间泛化能力。

从图4(c)所示的预测绝对误差空间分布可以看出,大多数采样点的预测误差处于较低水平,预测误差在空间上未呈现大面积聚集或系统性偏移,仅在个别局部区域出现相对较大的误差值。这些误差往往对应于航道转折、局部遮挡或基站切换较为频繁的位置,说明模型在整体泛化良好的前提下,对局部复杂传播条件仍存在一定挑战。总体而言,误差的空间分布特征验证了该方法在未知区域进行低空覆盖预测时的稳定性与鲁棒性。

为进一步从统计角度评估预测性能,图5给出了赣州场景下预测误差的累积分布函数(ECDF)。可以看出,约一半的采样点预测误差低于5.3 dB,90%和95%分位误差分别约为11.8 dB和13.4 dB,对应的平均绝对误差(MAE)为6.26 dB,平均绝对百分比误差(MAPE)为7.96%。该结果表明,在完全未参与训练的城市和基站配置下,模型仍能保持较为集中的误差分布,未出现明显的长尾失效现象,进一步验证了解耦表征学习框架在跨区域低空覆盖预测任务中的有效性。

基于真实低空网络数据的实验验证了该规划方法的有效性。解耦表征框架在数据稀疏的情况下表现出极强的鲁棒性。在实际的未知区域(如赣州飞行路径)进行跨区域、跨设备厂商的预测验证中,该方法实现了5 dB级别的平均绝对误差。

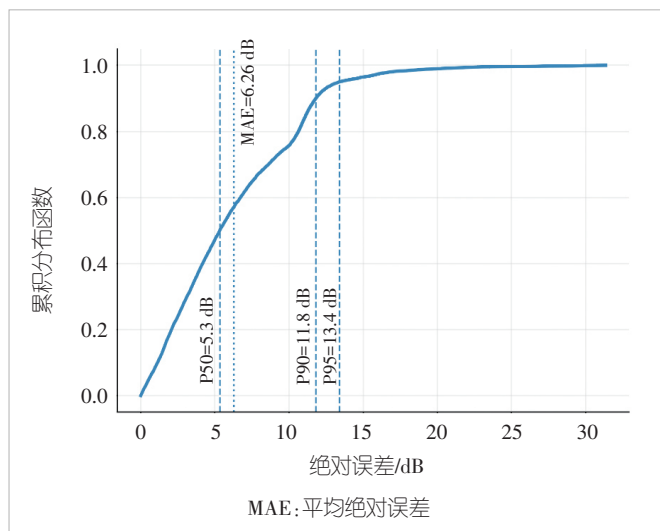


图5 预测误差的累积分布特性

3 低空立体网络优化

3.1 现状与挑战

在传统蜂窝网络中,天线下倾是影响覆盖与容量权衡的重要参数,已有研究表明其可通过改善小区覆盖和抑制邻区干扰提升系统性能^[12]。针对UAV场景,近年来逐步形成了面向空中走廊的优化范式,即不再追求对整个天空的均匀覆盖,而是面向重点航路实现更可靠的空地协同保障^[13]。这类研究表明,低空网络优化的难点不在于单参数调节,而在于参数变化会引发多小区、多高度和多用户类型间的耦合联动,因此本质上属于系统级、黑盒、多目标优化问题。为应对这一挑战,本文从初始接入波束覆盖场景和天线面板角度两方面开展协同优化,并结合在地化信道建模与零阶优化方法实现全网性能提升^[6-7]。

3.2 空地协同覆盖优化:覆盖场景优化与天线朝向优化

面向低空立体覆盖场景,网络优化需要同时解决“UAV能否接入”和“接入后能否稳定覆盖”两类问题。前者主要取决于同步广播信号在目标空域内的可达性,后者则进一步受到天线整体辐射方向、空地干扰关系以及业务波束覆盖能力的共同影响。因此,低空网络覆盖优化应从广播接入层和天线辐射层两个层面协同展开:一方面,通过SSB波束覆盖场景优化改善低空用户的初始接入能力;另一方面,通过天线下倾角与方向角协同调节,对三维空间中的覆盖形态进行重构,从而在增强低空覆盖的同时兼顾地面覆盖质量与邻区干扰控制。

1) 初始接入优化:SSB波束覆盖场景优化

在5G网络中,同步信号块(SSB)是用户设备进行小区搜索、同步和初始接入的基础。对于低空UAV用户而言,能否在复杂的空中信道环境下稳定接收到SSB信号,直接决定了其能否顺利接入网络以及后续的通信质量。传统的地面网络通常采用面向地面用户优化的宽波束或水平波束扫描策略,这导致低空区域往往处于波束覆盖的盲区或弱覆盖区。因此,针对低空立体覆盖场景,自定义SSB波束的码本设计,即覆盖场景配置优化,显得尤为关键。通过调整有源天线单元(AAU)内部的波束权值,可以生成不同形状和指向的SSB波束组合,以适应不同的空域覆盖需求。

针对低空场景,可以设计特定的覆盖场景配置,使SSB波束在垂直维度上具有更宽的覆盖范围或更上翘的指向,从而增强对空中用户的信号辐射。如图6所示,通过对比常规的默认水平覆盖场景配置与针对立体覆盖场景的配置,可以

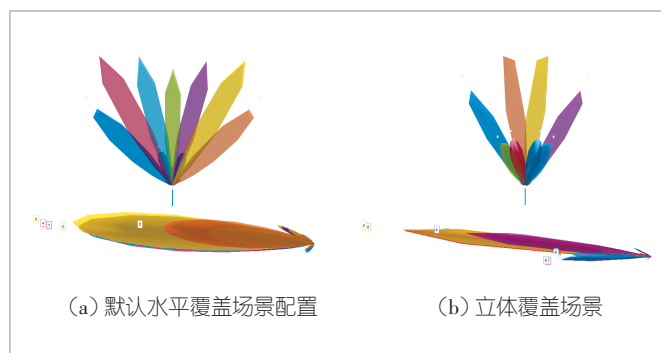


图6 8个SSB波束在不同覆盖场景配置下的形状对比

明显观察到波束能量在空间分布上的差异。优化的码本设计能够确保多个SSB波束在空域形成有效的包络,减少覆盖空洞。

2) 天线朝向优化:下倾角与方向角协同

除了波束码本的数字域优化外,天线面板的物理与电子角度配置也是影响低空覆盖的关键因素。现代大规模多输入多输出(MIMO)基站支持灵活的电子下倾、电子方位和机械下倾、机械方位调节。电子倾角与机械倾角对SSB广播波束与信道状态信息参考信号(CSI-RS)业务波束的赋形影响机制存在显著差异,在低空优化中需要进行精细的协同调节。以下说明与示例均以以下倾角为例。

电子下倾角主要通过调整天线阵列单元的相位来实现波束在垂直方向上的扫描。值得注意的是,电子下倾通常是针对特定波束或波束组进行的。此外,还需要关注SSB波束与信道状态信息参考信号(CSI-RS)波束之间的关系。SSB主要负责广播和公共控制信道覆盖,其波束通常较宽;而CSI-RS用于精确的信道测量和业务波束赋形,波束通常更窄且指向性更强。在低空优化中,两者需要协同设计,确保SSB的覆盖范围能够包含CSI-RS的业务覆盖范围,避免出现“有业务无接入”或“能接入无业务”的现象。

在某些天线设备实现中,调整电子下倾角会对SSB广播波束产生显著的指向改变,但对CSI-RS业务波束的影响可能受限于预定义的码本包络而不会改变。图7对比展示了这一现象:当增加电子下倾角时,SSB广播波束的垂直指向发生明显下压,而CSI-RS业务波束包络没有变化,揭示了两者在电子调节下的非同步性特征。理解这一差异对于避免空地覆盖失衡至关重要。

相比之下,机械下倾角是通过物理调整天线面板的倾斜角度来实现的。机械下倾的调整会对天线发射的所有信号(包括SSB、CSI-RS以及所有数据信道)产生一致的旋转效果。这意味着,增加机械下倾角会同时压低SSB和

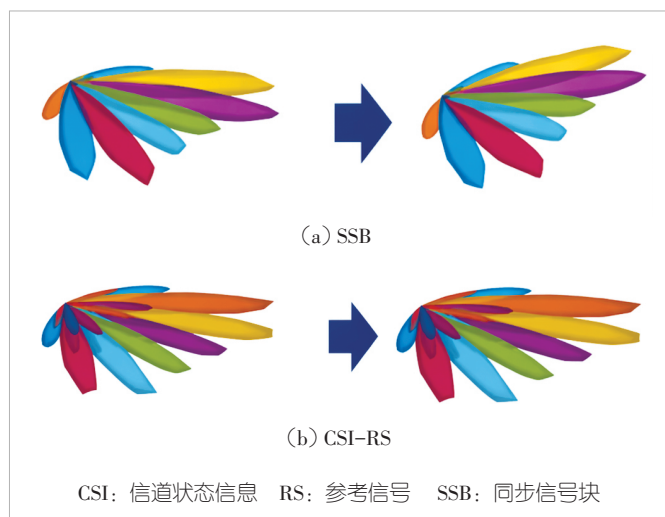


图7 电子下倾角调节对SSB和CSI-RS波束影响的对比

CSI-RS的覆盖范围。在低空优化中,机械下倾角往往被用作“粗调”手段,用于设定基站整体的覆盖基准面,特别是用于抑制对高空远端基站的干扰;而电子下倾角则作为“精调”手段,用于在机械下倾的基础上微调业务波束的指向。图8对比展示了调节机械下倾角时,SSB波束和CSI-RS波束的覆盖包络同步发生刚性旋转,两者的相对位置关系保持不变。

为了在复杂的空地干扰环境中找到最优的机械角度配置,可以结合在地化信道建模(LSCM)技术^[6]与零阶优化算法^[7]。通过LSCM技术精准重构当前环境的多径信道结构,并利用零阶优化算法在巨大的参数空间中自动搜索最优的机械下倾角与机械方位角组合。这种方法能够量化分析不同机械角度对空地SS-RSRP的具体影响,从而找到一个既能保

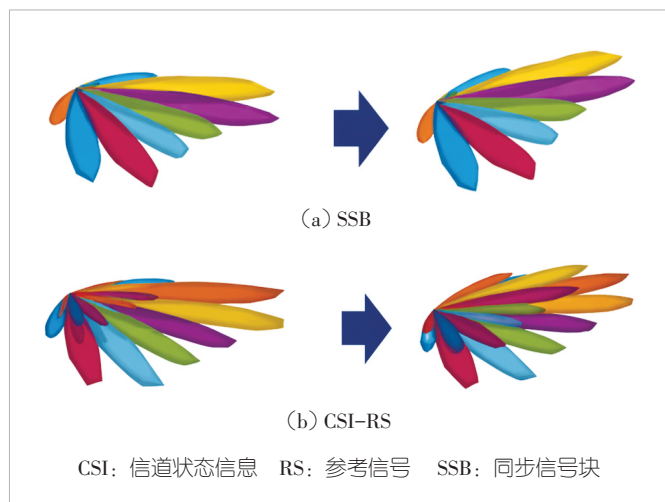


图8 机械下倾角调节对SSB和CSI-RS波束影响的对比

证地面用户覆盖,又能最大化低空UAV接入信号质量的平衡点。

3.3 实验结果

不同覆盖场景配置对低空通信性能影响显著。由图9和图10可见,采用适配低空场景的SSB波束配置后,150 m高度用户的平均接收信号强度(SS-RSRP)由-82.15 dBm提升至-80.41 dBm,平均接收信号信噪比(SS-SINR)由2.93 dB提升至3.55 dB。说明立体覆盖场景配置能够有效增强低空接入信号并改善覆盖质量。

图11对比了两类配置对低空通信性能的影响。从SS-RSRP的概率密度曲线可以看出,采用立体覆盖场景配置后,能够显著提升低空终端接收到的信号强度,有效缓解了传统地面网络对空覆盖不足的问题。立体覆盖场景下的SS-SINR分布同样表现出更优的统计特性,其曲线峰值更靠近高信噪比区间。

由表2可知,相较于优化前状态,基于一维路损模型(First-order)和LSCM的机械角度优化均能提升空地覆盖质量,其中LSCM表现更优。在150 m低空空域中,LSCM将平均RSRP从-73.09 dBm提升至-69.90 dBm,覆盖率(RSRP

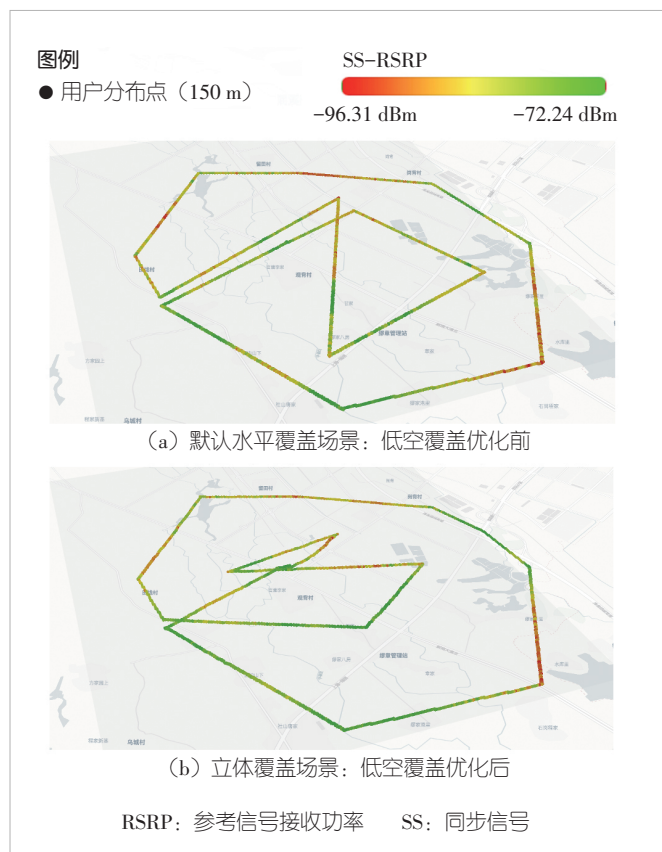


图9 不同覆盖场景配置下低空通信覆盖性能对比(SS-RSRP)

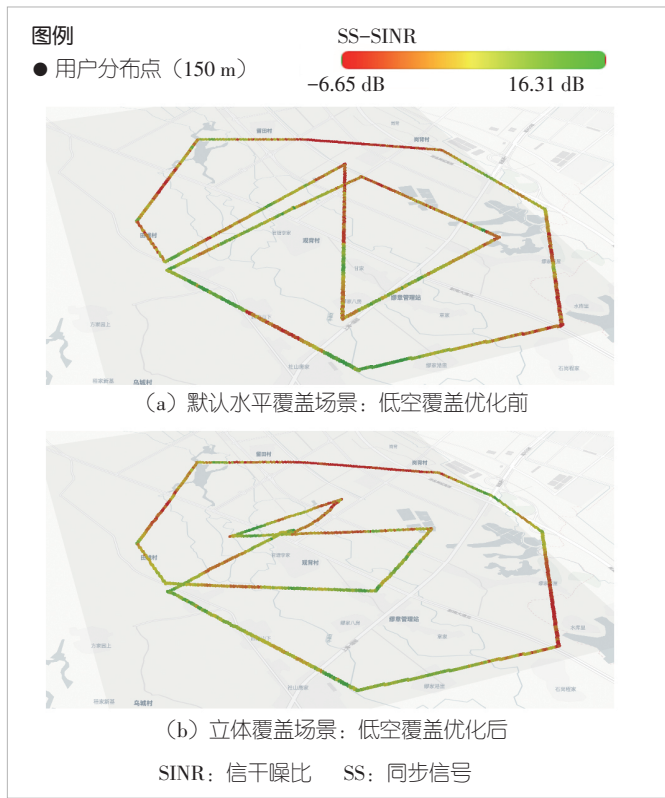


图10 不同覆盖场景配置下低空通信覆盖性能对比(SS-SINR)

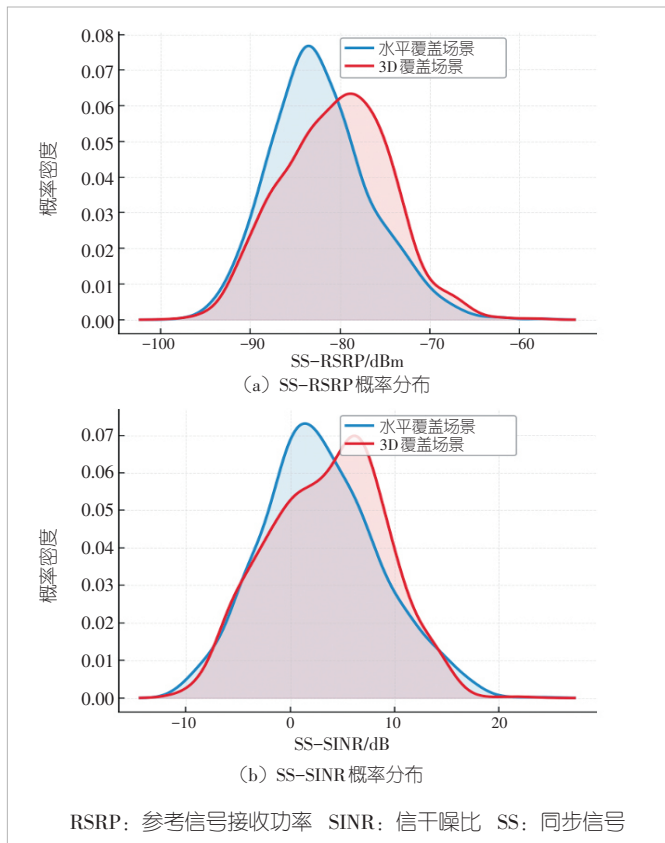


图11 不同覆盖场景配置下的低空通信覆盖性能概率分布特性对比

表2 天线机械角度优化后的空地 RSRP 覆盖提升对比

	平均 RSRP (0 m+150 m)	平均 RSRP (150 m)	覆盖率 (0 m+150 m)	覆盖率 (150 m)
覆盖优化前	-73.47	-73.09	0.26	0.19
一维路损模型	-72.08	-71.85	0.36	0.33
在地化信道建模	-70.56	-69.90	0.45	0.42

RSRP: 参考信号接收功率

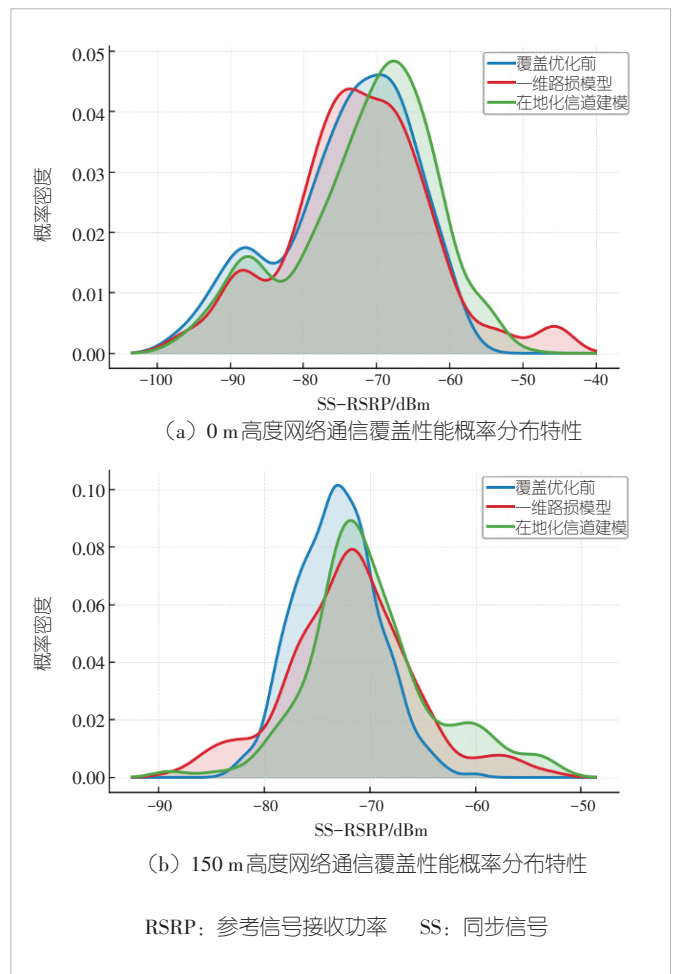


图12 基于不同信道建模方法对低空立体网络通信覆盖性能概率分布特性对比

大于-70 dBm的栅格比例)由0.19提升至0.42;在空地综合维度(0 m+150 m)上,平均RSRP提升至-70.56 dBm,综合覆盖率由0.26提升至0.45。图12中的概率分布变化进一步验证了LSCM在改善低空链路覆盖质量方面的优势。

4 结束语

低空立体覆盖网络是低空经济发展的重要基础设施。本

文围绕网络规划与网络优化两类关键问题,介绍了解耦表征学习驱动的低空覆盖预测方法,以及面向初始接入和三维覆盖重构的优化策略。相关方法在真实低空数据和实测场景中验证了有效性,可为低空智联网的规划建设与运行优化提供技术参考。

参考文献

- [1] 广东省通信学会, 中国信息通信研究院, 中国联合网络通信有限公司广东省分公司. 低空智联网发展研究报告 [R]. 2024
- [2] 3GPP. NR support for UAVs [EB/OL]. (2023-07-06) [2026-02-25]. <https://www.3gpp.org/technologies/nr-uav>
- [3] Ericsson. How mobile networks can support drone communication [EB/OL]. [2026-02-25]. <https://www.ericsson.com/en/blog/2017/11/how-mobile-networks-can-support-drone-communication>
- [4] Benzaghta M, Geraci G, López-Pérez D, et al. Cellular network design for UAV corridors via data-driven high-dimensional Bayesian optimization [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2025, 24(9): 7530-7545. DOI: 10.1109/TWC.2025.3561066
- [5] Behjati M, Zulkifley M A, Alobaidy H A H, et al. Reliable aerial mobile communications with RSRP & RSRQ prediction models for the Internet of drones: a machine learning approach [J]. Sensors, 2022, 22(15): 5522. DOI: 10.3390/s22155522
- [6] Zhang S T, Ning X Z, Zheng X, et al. A physics-based and data-driven approach for localized statistical channel modeling [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(6): 5409-5424. DOI: 10.1109/twc.2023.3326209
- [7] He P C, Lu S Y, Xu F, et al. A parallel zeroth-order framework for efficient cellular network optimization [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(11): 17522-17538. DOI: 10.1109/TWC.2024.3454106
- [8] Feng B, Zheng M, Liang W, et al. A recent survey on radio map estimation methods for wireless networks [J]. Electronics, 2025, 14(8): 1564. DOI: 10.3390/electronics14081564
- [9] Li Y M, Li Z Y, Gao Z H, et al. Geo2SigMap: high-fidelity RF signal mapping using geographic databases [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN). IEEE, 2024: 277-285. DOI: 10.1109/dyspan60163.2024.10632773
- [10] 李昕昊, 韩凯峰, 朱光旭. 基于现实网络数据的通信感知一体化网络覆盖预测与优化 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 57-64. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404009
- [11] Li X J, Cai Z J, Qi N, et al. A disentangled representation learning framework for low-altitude network coverage prediction [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2026, 25(5): 6261-6276. DOI: 10.1109/TMC.2025.3637091
- [12] Dandanov N, Al-Shatri H, Klein A, et al. Dynamic self-optimization of the antenna tilt for best trade-off between coverage and capacity in mobile networks [J]. Wireless personal communications, 2017, 92(1): 251-278. DOI: 10.1007/s11277-016-3849-9
- [13] Bernabè M, Lopez-Perez D, Gesbert D, et al. On the

optimization of cellular networks for UAV aerial corridor support [C]//Proceedings of 2022 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2022: 2969-2974. DOI: 10.1109/GLOBECOM48099.2022.10001469

作者简介



李昕昊, 香港中文大学(深圳)与深圳市大数据研究院联合培养在读博士研究生; 主要研究领域为无线通信中的网络优化等。



李宵杰, 东南大学在读博士研究生; 主要研究领域为频谱感知、智能无线接入网络、超大规模MIMO系统等。



张翼, 深圳市大数据研究院副研究员; 主要从事通感一体化、基于电磁理论的信道建模相关研究。



韩凯峰, 中国信息通信研究院高级工程师; 主要研究方向为面向6G的无线人工智能、通信感知一体化技术; 主持和参与国家级和省部级研究项目10余项, 获国内外最佳论文奖4次, 发表论文50余篇。



朱光旭, 深圳市大数据研究院网络与机器智能中心研究员、国家级青年人才; 主要从事边缘智能和无线网络优化与网络规划研究。

从通信连续性到通感连续性: 通感一体化切换技术



From Communication Continuity to Communication-Sensing Continuity: Handover Technologies in ISAC Networks

焦志琨/Jiao Zhikun, 陈力/Chen Li

(中国科学技术大学, 中国 合肥 230026)
(University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602004

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260422.1734.005>

网络出版日期: 2026-04-23

收稿日期: 2026-01-23

摘要: 通感一体化 (ISAC) 网络的发展促使切换技术从传统的“通信连续性”向“通信-感知双连续性”演进。从链路级与网络级两个维度系统梳理了 ISAC 切换关键技术。在链路级层面, 阐述了感知辅助切换与感知服务切换两种典型范式; 在网络级层面, 剖析了网络级感知切换与网络级 ISAC 切换的核心挑战, 提出了相应的感知切换流程, 并总结了用户关联的最新研究进展与未来方向。针对网络级感知场景, 借鉴通信切换方法, 设计了模糊感知切换算法, 仿真验证了其优越性能。相关工作可为 ISAC 网络的移动性管理提供理论参考与技术支持。

关键词: 切换; 通信-感知双连续性; 用户关联; 模糊逻辑

Abstract: The development of Integrated Sensing and Communication (ISAC) networks drives the evolution of handover technology from traditional communication continuity to communication-sensing dual continuity. The key technologies of ISAC handover are systematically reviewed from both link-level and network-level perspectives. At the link level, two typical paradigms, namely sensing-assisted handover and sensing-service handover, are elaborated. At the network level, the core challenges of network-level sensing handover and network-level ISAC handover are analyzed, corresponding sensing handover procedures are proposed, and the latest research progress and future directions of user association are summarized. For network-level sensing scenarios, a fuzzy sensing-based handover algorithm is designed by drawing on communication handover methods, and its superior performance is verified through simulations. Theoretical reference and technical support for mobility management in ISAC networks are provided by the related work.

Keywords: handover; dual continuity of communication and sensing; user association; fuzzy logic

引用格式: 焦志琨, 陈力. 从通信连续性到通感连续性:通感一体化切换技术 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 18-26. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602004

Citation: Jiao Z K, Chen L. From communication continuity to communication-sensing continuity: handover technologies in ISAC networks [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 18-26. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602004

随着低空经济提升至国家战略新兴产业高度, 构建“广域立体覆盖”的低空网络已成为第6代移动通信系统(6G)的核心愿景之一。在物流配送、空中交通及应急救援等低空应用场景中, 无人机、电动垂直起降飞机(eVTOL)等航空器的常态化作业, 本质上依赖于高质量的通信与感知保障。

通信感知一体化(ISAC)旨在通过共享频谱、波形与硬件资源, 在单一系统中同时实现无线通信与雷达感知。然而, 链路级ISAC研究存在小区间干扰严重、感知性能有限、感知范围易受障碍物遮挡等缺陷。为克服上述局限, 网络级ISAC成为必然趋势。在网络化架构下, 基站间通过协同调

度、多点探测和联合信号处理, 扩大了通信与感知覆盖范围, 提升了通信性能与感知精度, 增强了系统的抗干扰能力。网络级ISAC方案为低空航空器的轨迹追踪、入侵检测及协同避障等提供了低成本、高可靠的系统级方案。

网络级ISAC在提供性能增益的同时, 也为移动性管理带来了前所未有的挑战。在广域立体覆盖场景下, 低空航空器的高机动性以及视距(LoS)链路的频繁变换, 严重影响了通信与感知性能, 这要求系统必须在动态通感协作簇之间进行任务迁移。对于网络级ISAC而言, 切换的内涵已发生深刻演变: 在目标移动过程中, 不仅要维持控制链路与数据传输的“通信连续性”, 还要保障目标状态信息能够平滑交

接而不丢失,即实现“感知连续性”。传统的以通信质量为单一导向的切换准则,已难以满足网络级ISAC对目标追踪实时性与稳定性的严苛要求。研究从通信连续性向通信-感知双服务连续性跨越的切换技术,已成为支撑低空经济正常运行的迫切需求。

为系统性地解决上述挑战,本文从链路级和网络级两个层面对ISAC切换技术进行了全面梳理与研究。此外,针对网络级感知切换场景,借鉴传统通信切换方法提出了一种有效解决方案。

1 链路级切换

链路级ISAC是指在单一收发链路内实现通信与感知,通过共享硬件和频谱资源,在点对点传输中寻求通感性能的最优折中。链路级切换主要关注单基站或相邻基站间点对点链路的动态维护与资源重构。ISAC技术将感知能力引入移动性管理流程,催生了两种新的链路级切换范式:一是针对通信任务的连续性,利用感知信息增强通信切换鲁棒性,称为感知辅助切换;二是针对感知任务的连续性,提出的感知服务切换。

1.1 感知辅助切换

在传统通信切换范式中,网络对用户设备(UE)的认知主要依赖于参考信号测量,本质上是对信道衰落与干扰的被动响应。这种方式缺乏对物理环境和UE运动状态的直接感知,导致切换决策常滞后于动态变化,在高移动性、遮挡频发的场景下面临鲁棒性不足的挑战。感知辅助切换利用ISAC的感知功能,通过引入环境感知与运动信息,在小区选择、波束管理及触发机制等方面实现主动精准的切换控制,显著提升高动态场景下通信系统的可靠性。

文献[1]提出了一种完整的感知辅助切换机制。小区级切换在参考信号接收功率(RSRP)筛选小区的基础上,引入感知网络功能(SNF)。SNF根据感知服务请求与感知能力选择合适的感知模式,对UE进行位置与速度估计。基于该运动学信息,网络预测UE在候选小区中的停留时间,并据此动态调整切换参数(包括滞后余量(HOM)与触发时间(TTT)),从而有效提升切换效率。

针对波束级切换,文献[1]提出将感知能力与多波束波束成形相结合,通过通信波束与扫描波束协同获取环境与目标信息,实时构建无线电传播地图,从而预测潜在遮挡并实现有针对性的波束切换。同时,利用ISAC回波信号估计UE运动学信息,可实现波束指向的预测与提前调整,在减少导频与反馈开销的同时提升波束对齐的稳定性,减少通信中断。

文献[2]提出基于距离和基于概率的感知触发算法,引入“Counts-To-Trigger”机制,将连续感知测量符合条件作为切换依据,以密集的运动学测量替代稀疏的RSRP比较,实现更快的切换判决。配合为感知辅助切换设计的帧结构和协议,该方案显著提升系统吞吐量并减少通信中断时间。

在毫米波通信场景下,文献[3]提出利用调频连续波(FMCW)雷达实时感知环境,通过卷积神经网络-长短期记忆网络(CNN-LSTM)深度学习模型处理距离-角度信息,实现提前约1s的遮挡预测(准确率超过90%),从而支持网络在遮挡发生前主动触发切换,将“被动响应”转变为“主动预防”,提升毫米波通信的可靠性。

1.2 感知服务切换

感知服务切换旨在保障网络对无人机等移动目标的感知连续性。由于感知性能对视距链路的依赖性远高于通信,且感知目标不具备主动反馈能力,因此感知服务切换面临独特的挑战。本文从感知切换触发原因和感知拓扑切换两个方面介绍感知服务切换,并综述当前学界相关的感知切换机制与算法。

1.2.1 感知切换触发原因

根据文献[4],本文将感知切换触发原因分为以下4类:

- 1) 感知精度需求:在一段时间内,若目标链路的感知回波RSRP、信干噪比(SINR)等指标超过源链路一定阈值,则触发切换,相当于通信切换中的A3事件。
- 2) 感知质量保障:当前链路因目标视距丢失、目标距离过远等因素导致RSRP或SINR低于预设阈值,或不同目标在距离、角度等维度难以分辨时,系统触发切换以维持感知精度。
- 3) 干扰管理:通信信号与感知信号可能相互产生强干扰。例如,当目标靠近通信用户时,为保障通信服务质量(QoS)或感知SINR,网络可能强制触发切换,将感知任务转移至干扰较小的邻近基站。
- 4) 资源分配权衡:ISAC系统中时频与功率资源在通信与感知间共享。当某一基站的通信负载激增,无法分出足够资源维持感知波束时,系统需将感知任务卸载至其他空闲基站。

1.2.2 感知拓扑切换

感知服务切换不仅仅是服务节点的变更,更本质地表现为感知拓扑架构的动态重构。ISAC支持多种感知拓扑,根据文献[5],各拓扑特点如下:

- 1) 单基地感知:收发天线位于同一基站。其优势在于无须基站间同步,但深受自干扰和全双工硬件限制的影响。

2) 准单基地感知:收发天线位于同一基站但物理分离,降低了全双工自干扰隔离的要求,但增加了成本。

3) 双/多基站感知:发射与接收位于不同基站。该拓扑能显著扩大感知覆盖范围,且不存在自干扰问题,但需要高精度时频同步。

图1展示了感知拓扑切换的动态过程。图1(a)和图1(b)展示了单基地感知及切换过程:当感知目标在位置A时,基站A自发自收进行感知;随着目标移动至位置B,原感知链路被阻断,此时切换为基站C自发自收。图1(c)和图1(d)展示了双基地感知及切换过程:目标在位置A时,基站A发射、基站C接收;随着目标移动至位置B,原感知链路被阻断,此时切换为基站C发射、基站B接收。在实际感知链路组网中,并非强制指定某一基站采用固定拓扑,而

是常针对不同用户,从多种拓扑链路中选取最佳形式。

1.2.3 感知切换机制与算法

在感知服务切换的实际部署中,如何设计高效的切换机制以维持高质量的跟踪精度,是一个具有潜力的新课题。

文献[4]引入了感知软切换机制。在切换期间,源基站并不立即停止感知,而是与目标基站共同对目标进行探测。源基站的感知数据(如目标轨迹、速度等先验信息)被共享给目标基站作为辅助信息。这不仅避免了目标基站进行耗时的全域波束扫描,还能通过多链路数据融合进一步提升感知精度。

在分布式ISAC网络中,多个基站协同覆盖广阔区域,但单个基站的感知视场往往是局部的。当多个目标在不同基

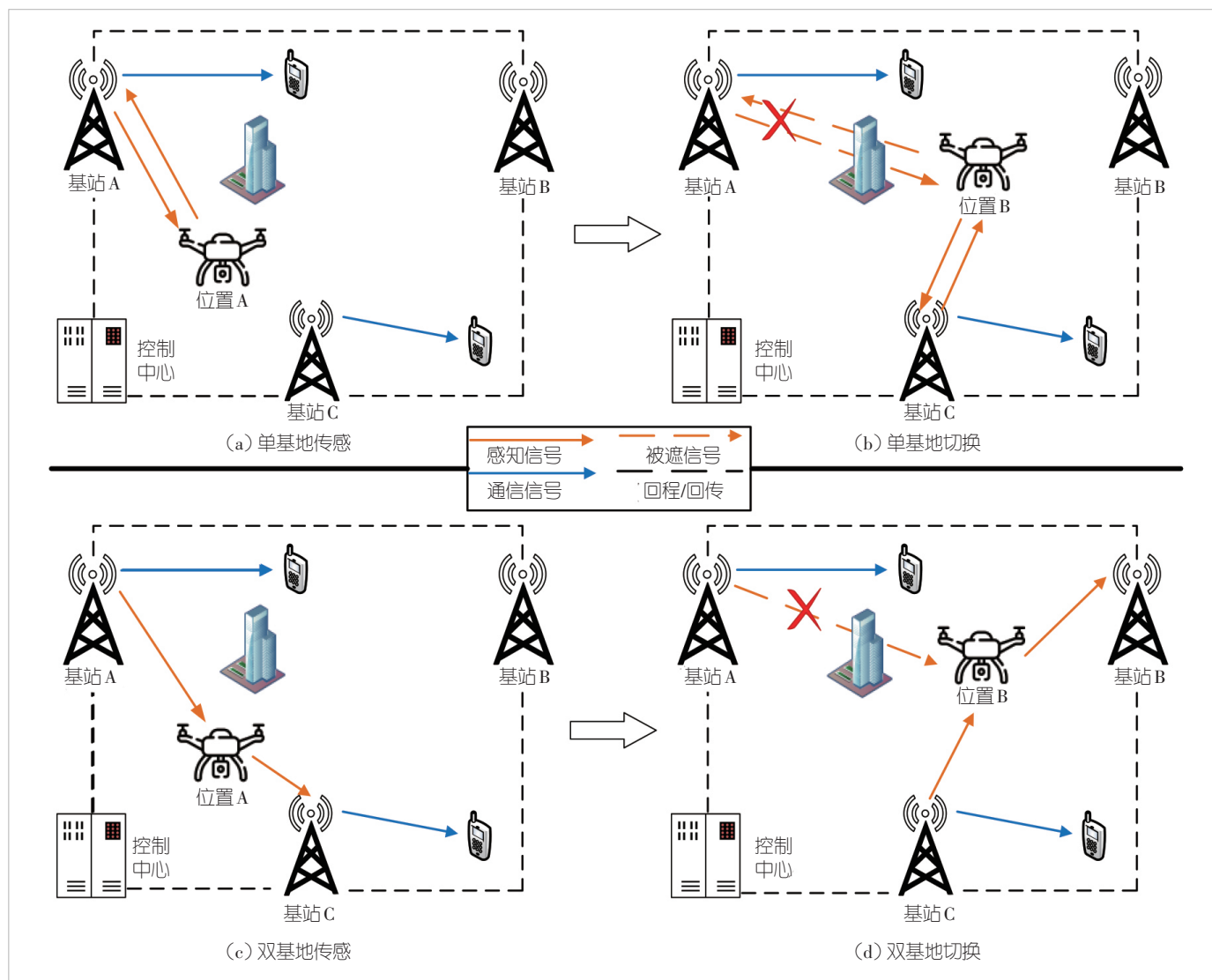


图1 不同感知拓扑的切换过程

站之间穿梭时,系统面临严峻的跨视场连续跟踪挑战:一方面,目标从源基站切换至目标基站时容易出现航迹断裂或身份混淆;另一方面,为维持跟踪精度,基站间需频繁交换感知数据,带来巨大的通信开销。因此,如何在保证跟踪连续性与精度的同时最小化通信负载,成为文献[6-7]研究的核心问题。

文献[6]提出了一种基于“置信传播”的切换框架。该方案利用因子图对数据关联进行建模,仅在预测目标即将进入相邻视场时触发信息交互,且只传递目标的“置信度”而非原始雷达回波。实验表明,该机制在大幅降低回程链路负载的同时,实现了接近集中式处理的跟踪精度。

文献[7]则聚焦于切换过程中的航迹连续性,提出了基于TPMBM滤波器的全轨迹切换方法。该研究引入“轨迹状态”的概念,主张在切换时传递包含历史信息的轨迹密度函数,使目标基站继承源基站的“成熟”航迹,从而有效避免目标基站的“冷启动”误差,提升跟踪鲁棒性。

2 网络级切换

网络级ISAC是指利用分布式协作技术,将多个ISAC节点(如基站、终端)互联,构成协同工作的有机整体^[8]。其中,无小区ISAC作为最具代表性的网络级ISAC架构,彻底重构了传统的无线接入形态,为实现全域无缝的通感服务奠定了全新的物理基础。

根据文献[9],无小区ISAC的核心在于“以用户为中心”,即动态调度周边接入点(AP),为每个用户组成专属的“服务簇”进行联合服务。在通信方面,簇内AP的联合传输彻底消除了小区间干扰,保障了全网均匀的高质量连接;在感知方面,广域分布的AP构建了宏观多基地雷达系统,利用空间分集增益有效克服视距遮挡与RCS起伏,实现高精度连续感知。

若仅分析移动感知网络(即只考虑感知用户的感知服务切换),则称该过程为网络级感知切换^[10]。当关注包含通信用户、感知用户及通感用户的移动ISAC网络,并同时考虑通信切换与感知切换时,则称该过程为网络级ISAC切换。

2.1 网络级感知切换

网络级感知切换主要针对非连接的移动目标(如低空无人机、非网联车辆等),其核心在于动态触发并优化多基站间的协同感知机制。网络首先需要确定协同感知形态,即“选择哪些基站”以及“需要多少基站”。文献[10]指出,基站选择不应以距离为依据,而应基于最大化空间分集增益或最小化位置误差界。网络还需优先筛选与目标具有良好LoS

连接且在几何分布上能形成较大孔径的基站组合,以提升联合估计精度。基站数量的选择需在感知精度与网络开销之间进行权衡。因此,高效的网络级感知切换策略通常是在满足感知指标约束的前提下,优先选择最少数量的基站。

文献[11]提出了一种“虚拟感知小区(VSC)”的切换范式。该范式将VSC定义为一个主基站(PBS)收发、两个辅基站(SBS)接收的协作簇,并利用卡尔曼滤波实现簇内遮挡下的PBS无缝切换,同时通过缓冲区迟滞机制优化簇间切换。然而,固定VSC架构强制采用“1发3收”的静态簇结构,导致系统无法根据实时信道状态动态适配资源:在LoS良好时造成资源浪费,而在遭遇遮挡时又因无法重构几何孔径导致性能急剧恶化。为此,本文提出如图2所示的全新网络级感知初始化与切换框架。

首先,本文中我们将感知链路分为测量集和传输集。传输集是指直接对目标进行联合感知的链路集合,测量集是指在初始化或切换时进行感知导频信号测量的链路集合。在初始化阶段,测量集内各感知链路的发射基站向目标发射感知导频信号,并由接收基站接收经目标反射的回波;随后,接收基站处理该信号,当测量周期达到TTT时,将处理所得的感知指标等信息打包为测量报告,发送至控制中心;控制中心根据该阶段感知指标的平均值,由高到低选择 N 条感知链路作为传输集,对目标进行联合感知。

在切换阶段,当某链路触发A2事件(即感知指标降至一定阈值)后,首先根据感知目标的位置等信息更新测量集,然后完成相应的测量工作。控制中心针对TTT范围内测量集和待切链路的表现,根据相应策略决定是否切换。当决定切换后,待切链路与新传输链路执行感知任务交接。

2.2 网络级ISAC切换

与仅关注单一功能的切换不同,网络级ISAC切换是一种系统级的统一资源调度,涵盖通信用户、感知用户及通感用户。网络级ISAC切换不再局限于用户位置的迁移,而是从系统内所有用户的综合服务质量角度进行决策。

网络级ISAC切换的本质是动态的用户关联(UA)。为实现高效的动态切换,必须首先解决每一时刻的UA问题。目前的学术工作主要围绕静态UA算法展开,这为动态切换奠定了理论基础,而真正的网络级ISAC切换研究尚处于起步阶段。

2.2.1 静态UA

静态UA旨在为不同类型的静止用户选择服务AP,以使

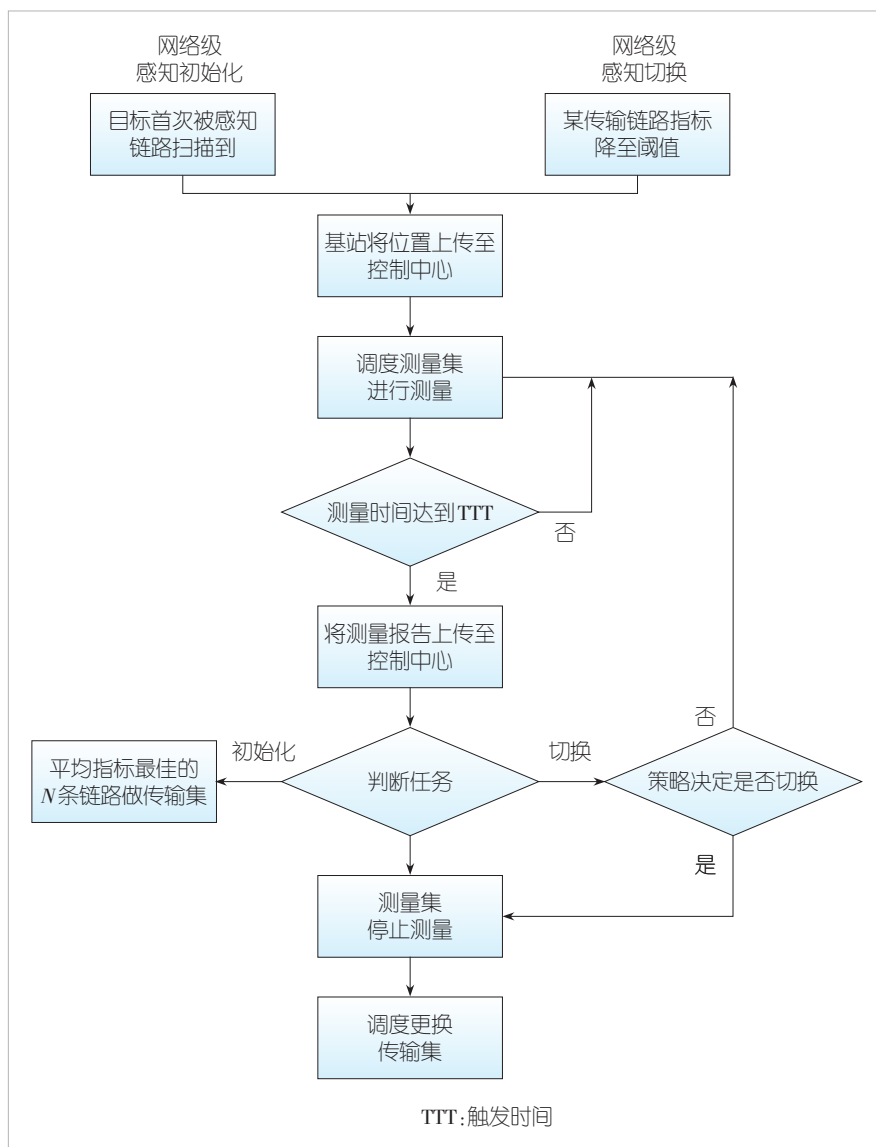


图2 网络级感知初始化与切换流程

一种两步式静态UA方案。该方案首先基于大尺度衰落筛选候选AP，随后结合通信干扰与感知几何构型进行精细化关联，在静态场景下实现了通感性能的帕累托优化。

文献[13]进一步扩展了研究范畴，探讨了通信用户、感知用户和通感用户共存场景下的静态UA问题，建立了统一关联架构，具体如公式(1)：

$$\begin{aligned}
 & \max_{a_{lk}} \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K S_{lk} \cdot R_{lk} \cdot a_{lk} \\
 & \text{s.t.} \sum_{k=1}^K a_{lk} \leq \tau_p, \forall l = \{1, 2, \dots, L\} \\
 & 2 \leq \sum_{l=1}^L a_{lk} \leq X, \forall k = \{1, 2, \dots, K\} \\
 & a_{lk} = 0, \forall \{l, k\}, \text{ where } M_{lk} = 0
 \end{aligned} \quad (1),$$

其中，用户总数为 K ，AP总数为 L 。 a_{lk} 为二进制关联变量，当AP l 服务用户 k 时取值为1，否则为0。 S_{lk} 是AP l 对用户 k 的服务质量，通信用户设为信噪比，感知用户设为信杂噪比，通感用户设为两指标加权。 R_{lk} 为用户优先级权重。约束条件分别为每个AP的最大负载和每个用户能关联的AP数量上下限；矩阵 M 的作用是屏蔽链路质量过低的关联。该优化问题旨在通过联合最大化链路质量和AP优先级来最小化干扰，是典型的混合整数非线性规划问题，文献采用贪婪式算法求解，并仿真验证了其在系统吞吐、感知质量及算法复杂度之间的良好折中性能。

文献[14]则侧重于通信用户和感知用户，提出了一种基于图神经网络的智能化关联方案。该方案创新性地将AP工作模式纳入优化范畴，智能决策AP应作为“通信发射机”“雷达发射机”或“雷达接收机”工作。该智能化方案在降低传统组合优化算法复杂度的同时，实现了接近全域最优的通感综合效用。

2.2.2 动态UA

当引入时间维度与用户移动性后，动态UA即构成网络级ISAC切换问题。动态UA与静态UA最大的区别在于，UA的变化会引入切换开销，从而显著降低网络性能。文献[15]是首个探讨网络级ISAC切换的研究，其专门针对“通感用户”设计了综合移动性管理框架，将切换过程划分为“初始接入”和“动态更新”两个阶段。

在用户入网的初始阶段，由于缺乏先验信息，系统采用静态策略构建服务簇：依据大尺度衰落进行初始聚类，筛选出能稳定覆盖的AP集合；随后引入启发式算法选择接收节点，在初期快速形成有效的通感联合拓扑。随着用户的移动，系统进入动态接入阶段。该阶段设计了动态自适应迟滞切换策略，根据用户速度实时调整迟滞门限，在服务质量与抑制乒乓效应之间取得有效平衡；同时，利用感知预测的轨迹提前判断最佳服务区域，动态执行AP的添加与删除。

尽管网络级ISAC切换目前鲜有研究，但针对网络级通信切换的研究在学界已发展多年，其关于网络级架构下高频

切换与资源调度问题的理论建模与智能决策,对网络级ISAC切换具有重要参考价值。

文献[16]针对以通信用户为中心的无小区网络,考虑到信道老化与观测不完备,将切换问题建模为部分可观测马尔可夫决策过程(POMDP)。该模型通过定义大尺度衰落状态的置信度向量,在非完全观测下优化长期累积速率。在网络级ISAC系统中,感知目标状态同样因杂波与遮挡影响而具有部分可观测性,可建立“通感联合POMDP”,将感知量测的不确定性(如跟踪误差协方差)显式纳入状态空间,从而使切换决策从单一的信噪比驱动,转变为对通感双重状态置信度的综合考量。

在求解算法与触发机制方面,文献[17]提出基于DQN的“条件触发”关联机制,仅在通信收益显著高于切换代价时激活切换,有效抑制乒乓效应。该思路可迁移至ISAC,建立“通信QoS+感知CRB”双重触发门限,并构建多智能体强化学习体系,通过联合学习机制解决多用户之间的资源竞争。

文献[18]作为文献[16]的演进工作,进一步利用软演员-评论家(Soft Actor-Critic)深度强化学习算法解决连续空间控制问题,并证明引入“移动方向辅助”观测能显著提升切换鲁棒性。因此,未来的网络级ISAC切换可进一步将感知提取的“用户轨迹”和“运动矢量”作为强化学习智能体的核心状态输入。此外,其目标函数应从单一的通信速率最大化,扩展为通感综合效用与切换开销之间的博弈:

$$R_t = \alpha \cdot \mathfrak{R}_{\text{com}}(s_t, a_t) + \beta \cdot \mathfrak{R}_{\text{sense}}(s_t, a_t) - \lambda \cdot \mathbb{Z}(a_t \neq a_{t-1}) \quad (2),$$

其中, $\mathfrak{R}_{\text{com}}$ 为通信速率, $\mathfrak{R}_{\text{sense}}$ 为感知增益, $\mathbb{Z}(\cdot)$ 为切换惩罚项, α 、 β 、 λ 为加权系数。

3 网络级感知切换方案

在动态变化的低空网络环境中,感知信号的测量不可避

免地受噪声和误差影响,加剧了切换系统的非线性和不确定性。模糊逻辑方法无须依赖精确的数学模型,能够有效处理这种模糊性。此外,模糊逻辑通过构建规则库,不仅增强了系统的可解释性,还赋予切换策略更强的适应能力和鲁棒性。加之其计算复杂度较低,非常适合在实时网络级感知切换中应用。

受文献[19]在通信切换中利用级联模糊系统进行链路质量预测的启发,本节将该方法迁移至网络级感知切换领域。不同于传统通信切换对吞吐量或丢包率的追求,感知切换更关注感知链路的几何退化趋势、视距条件以及目标回波的连续性。因此,本章针对感知任务的物理特性,对输入变量与隶属度函数进行重构,并结合2.1节提出的网络级感知初始化和切换流程,设计了面向感知连续性的区间二型模糊切换算法。

3.1 模糊感知切换策略

感知链路的质量由回波信噪比(SNR)表征。然而,由于目标非合作、回波信号稀疏且易受遮挡,单次SNR测量波动剧烈。为获得稳定且具预测性的质量指标,本文采用TTT期间测得的所有SNR的平均值和斜率作为切换系统的输入,分别记作 $\bar{\gamma}$ 和 γ' , 如公式(3)和(4),其中 K 为TTT期间测量的SNR个数:

$$\bar{\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^K \gamma_i}{K} \quad (3),$$

$$\gamma' = \frac{K \sum_{i=1}^K i \gamma_i - \sum_{i=1}^K i \sum_{i=1}^K \gamma_i}{K \sum_{i=1}^K i^2 - (\sum_{i=1}^K i)^2} \quad (4)。$$

本文所设计模糊感知切换系统如图3所示。该系统包含待切链路质量评估器、测量链路质量评估器和切换概率评估器3个评估器,每个评估器均是完整的模糊逻辑子系统。系统对待切链路和测量链路分别进行质量评估,并进一步输出切换概率。

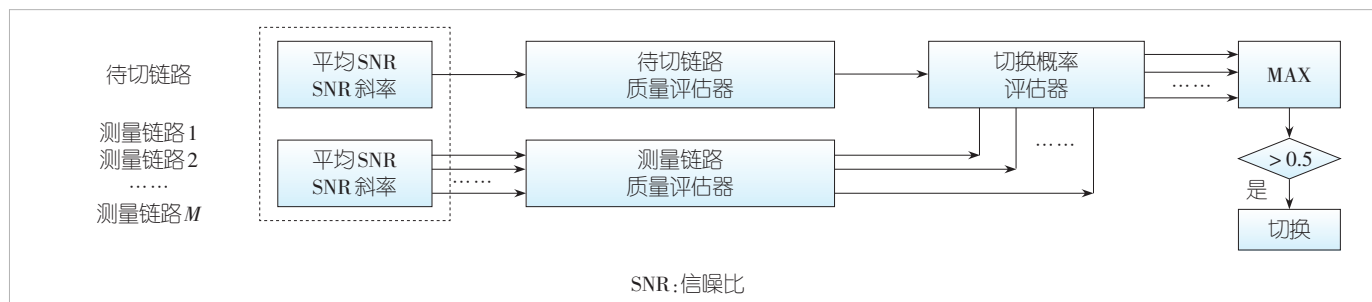


图3 模糊感知切换系统

3.2 模糊逻辑系统

由于低空感知场景中存在目标散射截面积的起伏,本文采用区间二型模糊逻辑系统,通过不确定性区域覆盖回波信号的随机波动,从而提高切换决策的鲁棒性。区间二型模糊逻辑系统包含模糊器、规则库、推理机、降型器和解模糊器五大部分。

图4给出了各变量的模糊器。图4(a)和图4(b)分别对应待切链路平均SNR模糊器和测量链路平均SNR模糊器,

二者论域均为 $[-12, 20]$ dB,并采用“劣”“中”“良”“优”4个模糊集。两者的区别在于:测量链路平均SNR模糊器的隶属函数中心整体向高SNR区域偏移。这是因为对于测量链路,只有当其平均SNR达到较高水平时,才认为其具备切换价值。

图4(c)给出了链路质量和切换概率的模糊器,其论域为 $[0, 1]$,采用“低”“中”“高”3个模糊集,用于表征链路质量评估结果及最终切换概率。图4(d)和图4(e)

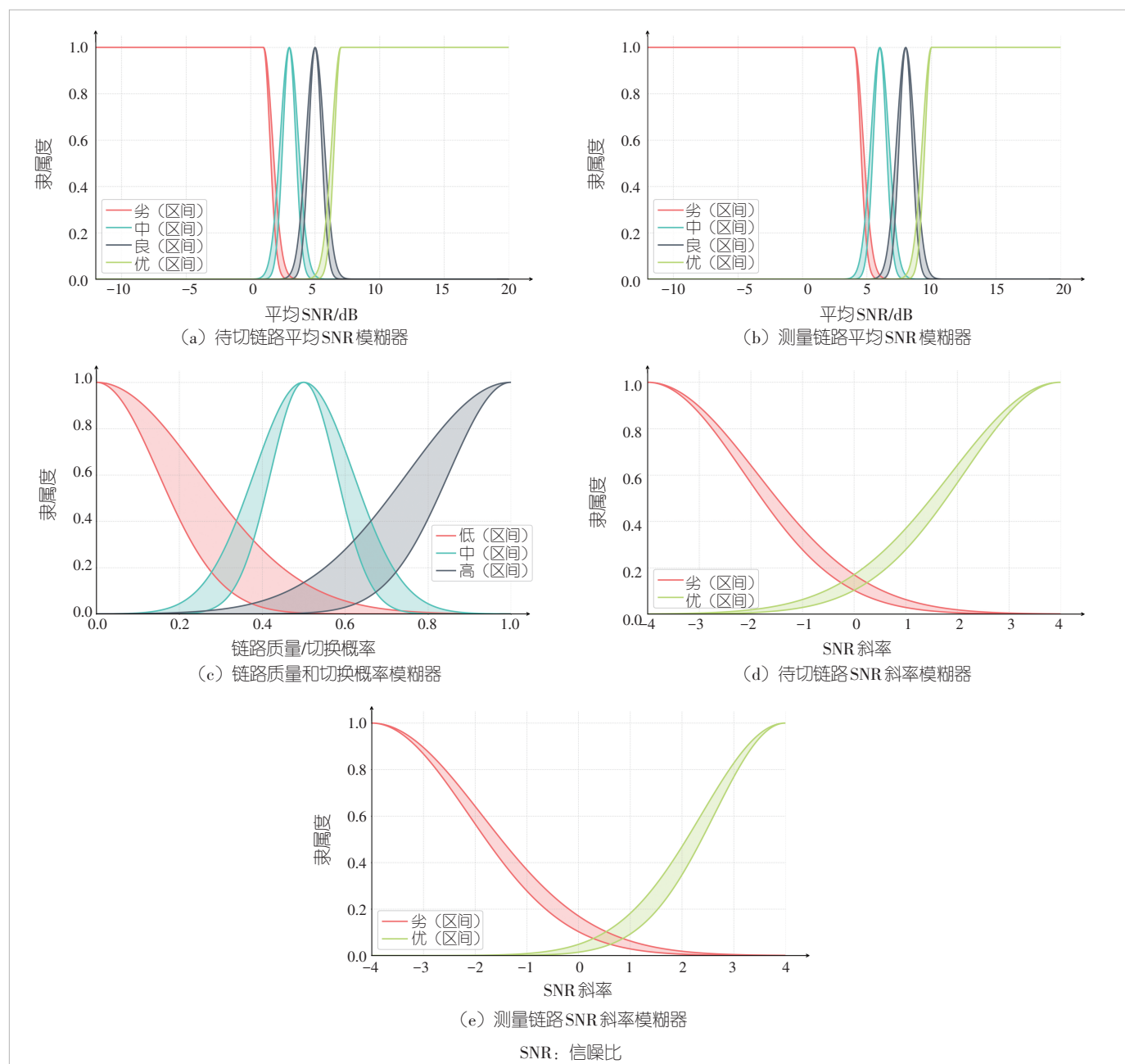


图4 各模糊集的隶属度函数

分别对应待切链路SNR斜率模糊器和测量链路SNR斜率模糊器,二者论域均为 $[-4, 4]$,并采用“劣”和“优”两个模糊集。测量链路SNR斜率模糊器对“优”区间的定义更严格,以突出对候选链路增长趋势的判断。系统其余设置同文献[19]。

3.3 仿真与分析

本文中的感知网络设置如图5所示,各基站之间可组成单/双基地拓扑。路径损耗函数如公式(5)所示。其中, d_1 代表发射基站与目标的距离, d_2 代表目标与接收基站的距离, σ_{RCS} 为散射截面积, X_σ 为阴影衰落,服从均值为零、方

差为1 dB的正态分布。

$$PL(d_1, d_2) = 72.37 + 23.2\lg(d_1) + 23.2\lg(d_2) - 10\lg(\sigma_{\text{RCS}}) + X_\sigma \quad (5)。$$

将目标所在小区及其周围的6个小区内所有基站构成的感知拓扑链路作为测量集。我们将传输集数量设为2,初始化过程即在测量集中选取SNR最高的两条链路。目标无人机在基站覆盖区域内随机移动,每次行程为800 m,随机生成50条路线作为数据集。基站发射功率为40 dBm,噪声功率为-70 dBm,TTT为0.25 s,SNR测量周期为0.05 s,收发天线增益为24.5 dB,雷达散射截面积为2m²,A2事件触发阈值为3 dB,感知链路失败阈值为1 dB。为验证策略有效性,设置标准感知切换策略作为对比,该策略采用A3事件: $Mn \geq Ms + H_{ys}$ 。其中, Mn 为测量链路平均SNR, Ms 为待切链路平均SNR,切换门限 H_{ys} 设为4 dB。

图6展示了不同速度下两种感知切换策略的性能对比结果。在无线链路失败率方面,模糊感知切换策略在低速区间略优于标准策略;在中速区间,通过不确定性建模显著抑制

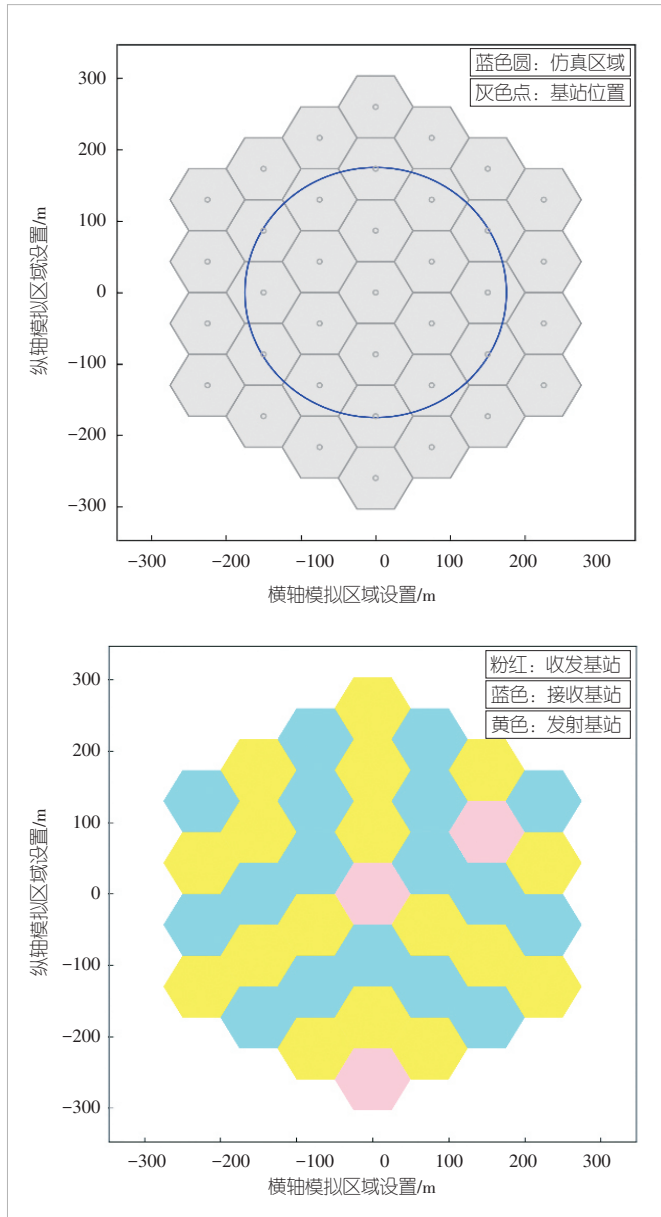


图5 网络级感知网络设置

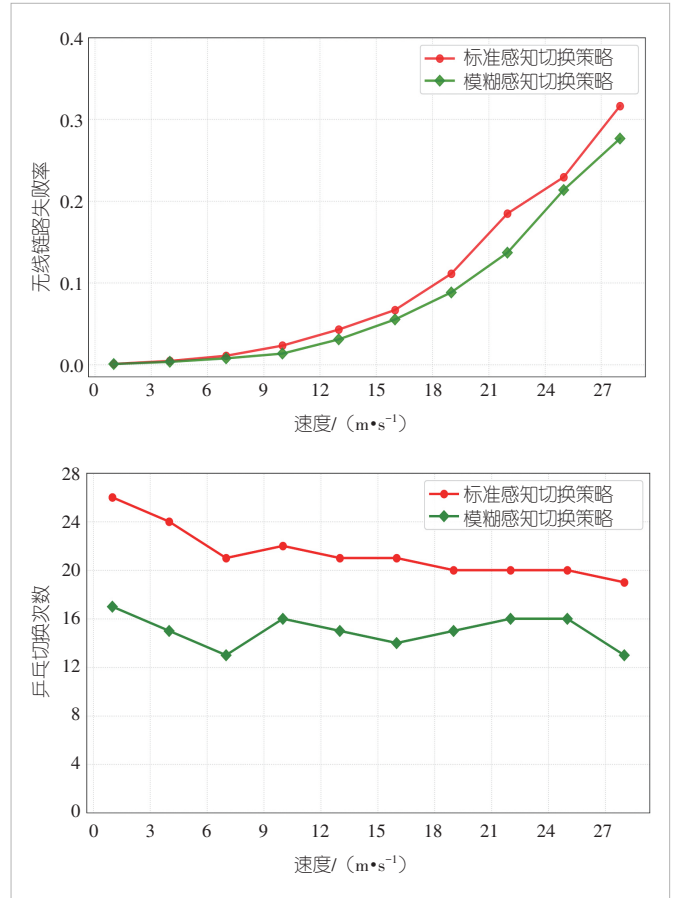


图6 不同速度下感知切换策略性能对比

了失败率的上升;在高速区间,虽因决策保守导致优势收窄,但仍优于标准策略。在乒乓切换抑制方面,模糊感知切换策略凭借区间隶属度对临界波动的缓冲效应,在全速度范围内显著优于标准策略。综合来看,该方案在切换可靠性与系统稳定性上均优于标准策略,为网络级协作感知的移动性管理提供了一种轻量、可解释的解决方案。

4 结束语

本文系统梳理了ISAC网络中的切换技术,揭示了从“通信连续性”向“通信-感知双连续性”跨越的内在逻辑。在链路级层面,分别探讨了如何借助感知技术提升通信切换的鲁棒性,以及如何保障感知服务的平滑交接。在网络级层面,分析了网络级感知切换与网络级ISAC切换的核心问题,提出了网络级感知切换的流程,并总结了网络级ISAC切换的最新进展与未来方向。针对网络级感知场景,本文借鉴传统通信切换方法,设计了区间二型模糊切换算法,并验证了其优越性。在后续工作中,我们可深入研究网络级ISAC切换,探索通感联合POMDP建模,引入深度强化学习方法,为低空经济等新兴场景提供可靠的移动性管理方案。

参考文献

- [1] Zhang H J, Zhang Y X, Liu X N, et al. Resource allocation and mobility management for perceptive mobile networks in 6G [J]. IEEE wireless communications, 2024, 31(4): 223–229. DOI: 10.1109/MWC.004.2300056
- [2] Li Y, Liu F, Xiong H, et al. Look before switch: sensing-assisted handover in 5G NR V2I networks [PP/OL]. arXiv[2025–11–07][2026–02–22]. <https://arxiv.org/abs/2511.05195>
- [3] Demirhan U, Alkhateeb A. Radar aided proactive blockage prediction in real-world millimeter wave systems [C]//Proceedings of ICC 2022 – IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2022: 4547–4552. DOI: 10.1109/ICC45855.2022.9838438
- [4] Ribeiro Y S, Makki B, de Almeida A L F, et al. Mobility management in integrated sensing and communications networks [PP/OL]. arXiv [2025–01–12][2026–02–10]. <https://arxiv.org/abs/2501.08159>
- [5] Lyazidi Y, Equi J, Shreevastav R, et al. ISAC architecture and sensing topology switching in 6G cellular networks [C]//Proceedings of IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). IEEE, 2024: 26–31. DOI: 10.1109/CSCN63874.2024.10849754
- [6] Bai L P, Ge Y, Wymeersch H. Belief propagation-based target handover in distributed integrated sensing and communication [PP/OL]. arXiv[2026–02–10]. <https://arxiv.org/abs/2506.23118>
- [7] Ge Y, Kallio O, Chen H, et al. Target handover in distributed integrated sensing and communication [C]//Proceedings of 2025 IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2025: 1–6. DOI: 10.1109/ICC52391.2025.11161942
- [8] Han K, Meng K T, Wang X Y, et al. Network-level ISAC design: state-of-the-art, challenges, and opportunities [PP/OL]. arXiv[2026–02–18]. <https://arxiv.org/abs/2505.01295>
- [9] Ammar H A, Adve R, Shahbazpanahi S, et al. User-centric cell-free massive MIMO networks: a survey of opportunities, challenges and solutions [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(1): 611–652. DOI: 10.1109/COMST.2021.3135119
- [10] Zhang Y, Shan H G, Chen H B, et al. Perceptive mobile networks for unmanned aerial vehicle surveillance: from the perspective of cooperative sensing [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2024, 19(2): 60–69. DOI: 10.1109/MVT.2024.3373931
- [11] Zhao C B, Feng Y, Luo H L, et al. Networked ISAC-based UAV tracking and handover toward low-altitude economy [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2025, 24(9): 7670–7685. DOI: 10.1109/TWC.2025.3562396
- [12] Naeem A, Amhoud E M, Arslan H. A novel user association scheme for joint radar and communication in cell-free mMIMO systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2025, 74(11): 17738–17753. DOI: 10.1109/TVT.2025.3581637
- [13] Naeem A, Gharib A, Amhoud E M, et al. Scalable association of users in CF-mMIMO: a synergy of communication, sensing, and JCAS [PP/OL]. arXiv [2026–02–18]. <https://arxiv.org/abs/2506.01060>
- [14] Zafari M, Swindlehurst A L. ASSENT: learning-based association optimization for distributed cell-free ISAC [PP/OL]. arXiv[2026–02–18]. <https://arxiv.org/abs/2511.09992>
- [15] Sun X Y, Xue W Y, Li J M, et al. Mobility management framework for cooperative cell-free ISAC systems [J]. IEEE Internet of Things journal, 2025, 12(23): 49784–49800. DOI: 10.1109/JIOT.2025.3604762
- [16] Ammar H A, Adve R, Shahbazpanahi S, et al. Handoffs in user-centric cell-free MIMO networks: a POMDP framework [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(8): 10319–10335. DOI: 10.1109/TWC.2024.3371379
- [17] Xue Q, Sun Y, Wang J, et al. User-centric association in ultra-dense mmWave networks via deep reinforcement learning [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(11): 3594–3598. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3108013
- [18] Ammar H A, Adve R, Shahbazpanahi S, et al. Handoff design in user-centric cell-free massive MIMO networks using DRL [J]. IEEE transactions on communications, 2025, 73(11): 11368–11384. DOI: 10.1109/TCOMM.2025.3592581
- [19] Haghrah A, Haghrah A, Niya J M, et al. Handover triggering estimation based on fuzzy logic for LTE-A/5 G networks with ultra-dense small cells [J]. Soft computing, 2023, 27(22): 17333–17345. DOI: 10.1007/s00500-023-08063-6

作者简介



焦志琨, 中国科学技术大学信息科学技术学院在读硕士研究生;研究方向为通感一体化组网技术、移动性管理技术等。



陈力, 中国科学技术大学教授、博士生导师, 中国科学技术大学“学术领军人才培养计划”入选者;主要研究方向为下一代网络中通信、感知和计算的融合,及其在产业中的落地应用;主持多个国家自然科学基金面上项目、青年科学基金项目,以及国家重大专项课题项目。

基于通信感知一体化的多基站无源协作感知技术



Multi-Base Station Passive Cooperative Sensing Technology Based on Integrated Sensing and Communication

张宏权/Zhang Hongquan¹, 杨恒/Yang Heng¹,
李虎军/Li Hujun², 刘浩田/Liu Haotian³, 尉志青/Wei Zhiqing³

(1. 卡奥斯创智物联科技有限公司, 中国 青岛 266101;

2. 中国电信股份有限公司四川分公司, 中国 成都 610031;

3. 北京邮电大学, 中国 北京 100876)

(1. Haier COSMO IOT Technology Co., Ltd., Qingdao 266101, China;

2. China Telecom Co., Ltd. Sichuan Branch, Chengdu 610031, China;

3. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602005

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260507.1226.002>

网络出版日期: 2026-04-30

收稿日期: 2026-02-26

摘要: 面向低空经济与智能交通等场景对高精度感知与可靠通信协同的迫切需求, 研究了一种基于通信感知一体化 (ISAC) 的多节点无源协作感知技术。针对复杂环境下多基站协作感知中视距 (LoS) 径不稳定、时间偏移 (TO) 与载波频偏 (CFO) 不同步, 以及多基站无源数据融合定位等挑战, 构建了基于正交频分复用 (OFDM) 信号的多点无源协作感知信号处理方案。首先, 采用二维多重信号分类 (2D-MUSIC) 方法实现到达角与离开角估计, 并进行角度补偿与降维处理。其次, 提出适配 LoS 不稳定场景的多点相位同步互相关 (MPSCC) 方法, 有效抑制 TO 引起的测距模糊。在此基础上, 设计多基站无源数据级融合定位算法, 包括 LoS 存在时的椭圆-波达方向 (DOA) 联合定位法与 LoS 不存在时的到达时间差 (TDOA) 联合定位法, 实现高精度三维定位。仿真结果验证了所提基于 OFDM 信号的多点无源协作感知信号处理方案的可行性, 并表明了 MPSCC 方法的有效性。该研究为 6G 通感网络中的多节点协作感知提供了理论支撑与算法基础。

关键词: 通信感知一体化; 多基站协作感知; 同步误差; 数据级融合

Abstract: To address the increasing demand for high-precision sensing and reliable communication in emerging applications such as low-altitude economy and intelligent transportation, a multi-node passive cooperative sensing framework based on integrated sensing and communication (ISAC) is investigated. In practical complex multi-base station sensing scenarios, challenges are posed by unstable line-of-sight (LoS) paths, asynchronous time offset (TO) and carrier frequency offset (CFO), as well as the difficulty of multi-base station passive data fusion localization. To resolve these issues, an orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)-based multi-point passive cooperative sensing signal processing scheme is established. First, the angle of arrival (AoA) and angle of departure (AoD) are estimated using a 2D multiple signal classification (MUSIC) algorithm, followed by angle compensation and dimensionality reduction. Then, a multi-point phase synchronization cross-correlation (MPSCC) method adapted to unstable LoS conditions is proposed to suppress TO-induced ranging ambiguity. On this basis, a data-level fusion localization algorithm is developed, including an elliptic direction of arrival (DOA) joint positioning method when LoS exists and a time difference of arrival (TDOA) joint positioning method when LoS is absent, thereby enabling high-precision three-dimensional localization. Simulation results validate the feasibility of the proposed OFDM-based multi-point passive cooperative sensing signal processing scheme and demonstrate the effectiveness of the MPSCC method. Theoretical insights and algorithmic foundations for cooperative sensing in future 6G ISAC networks are thus provided.

Keywords: integrated sensing and communication; multi-base cooperative sensing; synchronization error; data-level fusion

引用格式: 张宏权, 杨恒, 李虎军, 等. 基于通信感知一体化的多基站无源协作感知技术 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 27-35. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602005

Citation: Zhang H Q, Yang H, Li H J, et al. Multi-base station passive cooperative sensing technology based on integrated sensing and communication [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 27-35. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602005

低空经济作为新质生产力的重要组成部分, 以低空飞行器活动为核心, 通过挖掘实际生产生活中的场景需

求, 推动低空空域资源的开发利用。无人机凭借成本低、体积小、易于部署等优势, 成为物联网中极具应用潜力的设备

载体。随着相关技术的持续进步及政策体系的不断完善，无人机已广泛应用于快递物流、农业植保、应急救援、低空安防等场景，有效支撑各类经济活动，助力经济增长^[1-4]。上述低空场景对于端到端的信息处理能力提出了更高的要求，希望移动终端在实现通信的同时，具备感知物理世界的能力，能够获取场景中目标的状态信息，并对场景业务提供指导和帮助，由此引出了通信感知一体化技术^[5-9]。

通信感知一体化技术使基站在执行通信功能的同时，能够利用接收到的无线通信信号回波对目标进行检测，估计目标相对于基站的径向距离、径向速度及来波方向等参数，并可通过点云实现目标成像。传统感知功能通常依赖雷达实现。当前，无线通信频段正逐步向毫米波、太赫兹等高频段扩展，与传统雷达感知频段的重叠日益增多。同时，为满足通信需求，基站已广泛覆盖人类活动的大部分区域，无须额外建设专用感知设备，即可对主要感知区域实现有效探测。上述发展为通信感知一体化的实现提供了有利条件^[10-11]。

然而，通信感知一体化技术在实际应用中仍面临若干挑战。通信基站建设时，为优化资源利用、降低部署成本，通常会尽量减少各基站覆盖区域的重叠。对于位于多个基站感知范围边缘的目标，由于与各发射源距离较远，接收到的感知信号衰减严重，信噪比显著降低，从而导致感知精度下降。同时，无人机体积小、雷达散射截面（RCS）较小，导致基站接收到的回波信噪比大幅下降，进一步增大了感知误差。此外，在多无人机目标感知场景中存在遮挡效应，较弱的回波易被其他目标的强回波掩盖，单基站目标检测难以获取全部目标信息。鉴于单基站难以实现高精度无人机感知，引入了多基站协同感知的概念。多个基站同时对目标进行感知，利用融合算法整合多组感知结果或原始信号进行联合估计，从而提升系统整体感知性能。在单目标场景中，多基站协同感知可显著提升目标的感知精度；在多目标场景中，综合多角度估计结果，不仅可提升各目标的感知精度，还能获取更完整的目标信息^[12]。

在多基站通感一体化场景中，感知方式可分为主动感知与被动感知。主动感知指多个通感基站主动发射信号，信号经目标反射后由各发射基站自身接收回波，获取目标状态信息并进行多站融合处理。被动感知则指多个发射基站发射信号后，由某一非发射基站（被动基站）接收目标反射信号以完成感知。由于硬件改动小、感知范围广，被动感知受到了学术界与工业界的广泛关注^[13]。

然而，该领域仍面临两大主要挑战：一是在视距（LoS）信道存在且状态未知的情况下，如何缓解或消除多基站间的同步误差；二是如何设计适用于多基站协同的感知数据融合

算法。Wi-Fi 领域的相关研究，如交叉天线互相关方法^[14-15]，为此提供了一定启发，但其算法难以直接推广至移动通信系统。

针对复杂环境下 LoS 径不稳定所导致的多基站无源协作感知中时间偏移（TO）与载波频偏（CFO）不同步问题，以及融合算法缺失带来的挑战，本文构建了基于正交频分复用（OFDM）信号的多基站无源协作感知信号处理方案。该方案有效缓解了异步误差对测距与定位精度的影响，并实现了目标的高精度三维位置估计。具体而言，提出了适用于 LoS 不稳定场景的多点无源协作信号互相关（MPSCC）方法，以消除 TO 引起的测距模糊；同时设计了数据级融合定位算法，包括 LoS 存在时的椭圆-到达方向（DOA）联合定位法，以及 LoS 不存在时的到达时间差（TDOA）联合定位法，从而实现三维高精度定位。上述方法在异步多基站协作感知场景中显著提升了协作感知的鲁棒性与定位性能。

1 系统模型

本文提出的基于通信感知一体化（ISAC）的多基站无源协作感知系统模型如图 1 所示。该协作感知方案需满足以下设定：各主动基站发射的感知信号在被动基站处已知。需要说明的是，感知信号通常采用符合第 3 代合作伙伴计划（3GPP）标准的预定义导频序列或参考信号，以避免通信信号随机结构带来的感知性能下降^[16]。被动基站能够从接收到的混合信号中区分来自多个主动基站的信号，并且已知各主动基站的位置信息。上述设定在实际系统中具有可行性：基站位置固定，因此被动基站可提前获取各主动基站的位置及其发射的导频信号信息；同时，接收端分离不同基站反射信号的技术已相当成熟^[17]。具体而言，系统可利用各基站唯一的物理小区标识及其对应的伪随机置乱序列，通过码分复用

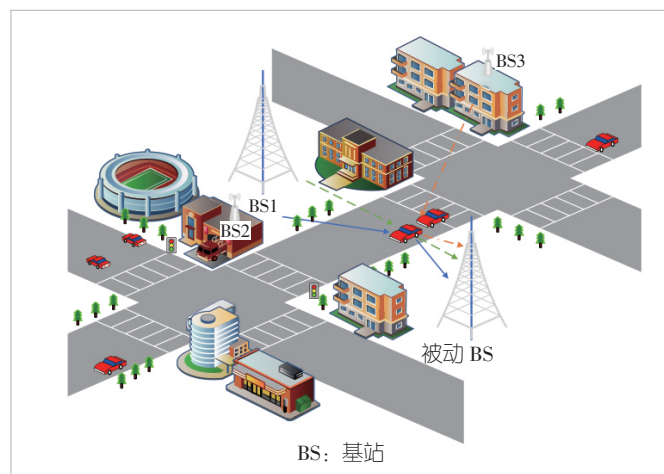


图1 多基站无源协作感知系统模型

技术在时频域实现多站信号的有效解耦与区分^[17]。

OFDM 信号是基站感知的典型信号，我们在此利用 OFDM 信号完成基站的感知工作。其中， $s_i(t)$ 表示第 $i \in \{1,2,3\}$ 主动基站发射的信号，具体为^[18]：

$$s_i(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} s_{i,\text{Tx}}(m,n) \cdot e^{j2\pi f_n t} \cdot \text{rect}\left(\frac{t-mT}{T}\right) \quad (1)。$$

$s_{i,\text{Tx}}(m,n)$ 是第 i 个主动基站传送的来自第 m 个 OFDM 数据包上的第 n 个子载波携带的符号， $T = T' + T_c$ ，循环前缀为 T_c 。子载波间隔为 $\Delta f = 1/T'$ ，总频带为 $N\Delta f$ ，子载波索引范围为 $n \in \{0, \dots, N-1\}$ 。 $\text{rect}\left(\frac{t-mT}{T}\right)$ 表示长度为 T 的矩形窗口。 $f_n = f_c + n\Delta f$ 表示第 n 个子载波的频率。

为简化分析，本文中我们暂不考虑主动基站与被动基站之间由非目标散射引起的非视距 (NLoS) 信道，即仅考虑从主动基站发出、经目标反射后到达被动基站的 NLoS 信号。需要指出的是，在实际复杂环境中，非目标散射的 NLoS 普遍存在，并且可能导致虚假目标。常用的抑制方法为动目标消除技术，即滤除多普勒频率为零或极小的散射径，从而有效减少非目标散射引起的虚假目标。关于复杂多径环境下的鲁棒感知算法设计，将作为后续工作展开。主动基站与被动基站均配置线性平面阵列 (UPA)，以获取目标的三维坐标信息。其中，主动基站 1、2、3 的 UPA 维度分别为 $P_i \times Q_i$ ，被动基站的 UPA 维度为 $P_r \times Q_r$ 。

即使在数据包级同步条件下，被动基站与主动基站之间通常仍无法实现完美同步。此时，被动基站接收到的信号中存在随时间变化的 TO，记为 $\delta_r(m)$ ；此外还存在随时间变化的 CFO，记为 $\delta_f(m)$ 。需要说明的是，此处所涉及的 TO 与 CFO 属于被动基站端的统一同步误差，不随主动基站的不同而变化，即各主动基站与同一被动基站之间的 TO 与 CFO 均相同。

考虑一个三维位置为 (x,y,z) 的移动目标。发射信号经信道传输、目标反射后被被动基站接收。回波信号中包含传播时延以及目标运动引起的多普勒频移。据此，在第 m 个符号、第 n 个子载波上，第 i 个主动基站对应的 NLoS 回波表达式可写为^[13]：

$$\begin{aligned} y_{S,i,m,n} &= \alpha_i e^{-j2\pi n \Delta f (\tau_i + \delta_r(m))} e^{j2\pi m T (f_{d,i} + \delta_f(m))} \\ &\quad \mathbf{a}_r(\mathbf{p}_r) \mathbf{a}_{t,i}^T(\mathbf{p}_{t,i}) s_{i,\text{Tx}}(m,n) + N_{S,i,m,n} \end{aligned} \quad (2)，$$

其中， α_i 为第 i 个主动基站经过目标反射到达被动基站的路径损耗。 $\tau_i = R/c$ 和 $f_{d,i}$ 分别表示第 i 个主动基站经过目标反

射到达被动基站的总传输时延和总多普勒。 $\mathbf{a}_r(\cdot)$ 和 $\mathbf{a}_{t,i}(\cdot)$ 分别表示为接收和发射阵列导向矢量，其中第 (p,q) 个元素分别表示为^[18]：

$$\mathbf{a}_r(p,q) = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d_a (p \cos \varphi_r + q \sin \varphi_r) \sin \theta_r\right) \quad (3)，$$

$$\mathbf{a}_{t,i}(p,q) = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} d_a (p \cos \varphi_{t,i} + q \sin \varphi_{t,i}) \sin \theta_{t,i}\right) \quad (4)。$$

$\mathbf{p}_{t,i} = [\varphi_{t,i}, \theta_{t,i}]$ 和 $\mathbf{p}_r = [\varphi_r, \theta_r]$ 分别表示为接收和发射角度信息，其中 $\mathbf{p}_{t,i} = [\varphi_{t,i}, \theta_{t,i}]$ 表示二维离开角，即 $\varphi_{t,i}$ 为离开方位角， $\theta_{t,i}$ 为离开俯仰角。 $s_{i,\text{Tx}}(m,n)$ 为第 i 个主动基站的发射调制数据，维度为 $P_i Q_i \times 1$ 。

2 多基站无源协作感知信号处理

2.1 角度估计与补偿

为了估计到达角 $\{\varphi_r, \theta_r\}$ 和离开角 $\{\varphi_{t,i}, \theta_{t,i}\}$ ，我们首先剔除已知的调制数据符号，并将其 NLoS 回波数据等效重排为：

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{\text{vec},i,m,n} &= \alpha_i e^{-j2\pi n \Delta f (\tau_i + \delta_r(m))} e^{j2\pi m T (f_{d,i} + \delta_f(m))} \\ &\quad \mathbf{a}_r(\mathbf{p}_r) \otimes \mathbf{a}_{t,i}(\mathbf{p}_{t,i}) + \mathbf{n}_{\text{vec},i,m,n} \end{aligned} \quad (5)，$$

其中， \otimes 为 Kronecker product。我们对公式 (5) 执行传统的 2D-MUSIC 算法^[20]，从而得到 NLoS 到达角估计值 $\{\hat{\varphi}_r, \hat{\theta}_r\}$ 和 NLoS 离开角 $\{\hat{\varphi}_{t,i}, \hat{\theta}_{t,i}\}$ 。

然后，我们利用估计的角度，对公式 (5) 进行角度补偿以获得天线增益，并将 NLoS 接收数据进行矩阵化，如公式 (6) 所示，其中 β_i 表示角度补偿后的路损与增益之和。

当存在 LoS 径时，对 3 个主动基站与被动基站之间的 LoS 径信号，采用与 NLoS 径相同的处理方法，可获得 LoS 到达角估计值 $\{\hat{\varphi}_{r,\text{LoS}}, \hat{\theta}_{r,\text{LoS}}\}$ 与离开角估计值 $\{\hat{\varphi}_{t,i,\text{LoS}}, \hat{\theta}_{t,i,\text{LoS}}\}$ ，二者同样可表示为与公式 (6) 类似的矩阵形式。

$$\begin{aligned} D_{\text{div}} &= \\ \beta_i &\begin{bmatrix} 1 & e^{j2\pi T(f_{d,i} + \delta_f(m))} & \dots & e^{j2\pi(M-1)T(f_{d,i} + \delta_f(m))} \\ e^{-j2\pi \Delta f(\tau_i + \delta_r(m))} & e^{-j2\pi \Delta f(\tau_i + \delta_r(m))} & \dots & e^{-j2\pi \Delta f(\tau_i + \delta_r(m))} \\ \vdots & e^{j2\pi T(f_{d,i} + \delta_f(m))} & \ddots & e^{j2\pi(M-1)T(f_{d,i} + \delta_f(m))} \\ e^{-j2\pi(N-1)\Delta f(\tau_i + \delta_r(m))} & e^{-j2\pi(N-1)\Delta f(\tau_i + \delta_r(m))} & \dots & e^{-j2\pi(N-1)\Delta f(\tau_i + \delta_r(m))} \end{bmatrix} + \\ N_{\text{div}} &\begin{bmatrix} e^{j2\pi T(f_{d,i} + \delta_f(m))} & \dots & e^{j2\pi(M-1)T(f_{d,i} + \delta_f(m))} \\ e^{-j2\pi \Delta f(\tau_i + \delta_r(m))} & \dots & e^{-j2\pi \Delta f(\tau_i + \delta_r(m))} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j2\pi(N-1)\Delta f(\tau_i + \delta_r(m))} & \dots & e^{-j2\pi(N-1)\Delta f(\tau_i + \delta_r(m))} \end{bmatrix} \quad (6)。$$

为便于后续处理并避免高维数据传输，我们采用文献[19]中的矩阵降维方法，对来自3个主动基站的NLoS径与LoS径数据矩阵进行降维处理。由此，来自第*i*个主动基站的NLoS径数据矩阵经降维后，得到的距离向量与速度向量分别为：

$$\mathbf{l}_{i,d} = \beta_{i,cs} \left(1, \dots, e^{j2\pi n \Delta f (\tau_i + \delta_i(m))}, \dots, e^{j2\pi (N-1) \Delta f (\tau_i + \delta_i(m))} \right) + \mathbf{n}_{i,d} \quad (7),$$

$$\mathbf{l}_{i,v} = \beta_{i,cs} \left(1, \dots, e^{j2\pi m T (f_{d,i} + \delta_i(m))}, \dots, e^{j2\pi (M-1) T (f_{d,i} + \delta_i(m))} \right) + \mathbf{n}_{i,v} \quad (8)。$$

来自第*i*个主动基站的LoS径数据矩阵经过降维后的距离和速度向量分别为：

$$\mathbf{l}_{i,d,los} = \beta_{i,cs,los} \left(1, \dots, e^{j2\pi n \Delta f (\tau_{i,los} + \delta_i(m))}, \dots, e^{j2\pi (N-1) \Delta f (\tau_{i,los} + \delta_i(m))} \right) + \mathbf{n}_{i,d,los} \quad (9),$$

$$\mathbf{l}_{i,v,los} = \beta_{i,cs,los} \left(1, \dots, e^{j2\pi m T \delta_i(m)}, \dots, e^{j2\pi (M-1) T \delta_i(m)} \right) + \mathbf{n}_{i,v,los} \quad (10)。$$

2.2 MPSCC 处理和目标高度估计

在多基站无源协作场景中，被动基站产生的TO/CFO同步误差与主动基站无关，且该误差会同时耦合在LoS和NLoS径中。基于此物理特性，MPSCC旨在构建一套不依赖外部时钟基准的“自校准”方案。以下分别针对LoS路径存在与否则两种典型环境，讨论同步误差的消除逻辑及对应的三维定位实现方案。

在多基站无源协作感知场景中，被动基站产生的TO与CFO同步误差与主动基站无关，且该误差同时耦合于LoS径与NLoS径中。基于这一物理特性，MPSCC方法旨在构建一套不依赖外部时钟基准的“自校准”方案。以下分别针对LoS路径存在与不存在两种典型环境，阐述同步误差的消除逻辑及相应的三维定位实现方案。

1) 存在LoS径的情况

假设至少存在一个基站具有LoS径，不妨设该基站为基站1。以基站1的LoS信号作为参考信号，对第*i*个主动基站的数据执行MPSCC处理，即将基站1的LoS信号与第 $\mathbf{l}_{1,d,los}$ 和 $\mathbf{l}_{i,d}$ 个主动基站的接收信号进行两两互相关操作。

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_{1,i} &= \mathbf{l}_{1,d,los} \cdot \text{diag}(\mathbf{l}_{i,d}^H) \\ &= \beta_{i,cs} \beta_{1,cs,los} \left(1, \dots, e^{j2\pi n \Delta f (\tau_{1,los} - \tau_i)}, \dots, e^{j2\pi (N-1) \Delta f (\tau_{1,los} - \tau_i)} \right) \end{aligned} \quad (11)。$$

此操作的本质是利用LoS径作为参考，抵消反射径中相同的接收端相位偏置。

为了估计公式(11)的时延 $\tau_{1,los} - \tau_i$ ，传统的方法有频域变换法和MUSIC法^[18]。下面我们给出频域变换法的详细处理流程。

我们对 $\mathbf{c}_{1,i}$ 进行逆离散傅里叶变换(IDFT)运算，得到：

$$\begin{aligned} R(k) &= \text{IDFT}(\mathbf{c}_{1,i}) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2\pi n \Delta f (\tau_{1,los} - \tau_i)} \times e^{j \frac{2\pi}{N} nk} = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi n \left[\frac{k}{N} - \Delta f (\tau_{1,los} - \tau_i) \right]}, k = 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (12)。$$

当指数项中的值取0时，*e*虚指数取得最大值，即 $k = N(\tau_{1,los} - \tau_i)\Delta f$ 。因此在对应的时延响应 $R(k)$ ，会出现一个峰值。通过求解峰值索引值*k*，可以求得时延 $(\tau_{1,los} - \tau_i)$ ，根据已知的 $\tau_{1,los}$ 就可求出 $\{\hat{\tau}_i\}_{i=2,3}$ 。

为了便于获取目标的高度，我们忽略主动基站和被动基站的高度。对于第*i*个主动基站的数据，我们假设其与目标之间的真实距离为 $R_{i,t}$ ，目标与被动基站的真实距离为 R_r ，则我们可以得到：

为便于获取目标高度，我们忽略主动基站与被动基站的高度差异。对于第*i*个主动基站，设其与目标之间的真实距离为 $R_{i,t}$ ，目标与被动基站之间的真实距离为 R_r ，则可得到：

$$\begin{cases} R_{i,t} \sin \hat{\theta}_{i,t} = R_r \sin \hat{\theta}_r \\ R_{i,t} + R_r = \hat{z}_i c \\ \ell = \sin \hat{\theta}_r / \sin \hat{\theta}_{i,t} \end{cases} \quad (13)。$$

求解公式(13)，可得目标的估计高度为 $\hat{z} = \frac{\ell}{\ell+1} \hat{\tau}_i \sin \hat{\theta}_{i,t}$ ，其在二维水平面上的投影距离总和为 $r_i = \left(\frac{\cos \hat{\theta}_{i,t}}{\sin \hat{\theta}_{i,t}} + \frac{\cos \hat{\theta}_r}{\sin \hat{\theta}_r} \right) \hat{z}_i$ 。

2) 不存在LoS径的情况

当不存在LoS径时，我们需选择一个信噪比较高的主动基站作为参考基站。各主动基站的接收信噪比可通过2.1节所述的2D-MUSIC方法获得，具体实现可参考文献[18]。设参考基站设置为基站1，仍将其他主动基站的信号与参考基站的信号依次进行互相关、投影等处理，最终得到变量

$\{r'_{i,l}\}_{i=2,3}$, 其定义为: 基站 i 经目标至被动基站的距离与基站 1 经目标至被动基站的距离之差。

3 多基站无源数据级融合定位算法

针对利用多基站感知数据进行二维平面目标位置估计的问题, 同样区分视距 (LoS) 路径存在与不存在两种情况。首先, 采用传统 LoS 检测方案判断 LoS 条件, 进而选择相应的融合定位算法: 当 LoS 径存在时, 采用 DOA 联合定位法; 当 LoS 径不存在时, 采用 TDOA 联合定位法。

3.1 椭圆-DOA 联合定位法

传统的联立多站椭圆方程组求解方法通常依赖非线性数值搜索, 存在计算复杂度高、解不唯一及数值稳定性差等不足。为此, 本文提出一种解析形式的 DOA 联合定位算法。该算法将被动基站估计的 DOA 信息与通过 MPSCC 获得的测距信息进行空域融合, 利用几何投影关系直接实现目标的唯一确定。

以主动基站 1 为例, 设主动基站 1 经目标至被动基站的总传播距离为 r_1 , 主动基站 1 与被动基站的直线距离为 $\tau_{1, \text{los}} c$, 在被动基站处测得的 NLoS 和 LoS 信号的离开角分别为 $\hat{\varphi}_{1,1}$ 和 $\hat{\varphi}_{1,1, \text{los}}$, 则根据几何关系可得被动基站与目标之间的距离为:

$$r_{1,t} = \frac{r_1^2 - (\tau_{1, \text{los}} c)^2}{2[\tau_{1, \text{los}} c \cos(\hat{\varphi}_{1,1} - \hat{\varphi}_{1,1, \text{los}}) + r_1]} \quad (14)。$$

根据 $r_{1,t}$ 在 x, y 轴上的投影和目标坐标以及被动基站的关系, 可计算得到目标坐标 (\tilde{x}, \tilde{y}) , 其中:

$$\begin{cases} \hat{x} = x_0 + r_{1,t} \cos(\hat{\varphi}_{1,1} - \hat{\varphi}_{1,1, \text{los}}) \\ \hat{y} = y_0 + r_{1,t} \sin(\hat{\varphi}_{1,1} - \hat{\varphi}_{1,1, \text{los}}) \end{cases} \quad (15)。$$

最终, 我们可以确立 3 个经过粗略估计得到的目标坐标 $(\tilde{x}_1, \tilde{y}_1)$ 、 $(\tilde{x}_2, \tilde{y}_2)$ 、 $(\tilde{x}_3, \tilde{y}_3)$, 求取平均之后, 得到目标的精确估计坐标为:

$$\hat{x} = \frac{\tilde{x}_1 + \tilde{x}_2 + \tilde{x}_3}{3} \quad (16),$$

$$\hat{y} = \frac{\tilde{y}_1 + \tilde{y}_2 + \tilde{y}_3}{3} \quad (17)。$$

该算法采用基于解析几何的闭式求解思路, 避免了复杂非线性方程的迭代搜索过程, 因而在实时系统中具有优异的数值稳定性。同时, DOA 角度信息在空域上提供了强约束, 确保了定位解在物理空间上的唯一性, 有效克服了传统双曲

线或椭圆定位方法中常见的多解模糊问题。

3.2 到达时间差联合定位法

对于每个主动基站到被动基站的 NLoS 径, 目标到被动基站的距离相同, 均假设为 d 。那么, 主动基站 2 和 3 的 NLoS 径距离与主动基站 1 的径距离的差值分别表示为:

$$\hat{r}_{2,1} = c(\tau_{2,l} - \tau_{1,l}) = (r_2 + d) - (r_1 + d) = r_2 - r_1 \quad (18),$$

$$r_{3,1} = c(\tau_{3,l} - \tau_{1,l}) = r_3 - r_1 \quad (19)。$$

设 $\tau_{2,l}$ 为第 2 路信号经过的投影总时延, $\tau_{1,l}$ 为第 1 路信号经过的投影总时延, d 为被动基站到目标的投影距离, 其中 r_2, r_3 满足:

$$\begin{aligned} r_2^2 &= (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = \\ K_2 - 2x_2x - 2y_2y + x^2 + y^2 \end{aligned} \quad (20),$$

$$\begin{aligned} r_3^2 &= (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 = \\ K_3 - 2x_3x - 2y_3y + x^2 + y^2 \end{aligned} \quad (21),$$

其中:

$$K_i = x_i^2 + y_i^2 \quad (22)。$$

$\{(x_i, y_i)\}_{i=1,2,3}$ 为第 i 个主动基站的坐标。

利用公式 (19) 构建非线性方程组可求解目标位置, 但是非线性方程组求解十分困难。因此, 考虑将由公式 (21) 构成的方程组转化为一个伪线性方程组, 将公式 (19) 代入公式 (21) 可得:

$$\begin{aligned} (\hat{r}_{i,1} + r_1)^2 &= K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2 \\ \hat{r}_{i,1}^2 + 2\hat{r}_{i,1}r_1 + r_1^2 &= K_i - 2x_i x - 2y_i y + x^2 + y^2, \quad i = 2, 3 \end{aligned} \quad (23)。$$

为消去 x 和 y 的平方项, 再将公式两边同时减去 $r_1^2 = K_1 - 2x_1x - 2y_1y + x^2 + y^2$, 可得:

$$\begin{aligned} \hat{r}_{i,1}^2 + 2\hat{r}_{i,1}r_1 &= K_i - K_1 - 2x_{i,1}x - 2y_{i,1}y \\ 2x_{i,1}x + 2y_{i,1}y + 2\hat{r}_{i,1}r_1 &= K_i - K_1 - \hat{r}_{i,1}^2 \\ x_{i,1}x + y_{i,1}y + \hat{r}_{i,1}r_1 &= \frac{1}{2}(K_i - K_1 - \hat{r}_{i,1}^2), \quad i = 2, 3 \end{aligned} \quad (24),$$

其中, $x_{i,1} = x_i - x_1, y_{i,1} = y_i - y_1, i = 2, 3$ 。

由此, 方程组转化为公式 (24) 所示的关于 x, y 和 r_i 的伪线性方程组。

由于距离差的个数为 2, 公式 (24) 所构成的方程组中未知数的个数与方程个数相等, 因此存在唯一解。首先, 将

r_1 视为固定常数, 可得 x 、 y 的与 r_1 相关的参数解。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(K_2 - K_1 - \hat{r}_{2,1}^2) - \hat{r}_{2,1}r_1 \\ \frac{1}{2}(K_3 - K_1 - \hat{r}_{3,1}^2) - \hat{r}_{3,1}r_1 \end{bmatrix} \quad (25)。$$

将公式 (24) 代入公式 (21), 可求得 r_1^2 , 取其正平方根后, 再代回公式 (25), 即可解得目标坐标 x 和 y 。需要指出的是, 采用该方法进行定位时, 3 个主动基站与被动基站不能共线。若共线, 则 $\begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \end{bmatrix}$ 的行列式为 0, 矩阵不可逆, 导致定位过程无法正常执行。

4 仿真结果与分析

本小节中我们对所提模型与方法进行仿真分析, 仿真参数如表 1 所示。首先, 针对存在 TO 和 CFO 的无源单点感知性能进行仿真与分析。在图 2 及后续仿真图中, 均采用归一化均方误差 (NMSE) 来评估测速与定位性能。NMSE 定义为多次测量误差的均值与真实值的比值, 其表达式如公式 (26):

$$\text{NMSE}_R = \frac{1}{\text{TEST}} \sum_{\text{test}=0}^{\text{TEST}-1} \frac{|R_{e,i} - R_i|^2}{R_i^2} \quad (26)。$$

$$\text{MSE}_{\text{pos}} = \frac{1}{\text{TEST}} \sum_{\text{test}=0}^{\text{TEST}-1} (|x_{e,i} - x_i|^2 + |y_{e,i} - y_i|^2)$$

其中, R_i 、 x_i 、 y_i 分别是第 i 个主动基站的被动感知测出的距离以及目标的横坐标与纵坐标值。 $R_{e,i}$ 、 $x_{e,i}$ 、 $y_{e,i}$ 分别对应每次测试中带有误差的测量值。 NMSE_R 表示测距的 NMSE 结

果, MSE_{pos} 表示定位的 MSE (因坐标可能为零, 故直接使用 MSE) 结果。

4.1 同步误差的测距影响

考虑到多基站协作感知系统中包含多个测距结果, 本小节中我们分别对 3 个节点的测距性能进行仿真分析, 结果如图 2—7 所示。在仿真中, TO 变量的均值分别设为 10 ns、100 ns、1 000 ns, 标准差分别为 1 ns 和 10 ns, 分别记为 $E(\text{TO})$ 和 $V(\text{TO})$; 无 TO 误差的信号以 $\text{TO}=0$ ns 表示。载波频偏 CFO 变量的均值分别设为 $0.01 \Delta f$ 、 $0.05 \Delta f$ 、 $0.2 \Delta f$, 标准差分别为 $0.01 \Delta f$ 和 $0.02 \Delta f$; 无 CFO 误差的信号以 $\text{CFO}=0$ Δf 表示。

4.1.1 TO 对测距的性能影响

从图 2—4 可以看出, TO 变量对测距性能具有显著影响。以 R_1 为例, 随着 TO 均值的增大, NMSE_R 明显上升, 严重劣化测距性能。当 TO 方差增大时, NMSE_R 曲线的波动幅度也随之增大。此外, 方差 $V(\text{TO})$ 对 NMSE_R 曲线波动的影响受均值 $E(\text{TO})$ 的制约: 两者差异越大, 波动效果越明显。当 $V(\text{TO})=10$ ns、 $E(\text{TO})=1$ 000 ns 时, 曲线几乎不存在波动。对于图 4 (局部区域放大图), NMSE_R 曲线波动规律与此一致。

4.1.2 CFO 对测距的性能影响

图 5—7 探讨了 CFO 对测距性能的影响。随着信噪比逐渐提高, NMSE_R 趋于稳定, 此时具有不同均值和标准差的 CFO 所对应的 NMSE_R 趋于一致。由此可见, CFO 对测距性

表 1 多基站无源协作感知系统仿真参数表

参数	数值
子载波频率 f_c	4 GHz ^[22]
载波频率 Δf	120 kHz ^[9]
OFDM 符号数 M	256 ^[22]
子载波个数 N	1 024 ^[22]
OFDM 周期长度 T	10.38 μs
循环前缀长度 T_c	2.08 μs
天线数量 P_r, Q_r, P_t, Q_t	8, 8, 8, 8 ^[20]
SNR 范围	[−30 dB, 30 dB]
TO 平均值 $E(\text{TO})$	0, 10, 100, 1 000 ns ^[22]
TO 标准差 $V(\text{TO})$	0, 1, 10 ns ^[22]
CFO 平均值 $E(\text{CFO})$	0, 0.01, 0.05, 0.2 Δf ^[22]
CFO 标准差 $V(\text{CFO})$	0, 0.01, 0.05 Δf ^[22]
CFO: 载波频偏 OFDM: 正交频分复用	SNR: 信噪比 TO: 时间偏移

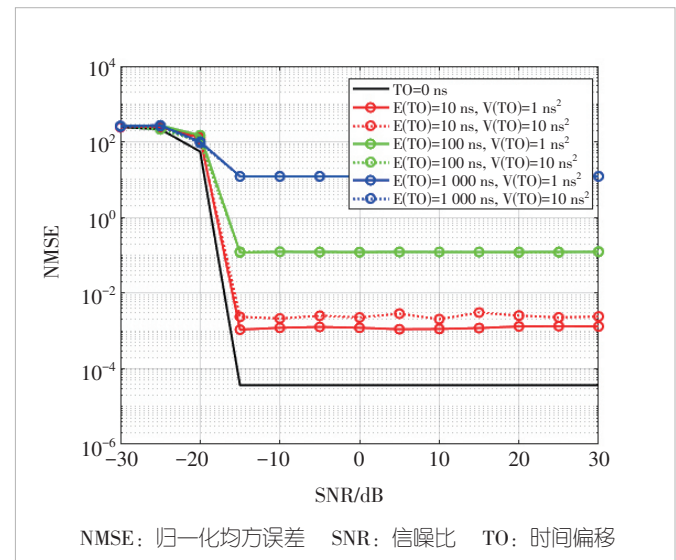


图 2 不同期望和方差的 TO 下测距精度 (主动基站 1 到被动基站)

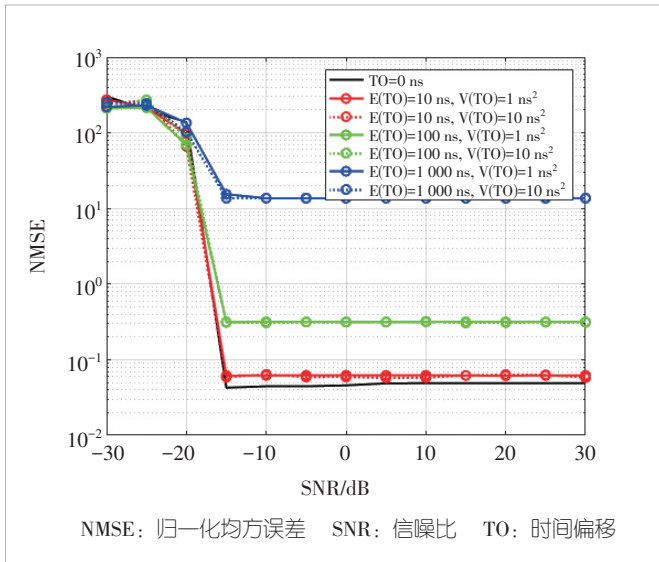


图3 不同期望和方差的TO下测距精度(主动基站2到被动基站)

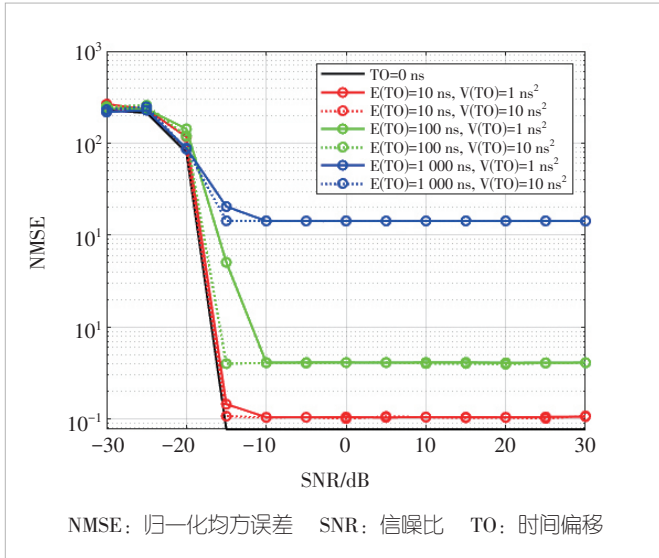


图4 不同期望和方差的TO下测距精度(主动基站3到被动基站)

能的影响非常小,这是因为CFO主要作用于包含目标多普勒信息的信号相位,而非包含距离信息的信号相位,该结果与理论分析一致。

4.2 多基站无源定位算法验证

我们进一步探究多基站无源数据级融合定位方案。在该小节的数值分析中,我们以主动基站1发射信号的信噪比作为基准,将其与其他两个主动基站的信号进行MPSCC处理。主动基站1与主动基站3的信噪比固定为0 dB,主动基站2的信噪比作为仿真的横坐标变量。

我们设置两种对比场景:信号无TO和信号存在TO,其

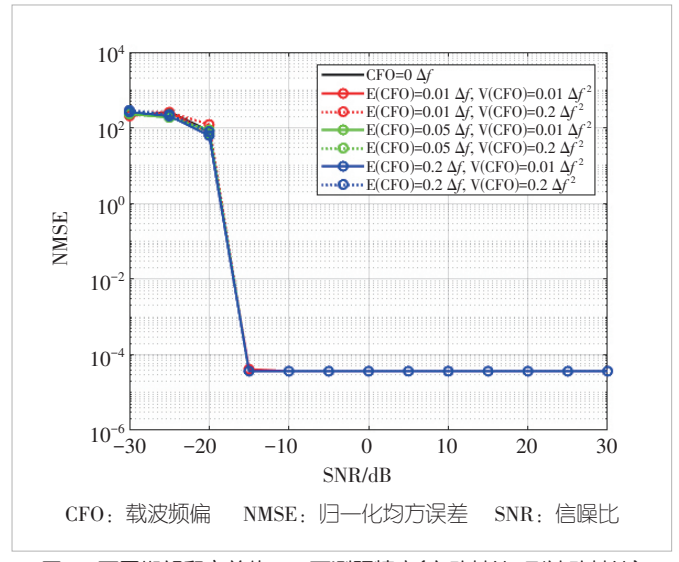


图5 不同期望和方差的CFO下测距精度(主动基站1到被动基站)

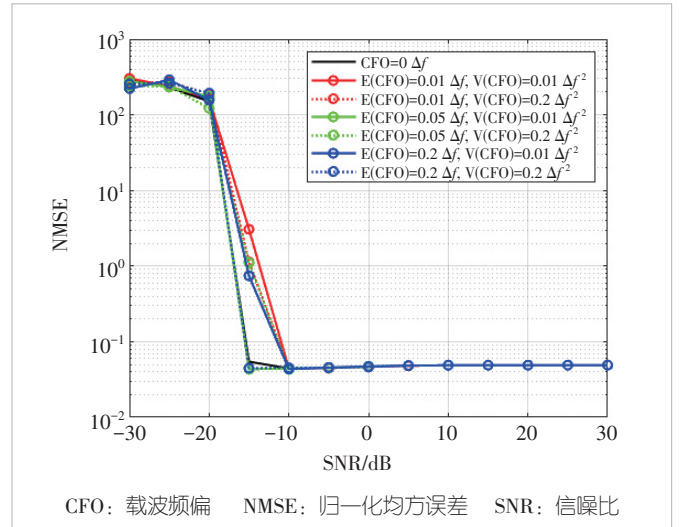


图6 不同期望和方差的CFO下测距精度(主动基站2到被动基站)

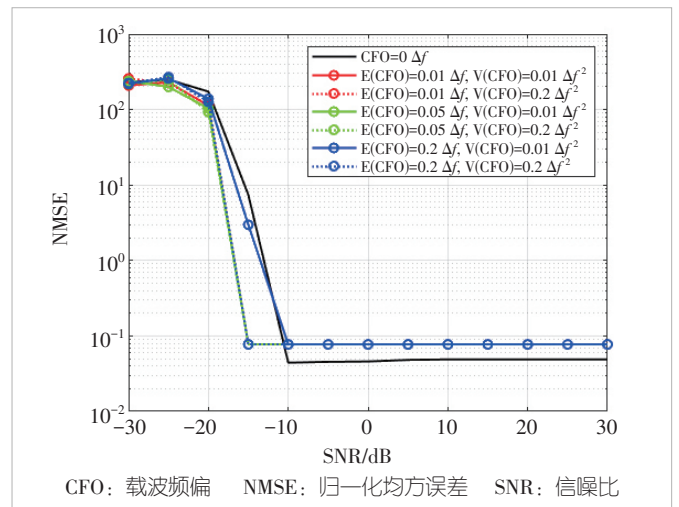


图7 不同期望和方差的CFO下测距精度(主动基站3到被动基站)

中 $V(TO) = 10 \text{ ns}$, $E(TO) = 100 \text{ ns}$ 。

由图8可以看出,相比于无TO的单点感知(完美同步条件下,可等效为主动感知效果),所提数据级融合方案在信噪比较高时能够显著降低 $NMSE_R$,有效提升测距性能。

然而,通过局部放大图观察主动基站2信噪比极端恶劣(约 $-30 \sim -20 \text{ dB}$)的情况可见,数据级融合无法改善系统的感知性能,反而导致 $NMSE_R$ 有所升高。单点感知能够更快地达到 $NMSE_R$ 的饱和门限,即 $NMSE_R$ 曲线趋于稳定时所对应的最小信噪比。这是因为所提 MPSCC 方法需要对多基站协作感知系统中的两路信号进行互相关处理,当两路信号的信噪比均较差时,相乘运算会进一步恶化弱信号的影响,导致信噪比至少损失 3 dB。

为进一步分析 MPSCC 对融合结果的影响,我们对存在 TO 的信号分别进行单点感知与融合感知性能分析。由图9可知,MPSCC 能够有效消除 TO 引起的测距模糊效应,达到与无 TO 信号融合方案基本一致的感知性能。然而,其在达到 $NMSE$ 饱和门限的速度方面仍落后于单点感知。此外,在相同信噪比条件下,数据级融合与各节点单点感知性能之间整体呈现的高低关系与图8一致。

5 结束语

本文针对复杂环境 LoS 径不稳定的 ISAC 多基站无源协作感知场景,系统研究了异步误差的影响机制及融合定位算法设计问题。提出了基于 OFDM 信号的多基站无源协作感知信号处理方案,包括 MPSCC 同步补偿方法与数据级融合定

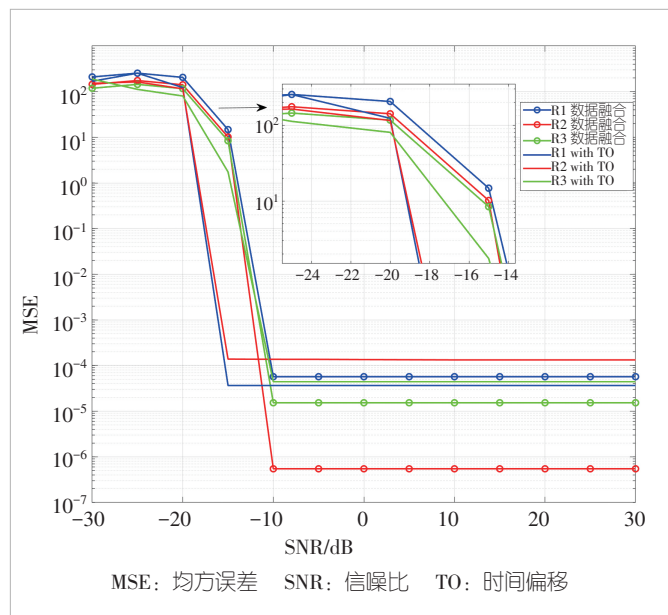


图8 不含TO情况下数据级融合方案性能分析

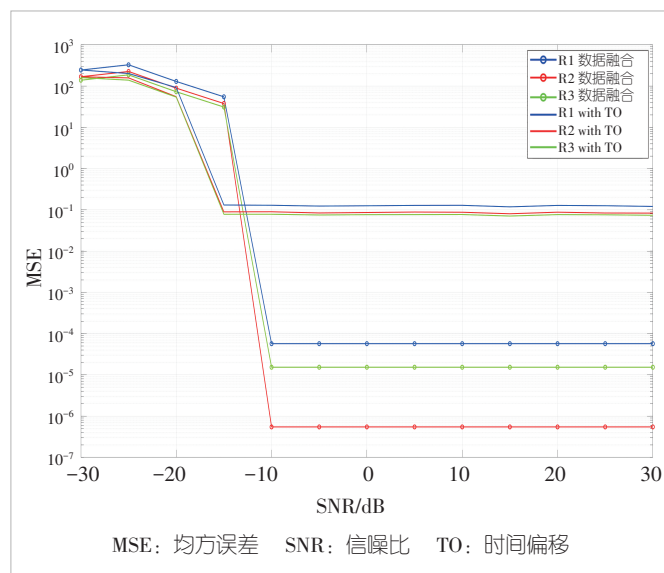


图9 包含TO情况下数据级融合方案性能分析

位算法,实现了异步条件下的高精度三维定位。仿真结果表明,所提方法能够有效消除 TO 的影响,在中高信噪比条件下显著提升定位性能,验证了数据级融合方案的可行性。相关研究为 6G 通感融合网络中的多基站协作感知提供了可行的实现路径。未来工作将进一步拓展至多目标场景、遮挡问题以及真实网络环境下的实验验证。

参考文献

- [1] Mittal P, Singh R, Sharma A. Deep learning-based object detection in low-altitude UAV datasets: a survey [J]. Image and vision computing, 2020, 104: 104046. DOI: 10.1016/j.imavis.2020.104046
- [2] You J, Ye Z X, Gu J L, et al. UAV-pose: a dual capture network algorithm for low altitude UAV attitude detection and tracking [J]. IEEE access, 2023, 11: 129144-129155. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3333394
- [3] 朱政宇, 温鑫平, 李兴旺, 等. 面向低空经济的通感一体化关键技术 [J]. 电子与信息学报, 2026, 48(2): 471-486. DOI: 10.11999/JEIT250747
- [4] Huang S Q, Ren S S, Wu W, et al. Discriminative features enhancement for low-altitude UAV object detection [J]. Pattern recognition, 2024, 147: 110041. DOI: 10.1016/j.patcog.2023.110041
- [5] Wei Z Q, Liu H T, Geng Y X, et al. ISAC-empowered LEO constellation networked sensing: challenges and opportunities [EB/OL]. (2026-02-27) [2026-04-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11417183>
- [6] IMT-2030 (6G) 推进组. 6G 感知的需求和应用场景研究报告 [EB/OL]. (2023-10-31) [2025-04-24]. <https://caifuha0.eastmoney.com/news/20231031112756009329680>
- [7] Wei Z Q, Liu H T, Yang X Y, et al. Carrier aggregation enabled integrated sensing and communication signal design and processing [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2024, 73(3): 3580-3596. DOI: 10.1109/TVT.2023.3324436
- [8] 朱政宇, 欧阳泽彬, 潘高峰, 等. 低轨卫星通感一体化系统中的隐蔽通

- 信传输方案[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(10): 3538–3548. DOI: 10.11999/JEIT250208
- [9] Wei Z Q, Li F Y, Liu H T, et al. Multiple reference signals collaborative sensing for integrated sensing and communication system towards 5G-A and 6G [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2024, 73(10): 15185–15199. DOI: 10.1109/TVT.2024.3410352
- [10] Zhu X Q, Liu J Q, Lu L Y, et al. Enabling intelligent connectivity: a survey of secure ISAC in 6G networks [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2025, 27(2): 748–781. DOI: 10.1109/COMST.2024.3432871
- [11] Liu G Y, Ma L, Xue Y H, et al. SensCAP: a systematic sensing capability performance metric for 6G ISAC [J]. IEEE Internet of Things journal, 2024, 11(18): 29438–29454. DOI: 10.1109/JIOT.2024.3430502
- [12] Zhu Z Y, You B Y, Li Z, et al. Integrated sensing and covert communication systems in near-field transmission [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2026, 12(3): 3422–3435. DOI: 10.1109/TCCN.2025.3620390
- [13] Wei Z Q, Liu H T, Feng Z Y, et al. Deep cooperation in ISAC system: resource, node and infrastructure perspectives [J]. IEEE Internet of Things magazine, 2024, 7(6): 118–125. DOI: 10.1109/IOTM.001.2400042
- [14] Wei Z Q, Liu H T, Li H J, et al. Integrated sensing and communication enabled cooperative passive sensing using mobile communication system [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2025, 24(9): 7805–7821. DOI: 10.1109/TMC.2024.3514113
- [15] Zhang A, Rahman M L, Huang X J, et al. Perceptive mobile networks: cellular networks with radio vision via joint communication and radar sensing [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2021, 16(2): 20–30. DOI: 10.1109/MVT.2020.3037430
- [16] Zhang J A, Rahman M L, Wu K, et al. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks: a survey [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2022, 24(1): 306–345. DOI: 10.1109/comst.2021.3122519
- [17] Li Y H, Wei Z Q, Liu H T, et al. Uplink multi-RSU cooperative sensing strategy for integrated sensing and communication system [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2025, 11(5): 3112–3127. DOI: 10.1109/TCCN.2025.3570449
- [18] 李虎军. 基于感知通信一体化的中继系统与多节点协作感知技术[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023
- [19] Chen X, Feng Z Y, Wei Z Q, et al. Code-division OFDM joint communication and sensing system for 6G machine-type communication [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(15): 12093–12105. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3060858
- [20] 陈旭. 基于移动通信的通信感知一体化信号处理关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2024
- [21] Wei Z Q, Xu R Z, Feng Z Y, et al. Symbol-level integrated sensing and communication enabled multiple base stations cooperative sensing [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2024, 73(1): 724–738. DOI: 10.1109/TVT.2023.3304856
- [22] Jiang W J, Wei Z Q, Yang S S, et al. Cooperation-based joint active and passive sensing with asynchronous transceivers for perceptive mobile networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(10): 15627–15641. DOI: 10.1109/TWC.2024.3432657

作者简介



张宏权, 卡奥斯创智物联科技有限公司研发总工程师; 研究方向为通感一体化、控制器软硬件及嵌入式算法等。



杨恒, 卡奥斯创智物联科技有限公司人工智能技术专家; 研究方向为通感一体化、端侧人工智能算法及端云协同智能计算架构等。



李虎军, 中国电信四川公司云计算工程师; 研究方向为通感一体化与无源感知等。



刘浩田, 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室在读博士生; 研究方向为通感一体化、协作感知等。



尉志青, 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室教授; 研究方向为通感一体化、智能机器通信与组网等。

GNSS拒止下低空无人机导航与资源分配优化



Navigation and Resource Allocation Optimization for GNSS-Denied Low-Altitude Wireless Networks

金海佳/Jin Haijia, 袁伟杰/Yuan Weijie, 伍军/Wu Jun

(南方科技大学, 中国 深圳 518055)

(Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602006

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260422.1814.007>

网络出版日期: 2026-04-23

收稿日期: 2026-01-30

摘要: 针对低空无线网络 (LAWN) 在全球导航卫星系统 (GNSS) 拒止与机载射频资源受限下面临的挑战, 研究无人机自主到位及部署后受限资源下的服务问题。在导航阶段, 基于地面参考锚点的方位几何特征, 提出纯角度制导策略, 使无人机在无卫星导航信号辅助下精确抵达目标阵列。在通信阶段, 针对机载发射功率与射频链路受限的问题, 以最大化系统有效服务用户数为目标, 构建联合用户调度与波束赋形的资源分配模型, 并提出一种基于交替优化 (AO)、逐次凸逼近 (SCA) 和半定松弛 (SDR) 的高效算法。仿真实验验证了该方案的有效性: 导航算法能以递减的角度误差实现可靠的目标捕获, 且联合资源分配策略在不同功率预算与速率门限下显著提升了系统的服务性能。

关键词: LAWN; GNSS拒止; 用户调度; 波束赋形

Abstract: Addressing the challenges of global navigation satellite system (GNSS) denial and constrained onboard radio frequency resources in low-altitude wireless networks (LAWNs), this work investigates autonomous drone positioning and subsequent multi-user communication services under limited resources. In the navigation phase, an angle-only guidance strategy is proposed based on bearing geometry from ground reference anchors, enabling the drone to precisely reach the target location without satellite navigation signals. In the communication phase, to tackle the limitations of onboard transmit power and radio frequency links, a joint user scheduling and beamforming resource allocation model is formulated to maximize the number of effectively served users. An efficient algorithm based on alternating optimization (AO), successive convex approximation (SCA), and semidefinite relaxation (SDR) is developed. Simulation results validate the effectiveness of the proposed scheme: the navigation algorithm achieves reliable target acquisition with decreasing angle errors, and the joint resource allocation strategy significantly improves system service performance under various power budgets and rate thresholds.

Keywords: LAWN; GNSS-denied; user scheduling; beamforming

引用格式: 金海佳, 袁伟杰, 伍军. GNSS拒止下低空无人机导航与资源分配优化 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 36-42. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602006

Citation: Jin H J, Yuan W J, Wu J. Navigation and resource allocation optimization for GNSS-denied low-altitude wireless networks [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 36-42. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602006

借助无人机和电动垂直起降 (eVTOL) 飞行器等空中平台, 低空无线网络 (LAWN) 构建了一种灵活且可快速部署的通信范式, 能够打破传统地面基础设施的限制^[1]。得益于三维空间中的高机动性以及以视距 (LoS) 为主的空地 (A2G) 链路特性, LAWN 可为应急响应、临时热点分流及基础设施匮乏区域的公共安全行动等动态、时延敏感任务, 提供自适应且可靠的下行覆盖^[2-3]。然而, 与地面基站相比, 空中平台在发射功率、射频链路并发能力、载荷与能量供给等方面均面临更严格的约束, 机载无线资源的紧缺使

得如何高效进行资源分配与用户调度成为 LAWN 实现可持续多用户服务的核心问题之一^[4]。

围绕 LAWN 中的无人机通信, 现有研究已从资源分配与用户调度等角度展开大量探索。在资源分配方面, 相关工作通常围绕发射功率和时频资源等维度展开设计, 以提升总体吞吐、覆盖效率或服务稳定性, 并在不同场景约束下讨论资源配置对 LAWN 通信性能的影响^[5]。用户调度旨在从过载的候选用户池中选出最佳服务子集, 从而在有限的机载射频资源约束下, 有效抑制多用户干扰并保障通信质量。例如, 文

献[6]针对空地一体化网络中的隐蔽传输场景,提出了一种联合鲁棒波束赋形与覆盖优化的调度框架,在满足隐蔽性约束及卫星回传链路中断概率限制的前提下,最大化系统有效服务用户规模。此外,机载多天线阵列带来的空间复用增益与无人机三维高机动优势相融合,使得波束赋形成为优化网络拓扑及抑制同频干扰的关键技术手段。针对无人机赋能的自适应通感一体化系统,文献[7]构建了交替迭代优化的联合设计架构,在灵活分配感知时隙、严格保障通信与感知双业务服务质量的约束条件下,通过协同调控通信波束、感知波束及无人机运行轨迹,实现了系统平均吞吐量的最优提升。尽管上述工作从不同维度推动了低空无线网络的发展,但大多默认无人机能够可靠完成导航与部署,较少关注其前提条件。特别是在全球导航卫星系统(GNSS)拒止等类似环境下,无人机首先面临的是如何依靠有限感知信息实现稳定自主导航,而这也是后续任务执行与通信资源分配得以开展的基础。

为此,要在实际的LAWN中实现稳定的下行链路运行,必须依赖可靠的无人机导航控制,以维持精确的状态感知与高保真的运动执行。现有的导航方案主要分为基于绝对位置和基于相对状态两大类^[8]。前者依赖GNSS或其他外部定位设施提供的全局位置测量,在信息准确且连续可用时可实现直接的制导与跟踪。然而,在LAWN应用场景中,GNSS信号极易受遮挡、多径效应及恶意干扰的影响,导致状态估计出现偏差或中断,进而引发控制失稳及性能恶化^[9]。相比之下,基于相对状态的方法利用相对于锚点或地标的测量值(如相对位置、方位、距离或角度)来调节无人机运动,从而降低了对全局定位的依赖。然而,此类方法通常要求参考特征具有持续的可观测性,且易受测量模糊性及不利几何构型的影响。此外,除非辅以额外的感知手段与可观测性条件,否则其稳定性和收敛性往往受到限制^[10]。

基于上述研究背景,本文聚焦LAWN中GNSS拒止场景下的低空无人机任务执行问题,研究无人机如何在缺乏卫星导航支撑的条件下可靠抵达指定目标阵位,并进一步完成面向已知地面用户的下行传输任务。针对这一特定场景,本文首先设计了一种适用于GNSS拒止环境的纯角度制导导航方法,利用无人机与地面参考锚点之间的方位几何关系实现自主导航与目标捕获。在此基础上,面向多用户下行传输的业务需求,综合考虑机载发射功率上限与用户最低速率约束,制定了针对性的资源分配与用户调度策略,最终实现无人机

在目标阵位处覆盖范围的最大化。

1 系统模型

本文考虑的LAWN场景如图1所示。系统由一架搭载 N 根天线的无人机以及 M 个单天线地面用户(GU)组成。为刻画系统中各节点的空间几何关系,定义无人机的三维位置向量为 $\mathbf{u}=[x^u, y^u, z^u]^T$, GU $_m$ 的位置为 $\mathbf{b}_m=[x_m^b, y_m^b, 0]^T$ 。系统运行过程划分为两个按序执行的阶段:第一阶段为自主导航阶段,在GNSS拒止环境下,无人机仅依赖纯角度几何观测信息进行自主导航,并逐步收敛至预设目标位置;第二阶段为下行通信阶段,当无人机到达目标阵位后,其作为空中基站为地面用户集合 $\mathcal{M}=\{1, \dots, M\}$ 提供下行通信服务。考虑到机载无线资源受限,无人机通常难以同时为全部GU提供服务,因此引入用户调度机制。具体而言,设 $K \leq M$ 为系统可同时支持的最大服务用户数,并从中选择一个子集 $\mathcal{K} \subseteq \mathcal{M}$,满足 $|\mathcal{K}|=K$,作为实际被服务的用户集合。下文将依次给出无人机的导航动力学模型以及基于调度集合 \mathcal{K} 的下行通信链路模型。

1.1 导航动力学模型

在自主导航阶段,无人机的控制目标是在环境不确定性存在的情况下,实现从初始位置到目标阵位的收敛¹。无人机运动学行为可由受扰单积分器模型描述^[11]为:

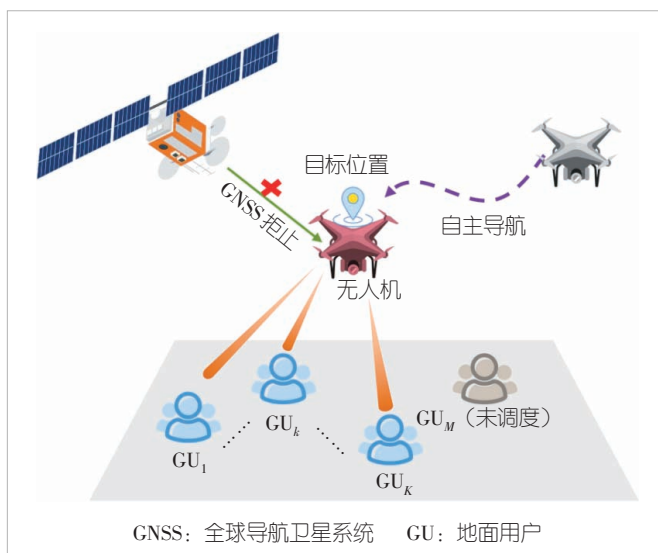


图1 GNSS拒止环境下无人机导航与下行通信场景

1 目标部署点由任务区域覆盖需求预先设定,本文不研究部署位置优化,仅关注无人机在GNSS拒止条件下如何可靠抵达该部署点。

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \boldsymbol{\mu}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (1),$$

其中, $\boldsymbol{\mu}(t) \in \mathbb{R}^3$ 为控制输入向量。考虑到低空环境的复杂性, 引入有界扰动项 $\mathbf{n}(t) \in \mathbb{R}^3$, 用于刻画风场扰动、执行机构误差以及感知噪声等综合影响。为解决 GNSS 拒止条件下的定位基准问题, 系统从 GU 集合 \mathcal{M} 中选取 3 个非共线的地面节点作为位置状态已知的导航参考锚点, 其集合记为 $\{\mathbf{g}_i\}_{i=1}^3$, 其中 $\mathbf{g}_i = [x_i^g, y_i^g, 0]^T$ 。

1.2 下行通信模型

当无人机完成阵位部署后, 系统随即进入下行通信阶段。我们假设不存在直接的空地通信链路, 并且从无人机至 GU 的信道包含 LoS 和非视距 (NLoS) 两部分, 即信道 $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{N_t}$ 可以按照 Rician 衰落信道建模为^[12]:

$$\mathbf{h}_k = \sqrt{\beta_0 d_k^{-2}} \left(\sqrt{\frac{\kappa_k}{\kappa_k + 1}} \mathbf{h}_k^{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{\kappa_k + 1}} \mathbf{h}_k^{\text{NLoS}} \right) \quad (2),$$

其中, d_k 为无人机和 GU_k 之间的距离, β_0 为参考信道增益, κ_k 为对应链路的 Rician 因子。 $\mathbf{h}_k^{\text{LoS}} \in \mathbb{C}^{N_t}$ 表示信道 LoS 分量, 进一步写为 $\mathbf{h}_k^{\text{LoS}} = \alpha(\theta_k)$, 其中 $\alpha(\theta_k)$ 为均匀线阵的阵列导向向量, 表达为:

$$\alpha(\theta_k) = \left[1, e^{j2\pi \frac{d^s}{\lambda} \cos \theta_k}, \dots, e^{j2\pi \frac{d^s}{\lambda} (N_t - 1) \cos \theta_k} \right]^T \quad (3).$$

一方面, d^s 表示相邻阵元之间的间距, λ 为载波波长, θ_k 代表对应的物理离开角 (AoD), 由节点间的几何拓扑唯一确定, 即 $\cos \theta_k = z^u / \|\mathbf{u} - \mathbf{b}_k\|$ 。另一方面, $\mathbf{h}_k^{\text{NLoS}}$ 表示散射引起的 NLoS 分量, 其元素服从零均值单位方差的循环对称复高斯分布。此外, 考虑到在实际场景中难以获得完美的信道状态信息 (CSI), 本文将无人机到自 GU 的信道表述为最小均方误差 (MMSE) 信道估计误差模型 $\mathbf{h}_k = \hat{\mathbf{h}}_k + \boldsymbol{\omega}_k$, 其中, $\hat{\mathbf{h}}_k$ 为估计信道, $\boldsymbol{\omega}_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_\omega^2)$ 为对应的信道估计误差项。在多用户下行传输场景下, GU_k 的可达速率 R_k 由其信干噪比 (SINR) 决定, 具体表示为:

$$R_k = \log \left(1 + \frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{i \in K, i \neq k} |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{w}_i|^2 + \sigma^2} \right) \quad (4),$$

其中, \mathbf{w}_k 为波束赋形向量, σ^2 表示接收端噪声功率。

2 GNSS 拒止下的导航策略设计

针对 GNSS 拒止的受限场景, 我们提出一种仅依赖纯角度几何量测的自主导航策略。该方法的核心思想在于利用多

锚点构成的几何拓扑约束, 引导无人机从当前位置 $\mathbf{g}_0 = \mathbf{u}$ 收敛至目标位置 $\mathbf{g}_0^* = \mathbf{u}^*$ 。定义任意两个节点 \mathbf{g}_i 与 \mathbf{g}_j 之间的单位视线向量为:

$$\mathbf{r}_{ij} = \frac{\mathbf{g}_j - \mathbf{g}_i}{\|\mathbf{g}_j - \mathbf{g}_i\|}, \quad i, j = 0, 1, 2, 3, \quad i \neq j \quad (5).$$

基于此, 任意 3 点构成的空间内角 $\rho_{jil} \in (0, \pi)$ 可表示为:

$$\rho_{jil} = \arccos(\mathbf{r}_{ij}^T \mathbf{r}_{il}), \quad i, j, l = 0, 1, 2, 3, \text{ 且互不相同} \quad (6).$$

为了仅通过角度信息实现对无人机三维位置的唯一确定与控制, 需要分析位置与角度约束的映射关系。如图 2 所示, 单一的角度约束 ρ_{012} 将无人机的位置限制在以 \mathbf{g}_1 为顶点、以向量 $\overrightarrow{\mathbf{g}_1 \mathbf{g}_2}$ 为轴线的旋转圆锥面 $\mathcal{C}_1(\rho_{012})$ 上。同理, 角度 ρ_{021} 确定了另一以 \mathbf{g}_2 为顶点的圆锥面 $\mathcal{C}_2(\rho_{021})$ 。这两个圆锥面的交集 $\Gamma = \mathcal{C}_1(\rho_{012}) \cap \mathcal{C}_2(\rho_{021})$ 在空间中表现为一条一维曲线。为实现三维位置的唯一确定, 需要引入第 3 个独立约束, 即地平面 \mathcal{P}_g 与由无人机 \mathbf{g}_0 、 \mathbf{g}_1 和 \mathbf{g}_2 构成的平面 \mathcal{P}_u 之间二面角 ρ_p 。由此构成的一组角度量可以形成完备的广义坐标。

基于上述几何机理, 导航问题可转化为角度误差的渐近调节问题, 其控制目标表述为:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (\rho_{012}(t) - \rho_{012}^*) = 0 \quad (7),$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (\rho_{021}(t) - \rho_{021}^*) = 0 \quad (8),$$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} (\rho_p(t) - \rho_p^*) = 0 \quad (9),$$

其中, $\{\rho_{012}^*, \rho_{021}^*, \rho_p^*\}$ 为目标参考值。为了实时计算反馈误差, 二面角 $\rho_p(t)$ 可通过平面法向量计算得到:

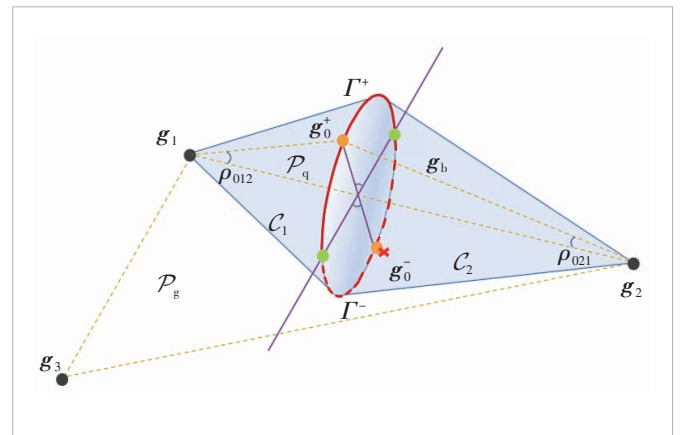


图2 基于角度量测的无人机导航约束与几何关系分析

$$\rho_p(t) = \begin{cases} \arccos(\mathbf{c}_u^T(t)\mathbf{c}_g), & \mathbf{r}_{10}^T(t)\mathbf{c}_g > 0 \\ -\arccos(\mathbf{c}_u^T(t)\mathbf{c}_g), & \text{其他情况} \end{cases} \quad (10),$$

其中, $\mathbf{c}_u(t)$ 与 \mathbf{c}_g 分别为平面 \mathcal{P}_u 和 \mathcal{P}_g 的单位法向量:

$$\mathbf{c}_u(t) = \frac{\mathbf{r}_{20}(t) \times \mathbf{r}_{21}}{\|\mathbf{r}_{20}(t) \times \mathbf{r}_{21}\|}, \mathbf{c}_g = \frac{\mathbf{r}_{23} \times \mathbf{r}_{21}}{\|\mathbf{r}_{23} \times \mathbf{r}_{21}\|} \quad (11)。$$

为实现上述GNSS拒止下自主导航目标,我们采用如下角度误差反馈控制策略^[11]:

$$\boldsymbol{\mu}(t) = (\rho_{012}(t) - \rho_{012}^*)\mathbf{r}_{02}(t) + (\rho_{021}(t) - \rho_{021}^*)\mathbf{r}_{01}(t) - (\rho_p(t) - \rho_p^*)(\mathbf{r}_{01}(t) \times \mathbf{r}_{02}(t)) \quad (12),$$

其中,前两项利用平面内视线向量 $\mathbf{r}_{02}(t)$ 和 $\mathbf{r}_{01}(t)$ 分别对两个圆锥面约束误差进行比例矫正,第3项则沿平面法向 $\mathbf{r}_{01}(t) \times \mathbf{r}_{02}(t)$ 施加控制力矩以调节二面角误差。3项控制分量相互正交或近似解耦,共同保证了无人机在GNSS拒止环境下收敛至目标阵位。

3 联合用户调度与波束赋形设计

当无人机成功自主导航至预设目标位置后,系统随即进入下行通信阶段。本节在满足下行链路服务质量(QoS)约束及机载发射功率预算的前提下,联合优化用户调度策略与波束赋形设计,可以使系统能够同时支持的有效服务用户数量最大化。相应的联合优化问题建模如公式(13)。

$$\begin{aligned} \max_{\mathcal{K}, \{\mathbf{w}_k\}} & |\mathcal{K}| \\ \text{s.t.} & \text{C1: } \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbf{w}_k^H \mathbf{w}_k \leq P_{\max} \\ & \text{C2: } R_k \geq R_k^{\text{th}}, \forall k \in \mathcal{K} \end{aligned} \quad (13),$$

其中,约束(P1-C1)施加了总功率限制, P_{\max} 代表无人机机载射频模块所允许的最大发射功率预算。约束(P1-C2)旨在保障被调度用户的QoS,其接收速率必须不低于预设的最低门限 R_k^{th} ,确保数据的可靠解调。问题(P1)本质上是一个混合整数非线性规划(MINLP)问题。一方面,用户子集 \mathcal{K} 的选择引入了离散组合优化,其搜索空间随用户规模 M 呈指数级增长;另一方面,波束赋形向量与用户调度决策高度耦合,同时QoS约束具有非凸的分式结构,使得问题整体难以直接求解。

为便于后续优化,我们首先引入二元指示向量 $\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_M]$,其中 $\eta_m \in \{0,1\}$ 。具体来说, $\eta_m = 1$ 表示 GU_m 被调度, $\eta_m = 0$ 表示未被调度。由此,问题(P1)可等价

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{\eta}, \{\mathbf{w}_m\}} & \|\boldsymbol{\eta}\|_0 \\ \text{s.t.} & \text{C1: } \sum_{m \in \mathcal{M}} \mathbf{w}_m^H \mathbf{w}_m \leq P_{\max} \\ & \text{C2: } R_m \geq \eta_m R_m^{\text{th}}, \forall m \in \mathcal{M} \\ & \text{C3: } \eta_m \in \{0,1\}, \forall m \in \mathcal{M} \end{aligned} \quad (14)。$$

该问题仍为非凸MINLP。为此,本文采用交替优化(AO)框架,将其分解为用户调度与波束赋形两个子问题迭代求解。首先对于给定的波束赋形向量,用户调度的问题可写为:

$$(P3) \max_{\boldsymbol{\eta}} \|\boldsymbol{\eta}\|_0 \quad \text{s.t. (P2 - C2), (P2 - C3)} \quad (15)。$$

首先,将离散约束(P2-C3)等价转化为连续形式:

$$0 \leq \eta_m \leq 1, \forall m \in \mathcal{M} \quad (16),$$

$$\eta_m - \eta_m^2 \leq 0, \forall m \in \mathcal{M} \quad (17)。$$

由于约束(17)非凸,本文采用逐次凸近似(SCA)方法,第 t_1 次迭代点 $\eta_m^{t_1}$ 处对其进行一阶泰勒近似,得到:

$$(\eta_m^{t_1} - \eta_m)^2 + \eta_m - \eta_m^2 \leq 0, \forall m \in \mathcal{M} \quad (18)。$$

对于任意 $\eta_m \in \{0,1\}$,公式(18)左侧恒大于零,导致可行域为空。为此,引入罚函数法,将其作为惩罚项移入目标函数,构造如公式(19)的等价优化问题:

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{\eta}} & \sum_{m \in \mathcal{M}} \eta_m - \xi \sum_{m \in \mathcal{M}} [(\eta_m^{t_1})^2 - 2\eta_m^{t_1}\eta_m + \eta_m] \\ \text{s.t.} & \text{C1: (P2 - C2)} \end{aligned} \quad (19),$$

其中 $\xi \gg 0$ 为惩罚因子。该问题在每次迭代中均可利用CVX等标准凸求解器高效求解,通过迭代更新 $\boldsymbol{\eta}$,最终收敛至满足二元特性的可行解。

固定调度策略后,原联合优化问题退化为波束赋形设计问题:

$$(P5) \text{ Find } \{\mathbf{w}_m\} \quad \text{s.t. (P2 - C1), (P2 - C2)} \quad (20)。$$

定义半正定波束赋形协方差矩阵 $\mathbf{W}_m = \mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^H, \forall m \in \mathcal{M}$ 以及信道相关矩阵 $\hat{\mathbf{H}}_m = \hat{\mathbf{h}}_m \hat{\mathbf{h}}_m^H, \forall m \in \mathcal{M}$, (P5)可等价重构为:

$$\begin{aligned} \text{Find } & \{\mathbf{W}_m \geq 0\} \\ \text{s.t.} & \text{C1: } \sum_{m \in \mathcal{M}} \text{tr}(\mathbf{W}_m) \leq P_{\max} \\ & \text{C2: } \text{tr}(\hat{\mathbf{H}}_m \mathbf{W}_m) - \gamma_m^{\text{th}} \sum_{i \in \mathcal{M}, i \neq m} \text{tr}(\hat{\mathbf{H}}_m \mathbf{W}_i) \geq \gamma_m^{\text{th}} \sigma^2, \forall m \in \mathcal{M} \\ & \text{C3: } \text{Rank}(\mathbf{W}_m) \leq 1, \forall m \in \mathcal{M} \end{aligned} \quad (21),$$

其中, $\gamma_m^h = 2^{R_m^h - 1}$ 。此时, 问题 (P6) 的非凸性完全源于秩-1约束 (P6-C3)。为了获得可解的凸问题, 我们采用半定松弛 (SDR) 方法, 忽略秩约束^[13]。松弛后的优化问题描述为:

$$(P7) \text{ Find } \{W_m \geq 0\} \text{ s.t. (P6 - C1), (P6 - C2) (22).}$$

显然, 问题 (P7) 是一个标准的半正定规划 (SDP) 问题, 利用现有的凸优化工具箱即可高效求解。在获得最优解 $\{W_m^*\}$ 后, 需检查其秩属性。若存在高秩解, 需采用高斯随机化技术从 W_m^* 中提取近似最优的可行波束向量, 以确保满足原问题的秩-1约束^[13]。最后, 在固定单组变量后, 分别求解用户调度和波束赋形子问题, 并对两组变量交替迭代优化, 直至收敛。总体算法如算法 1 所示。由于在求解每个子问题时均获得了最优解或其紧致上界, 目标函数值在迭代过程中是非递减的。此外, 由于系统服务的用户数量受限于总数 M , 目标函数具有有限的上界。因此, 根据单调有界收敛定理, 可保证算法 1 收敛至一个稳定的次优解。该算法的计算复杂度主要取决于凸子问题的内点法求解过程, 从而保证了多项式级的计算复杂度。

算法 1 基于交替优化的用户调度和波束赋形总体算法

输入: 迭代次数 $t=0$, 初始变量 $\eta^t, \{w_m^t\}$, 最大迭代次数 t_{\max} 和收敛阈值 ϵ

输出: $\eta, \{w_m\}$

1. 给定 $\{w_m^t\}$, 利用逐次凸近似, 求解 (P3), 更新调度策略 η^{t+1}
2. 基于 η^{t+1} , 求解 (P5), 更新波束向量 $\{w_m^{t+1}\}$
3. 更新 $t = t + 1$, 并重复步骤 1、步骤 2 直到目标函数值的相对增加量低于 ϵ 或 $t > t_{\max}$

4 仿真实验及分析

本节中, 我们通过仿真验证所提出的在 GNSS 拒止下无人机导航以及联合用户调度与波束赋形算法的有效性。除非另有说明, 我们将系统参数设置如下。无人机初始位置为 $u_0 = [10, 10, 80]^T$ m, 目标位置为 $u^* = [100, 80, 120]^T$ m。3 个非共线 GU 作为地面锚点参考节点坐标为 $g_1 = [20, 10, 0]^T$ m, $g_2 = [140, 30, 0]^T$ m, $g_3 = [70, 130, 0]^T$ m。地面用户总数为 $M = 22$ 。参考距离 1 m 处的信道功率增益取 $\beta_0 = -60$ dB。GU 处的噪声功率设为 $\sigma^2 = -110$ dBm。无人机天线相邻阵元间距设为 $d^s = \lambda/2$, 天线数为 $N_t = 32$ ^[12]。在仿真中, 我们首先基于方位角量测评估无人机的目标到达性能, 研究角度误差的收敛过程。导航阶段的目标在于保障无人机可靠到达预定部

署点, 从而为后续资源分配提供有效的空间支撑。随后, 在目标阵位处评估下行通信性能, 重点考察在不同发射功率预算 P_{\max} 与速率门限 R_k^h 下系统可调度的有效服务用户数量。

图 3 和图 4 展示了 GNSS 拒止条件下所提出的角度测量导航策略的性能结果。图 3 给出了无人机从初始位置到目标阵位的三维运动轨迹, 同时标注了 3 个位置已知的地面锚点, 用于提供方位角几何参考。可见, 无人机的航迹在水平面内逐步向目标点靠拢, 并在飞行过程中同步完成高度方向的调整, 最终到达预设目标位置。这说明仅利用角度几何约束即可形成有效的导航引导, 从而在缺乏卫星定位的情况下仍可实现可靠的目标到达。

图 4 进一步刻画了角度约束误差的动态收敛过程, 其中

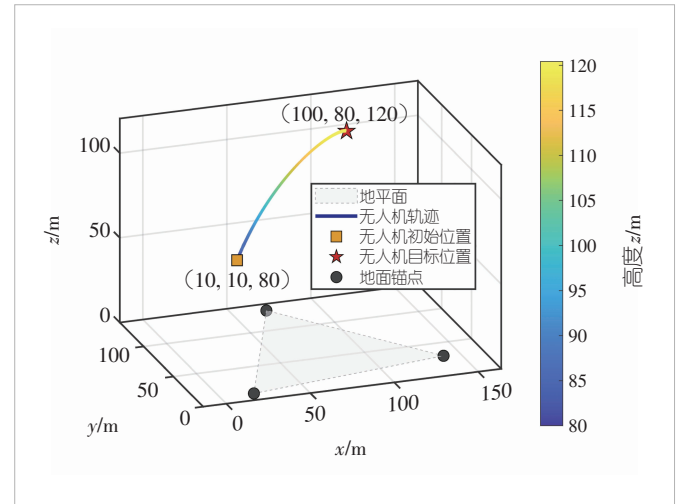


图 3 全球导航卫星系统拒止下的无人机导航轨迹

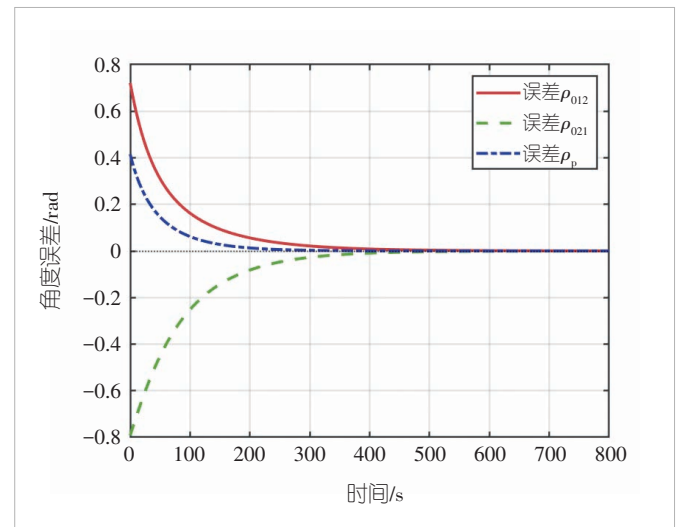


图 4 基于方位角量测的角度误差收敛性能

分别对应于两组空间内角约束 ρ_{012} 、 ρ_{021} 以及二面角约束 ρ_p 。可以看出,各误差项在初始阶段幅值较大,随后在反馈控制作用下快速衰减,并在中后期逐渐逼近零。同时,不同误差分量的衰减速率存在差异,体现了平面内角度修正与法向二面角调节在动态过程中的分工协同机制。总体而言,3项误差均能稳定收敛且无明显振荡,表明所提出的角度误差反馈控制律能够在存在扰动与量测噪声的情况下保持良好的收敛性与鲁棒性,并持续提高角度一致性,从而保证无人机完成阵位部署。

图5展示了不同功率预算与速率门限下系统可调度用户数的等高线图。图中以色阶表示系统能够支持的用户数分布,横轴为总发射功率,纵轴为速率门限。可以看出,随着总功率的增加,系统可调度的用户数逐渐增多,尤其在较低的速率门限下,系统能够支持的用户数量显著增加。这表明,一方面功率预算的提升有助于系统有效增加服务的用户数量。另一方面,当速率门限提高时,系统可调度的用户数有所减少,因为更高的速率门限要求更高的传输速率,从而限制了用户数的增加。综上所述,所提出的算法在不同功率预算和速率门限条件下,能够有效优化系统的用户调度能力,并在保证通信质量的前提下最大化可服务用户的数量。

进一步地,图6给出了在总发射功率为-1 dBW、速率门限为 $0.8 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 时,概率LoS信道下可调度用户数随信道估计误差功率 σ_e^2 变化的结果。可以看出,在典型低空场景中较为常见的LoS主导传播条件下,系统在小估计误差区域内仍可维持较高的可调度用户数,说明所提方案在实际低空信道环境下具有良好的适应性与稳定性。尽管随着信道估计误差功率的增加,系统性能会出现一定下降,但当 κ_k 较大时,下降趋势相对平缓,反映出所提算法在较强LoS环境中具备一定的误差鲁棒性。相比之下,当 κ_k 较小时,由于NLoS成分占比上升,系统对估计误差更为敏感,可调度用户数下降更为明显。因此,该结果进一步说明,在正常低空信道和较高质量信道估计条件下,所提方法能够取得较为理想的用户调度效果。

5 结束语

本文聚焦GNSS拒止场景下低空无人机的任务执行问题,研究了无人机自主导航与多用户下行通信的一体化设计方法。在缺乏卫星导航支撑的条件下,设计了基于角度量测的导航策略,使无人机能够可靠抵达指定目标阵位。在此基础上,针对位置已知地面用户的下行传输需求,进一步设计了相应的资源分配与用户调度方案,以提升目标阵位处的服务能力。仿真结果表明,所提方法能够在仅依赖角度信息的

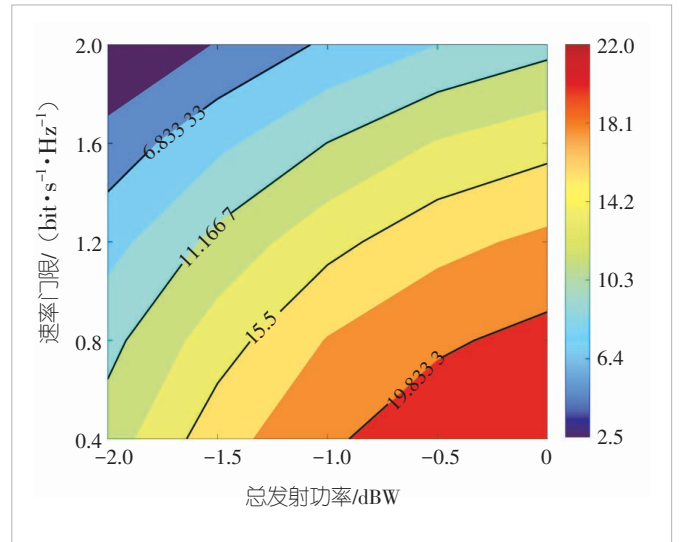


图5 不同功率预算与速率门限下的可调度用户数等高线图

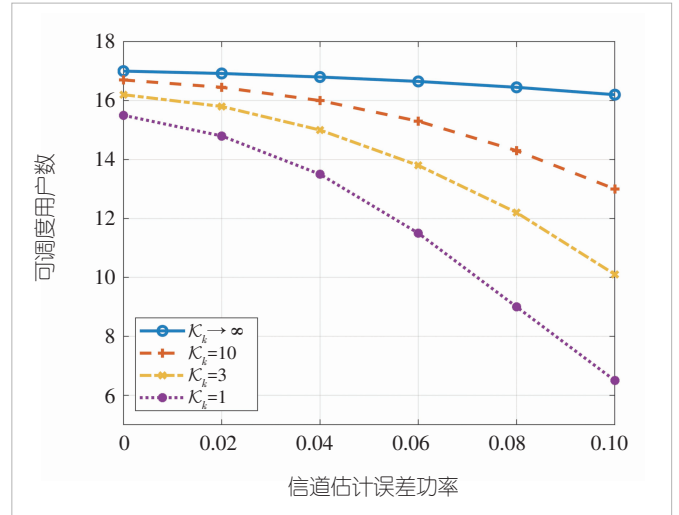


图6 概率视距/非视距信道下可调度用户数随信道估计误差功率的变化

条件下实现有效目标捕获,并在不同功率预算与速率门限下提升系统的用户调度性能。本文工作为GNSS拒止环境下无人机任务部署与通信服务提供了一种可行的解决思路。

参考文献

- [1] Yuan W J, Cui Y H, Wang J C, et al. From ground to sky: architectures, applications, and challenges shaping low-altitude wireless networks [PP/OL]. arXiv[2026-02-10]. <https://arxiv.org/abs/2506.12308>
- [2] Motlagh N H, Bagaa M, Taleb T. UAV-based IoT platform: a crowd surveillance use case [J]. IEEE communications magazine, 2017, 55 (2): 128-134. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600587CM
- [3] Wu J, Yang Y Q, Yuan W J, et al. Low-altitude wireless networks: a comprehensive survey [PP/OL]. arXiv[2026-02-11]. <https://arxiv.org/abs/2509.11607>

- [4] Cui J J, Liu Y W, Nallanathan A. Multi-agent reinforcement learning-based resource allocation for UAV networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(2): 729–743. DOI: 10.1109/TWC.2019.2935201
- [5] Cai Y X, Wei Z Q, Li R D, et al. Joint trajectory and resource allocation design for energy-efficient secure UAV communication systems [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(7): 4536–4553. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2982152
- [6] Wu N, Wu J, Yuan W J, et al. SAGIN-oriented covert communications: joint robust beamforming and coverage optimization [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2026, 44: 1903–1915. DOI: 10.1109/JSAC.2025.3638305
- [7] Deng C L, Fang X M, Wang X B. Beamforming design and trajectory optimization for UAV-empowered adaptable integrated sensing and communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(11): 8512–8526. DOI: 10.1109/TWC.2023.3264523
- [8] Kamat S U, Rasane K. A survey on autonomous navigation techniques [C]//Proceedings of Second International Conference on Advances in Electronics, Computers and Communications (ICAEECC). IEEE, 2018: 1–6. DOI: 10.1109/ICAEECC.2018.8479446
- [9] Kassas Z M, Khairallah N, Khalife J J, et al. Aircraft navigation in GNSS-denied environments via radio SLAM with terrestrial signals of opportunity [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2024, 25(10): 14164–14182. DOI: 10.1109/TITS.2024.3405908
- [10] Marina De H G. Maneuvering and robustness issues in undirected displacement-consensus-based formation control [J]. IEEE transactions on automatic control, 2021, 66(7): 3370–3377. DOI: 10.1109/TAC.2020.3019780
- [11] Chen L M, Ruan R Z, Li J Q, et al. An angle-based control law for target location stabilization in 3-D space [J]. IEEE transactions on automatic control, 2026, 71(2): 1310–1317. DOI: 10.1109/TAC.2025.3613695
- [12] Mao W H, Lu Y, Pan G F, et al. UAV-assisted communications in SAGIN-ISAC: mobile user tracking and robust beamforming [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2025, 43(1): 186–200. DOI: 10.1109/JSAC.2024.3460065
- [13] Zhu J Y, Wang J H, Huang Y M, et al. On optimal beamforming

design for downlink MISO NOMA systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(3): 3008–3020. DOI: 10.1109/TVT.2020.2966629

作者简介



金海佳，南方科技大学在读硕士研究生；主要研究方向为低空无线网络、无线网络控制。



袁伟杰，南方科技大学助理教授（副研究员）、博士生导师；主要研究方向为通感一体化、车联网、低空无线网络通信、OTFS调制等。



伍军，南方科技大学在读博士研究生；主要研究方向为通感一体化、无人机通信。

面向未知环境的频谱与激光雷达联合具身建图与导航



Joint Spectrum Mapping and Navigation Using Spectrum and LiDAR in Unknown Environment

张佳益/Zhang Jiayi, 梁宏韬/Liang Hongtao,
万奕尧/Wan Yiyao, 周福辉/Zhou Fuhui, 吴启晖/Wu Qihui

(南京航空航天大学, 中国 南京 211106)
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602007

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260430.1409.004>

网络出版日期: 2026-04-30

收稿日期: 2026-02-25

摘要: 提出了一种频谱与激光雷达联合具身建图与导航的框架。该框架以多通道栅格张量表征环境状态, 在感知层通过建图网络将稀疏频谱采样与局部几何信息联合反演为全局频谱信号势场与障碍概率图, 打破单一模态导航的限制, 实现目标引导与几何约束的有效融合; 在决策层引入深度强化学习网络以捕捉历史轨迹与环境特征, 将部分可观测状态映射至高维潜在决策空间并实现动作策略优化, 缓解策略震荡与重复访问问题。仿真结果表明, 在40×40室内栅格环境中经过5 000轮训练后, 所提方法的导航成功率达到82%, 相较基线方法显著降低了碰撞率与路径冗余度。在多种地图尺度及室外低空参数配置下的泛化测试表明, 该框架具备良好的场景适应能力, 验证了多模态联合驱动框架的有效性与鲁棒性。本研究以室内环境为典型验证场景, 所提框架可推广至更大规模的低空通信网络覆盖场景。

关键词: 无人机室内导航; 频谱地图构建; 强化学习; 具身智能

Abstract: A joint framework for spectrum-LiDAR integrated embodied mapping and navigation is proposed. This framework represents environmental states using multi-channel grid tensors. At the perception layer, a mapping network jointly inverts sparse spectrum samples and local geometric information into a global spectrum signal potential field and an obstacle probability map, thereby breaking the limitations of single-modal navigation and achieving effective integration of target guidance and geometric constraints. At the decision-making layer, a deep reinforcement learning network is introduced to capture historical trajectories and environmental features, mapping partially observable states to a high-dimensional latent decision space and optimizing action strategies, which mitigates strategy oscillation and repeated access problems. Simulation results indicate that after 5 000 training episodes in a 40×40 indoor grid environment, the proposed method achieves an 82% navigation success rate, significantly reducing the collision rate and path redundancy compared to baseline methods. Further generalization tests under various map scales and outdoor low-altitude parameter configurations demonstrate that the framework exhibits excellent scene adaptability, validating the effectiveness and robustness of the multi-modal joint-driven framework. This research employs the indoor environment as a typical verification scenario, and the proposed framework can be extended to larger-scale low-altitude communication network coverage scenarios.

Keywords: UAV indoor navigation; spectrum mapping reconstruction; reinforcement learning; embodied intelligence

引用格式: 张佳益, 梁宏韬, 万奕尧, 等. 面向未知环境的频谱与激光雷达联合具身建图与导航 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 43-49. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602007

Citation: Zhang J Y, Liang H T, Wan Y Y, et al. Joint spectrum mapping and navigation using spectrum and LiDAR in unknown environment [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 43-49. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602007

随着无人机技术与具身智能的快速发展, 无人机自主飞行与导航技术逐渐成为智能巡检、仓储盘点、应急救援、安防监控等应用场景中的关键支撑技术^[1]。广域立体覆盖的低空通信网络不仅为无人机提供可靠的通信连接, 还蕴含着丰富的频谱环境信息。频谱地图作为刻画无线信号在空间中分布特性的核心工具, 在低空通信网络的干扰管理、频

谱资源分配和覆盖优化等方面具有重要价值。特别是在卫星导航信号不可达的室内、地下、隧道等封闭环境中, 利用已有通信基础设施产生的频谱信号场进行辅助导航成为一种极具潜力的技术途径。

相比室外环境, 室内空间结构复杂、遮挡密集、通道狭窄且环境动态变化频繁, 同时卫星导航在室内无法提供可靠

定位信息^[2], 因此如何在未知室内环境中实现安全、高效、鲁棒的自主导航, 满足避免碰撞与目标引导的双重需求, 是当前无人机智能化应用面临的重要挑战。

针对室内未知信源目标导航问题, 现有研究主要从几何感知与信号感知两条路径展开。传统室内导航系统通常依赖激光雷达或视觉传感器构建环境地图^[3], 并结合定位与规划算法实现自主移动。基于激光雷达的导航能够感知障碍物结构, 具备较强的避障能力。然而, 在缺乏先验地图和目标方位显式引导的情况下, 无人机需要通过探索逐步获取环境信息, 容易出现重复访问、局部徘徊、路径冗余等问题, 降低导航效率与任务成功率^[4]。此外, 室内环境中频谱信号的空间分布具有一定规律性^[5], 基于频谱强度的梯度导航方法能够提供目标趋近方向, 但容易受墙体遮挡、多径效应和噪声扰动影响^[6], 在障碍密集区域极易产生碰撞风险。可见, 几何感知缺乏目标引导, 频谱感知缺乏避障能力, 二者存在天然互补性。因此, 融合几何与频谱观测, 并在稀疏观测条件下实现可靠的频谱地图构建与导航决策, 是提升室内无人机自主导航性能的重要研究方向。

此外, 传统导航方法通常在已知地图中进行全局路径规划, 例如, 文献[7]中提出了改进的概率路线图算法 (PRM) 和快速探索随机树算法 (RRT), 用于处理高维空间向量; 文献[8]则提出了基于全局路径规划的算法 A* 和 Dijkstra, 通过最优路径完成完备导航。然而在实际室内场景中, 无人机往往无法提前获取完整的环境信息, 必须通过在线探索逐步构建对环境的认知^[9]。这一过程中, 无人机仅能获取当前位置的局部观测, 因此需要综合历史轨迹判断已探索区域, 避免重复访问, 并基于不断更新的环境认知推断最优决策。这对感知与决策的实时协同提出了更高要求, 即感知模块需要根据新观测持续更新环境表征, 决策模块需要基于不完整信息进行序贯决策^[10], 二者相互依赖、动态演进。因此, 如何在未知环境中实现感知与决策的在线协同与闭环, 成为当前无人机具身导航的重要问题。

近年来, 具身导航领域引起了业界的广泛关注。Gupta 等^[11]提出了认知地图与规划方法, 将视觉观测映射为顶层空间地图用于导航规划, 但仅使用视觉单模态输入, 在缺乏目标物理场引导时探索效率低下。现有基于深度强化学习的导航方法大多聚焦于单一传感器输入, 将规划与感知分离处理, 难以实现建图与导航的联合优化。特别是, 现有工作尚未将频谱信号场作为导航引导模态引入具身建图框架, 也缺乏将频谱地图构建与具身导航决策进行紧耦合联合优化的研究。

为解决上述问题, 本文提出一种室内频谱地图构建与具身导航联合框架, 主要贡献概括如下:

1) 针对现有单一传感器导航缺乏目标引导或避障能力的问题, 提出一种融合频谱强度观测与激光雷达几何信息的多通道栅格张量表征方法。该方法将稀疏频谱采样、激光雷达障碍物感知、探索状态掩码与位置指示统一编码在同一空间表征框架中, 使得频谱梯度与障碍结构在空间维度上自然对齐, 为室内无人机信号源搜索与导航提供频谱梯度引导与结构避障约束, 为后续建图网络同时推断信号势场与障碍分布提供了结构化的信息基础, 有效解决了单一传感器在复杂室内环境中未知信源目标导航与避障的问题。

2) 针对稀疏观测条件下的空间信息重建需求, 利用建图网络实现频谱信号场与障碍结构的联合重建, 提出了具身建图与导航联合框架。在该联合框架中, 建图网络与决策网络通过联合损失函数进行端到端优化, 建图结果直接决定决策网络的输入特征, 而决策驱动的移动则产生新观测以更新地图, 形成双向耦合的具身智能闭环。这种设计使得建图结果能够逐步形成更有利于导航的空间表示, 同时决策网络也能适应建图误差并学习稳定的目标导向策略。

3) 本文所提出的方法在多场景、多尺度下均可以有效改善无人机室内导航的成功率、安全性和鲁棒性。该框架具备跨场景、跨尺度的适应能力, 并在室内基准场景中训练 5 000 轮后成功率达到 82%, 碰撞率仅为 3%, 相比传统主流方法, 在成功率、碰撞率等方面均具有明显优势。

1 系统模型与优化问题建模

1.1 系统模型

本文研究室内未知环境下的无人机具身智能导航任务, 将无人机导航抽象为固定高度下的 2 维平面导航问题。环境采用离散栅格地图表示, 包含可通行区域与障碍物区域, 地图尺寸设为 40×40 , 对应 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的典型室内空间, 每个栅格对应 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的物理区域。边界栅格强制设为障碍物以防止越界。在每个回合中, 无人机从自由空间的随机起点出发, 目标点随机设置在可通行区域内。无人机在每个时间步 t 依据当前观测信息选择动作, 当进入目标邻域则判定任务成功, 若达到最大步数仍未到达目标则判定失败。

为实现目标导向导航, 本文引入室内频谱信号场并将其作为引导信息。假设信号源位于目标位置, 信号强度随距离衰减, 形成可用于导航的频谱势场。基于广度优先搜索算法计算各栅格到目标的最短可达路径距离 d , 并通过指数衰减函数构造频谱强度分布 $S(x, y)$ 表示为:

$$S(x, y) = \exp(-\alpha \cdot d(x, y)) \quad (1),$$

其中, α 为衰减系数, 不可达区域的信号强度设为 0。该设计考虑了障碍物对信号传播路径的影响, 为无人机导航提供稳定的频谱梯度信息。

1.2 优化问题建模

本文将室内无人机导航任务建模为马尔可夫决策过程。设无人机在时间步 t 的位置为 $p_t = (x_t, y_t)$, 目标位置为 p_g , 执行动作 a_t 后转移至下一位置 p_{t+1} 。定义导航时间代价 $J_{\text{time}} = \sum_{t=0}^T 1 = T$, 碰撞代价 $J_{\text{collision}} = \sum_{t=0}^T C_t$, 路径效率代价 $J_{\text{efficiency}} = \max(0, 1 - \frac{d^*}{T})$ 。其中, T 为到达目标所需步数, $C_t \in \{0, 1\}$ 为时间步 t 的碰撞指示, d^* 为起点到目标的最短路径距离。由此, 定义优化目标为:

$$\min_{\pi} E_{\tau \sim \pi} [\alpha_1 J_{\text{time}} + \alpha_2 J_{\text{collision}} + \alpha_3 J_{\text{efficiency}}] \quad (2),$$

其中, α_1 、 α_2 、 α_3 为权重系数, 分别控制时间、安全与效率的相对重要性。上述优化需满足约束 $P_t \in M_{\text{free}}$ 、 $\|P_t - P_g\| < \varepsilon$ 以及 $T \leq T_{\text{max}}$, 这些约束分别表示无人机位置需位于可通行区域、终止时需到达目标邻域以及导航步数不超过上限。

上述问题的求解面临三重挑战: 一是环境先验未知, 无人机仅能获取当前位置的局部观测; 二是频谱观测稀疏且分布不均, 难以直接用于全局规划; 三是状态空间高维且决策具有长期时序依赖。为此, 本文设计地图构建与导航决策联合方法以提供全局环境估计, 并通过 Transformer 网络捕捉历史轨迹信息以增强决策一致性。

2 地图构建与导航决策联合方法

本文所提出的地图构建与导航决策联合方法的具体架构如图 1 所示。具体而言, 本方法在感知模块通过探索逐步构建环境表征并重建地图, 在决策模块基于实时更新的认知地图输出无人机动作, 并在动作执行后获得新观测进一步完善感知, 最终完成具身建图与导航。

与传统“先建图后规划”的分离式方法不同, 本文所提出的联合框架强调无人机通过自身行为主动感知环境, 在探

索过程中同步构建环境表征并做出导航决策, 形成“感知-建图-决策-行动”的紧耦合闭环。具体而言, 建图结果直接影响决策网络的输入特征, 而决策驱动的移动又产生新的频谱和几何观测用于更新地图, 这种双向耦合机制使得感知质量与决策效能相互促进、协同演化, 区别于传统 SLAM 中感知与规划相互独立的架构, 体现了具身智能的核心范式。

2.1 感知建图模块

在室内无人机导航任务中, 无人机无法预先获取全局环境信息, 需通过在线探索逐步构建对环境的认知。本文设计多模态感知融合机制, 将稀疏频谱观测与几何结构信息统一表征为多通道栅格张量, 并通过深度网络重建全局环境地图。

在时间步 t , 感知建图模块以四通道栅格作为输入, 分别包含稀疏频谱观测图 M_{sparse}^t 、观测掩码图 M_{mark}^t 、当前位置指示图 M_{pos}^t 以及由激光雷达投影得到的结构提示图 M_{lidar}^t , 记为:

$$X_t = [M_{\text{sparse}}^t, M_{\text{mark}}^t, M_{\text{pos}}^t, M_{\text{lidar}}^t] \in R^{4 \times H \times W} \quad (3),$$

其中, 稀疏频谱观测图记录无人机已访问栅格的频谱强度值, 未访问区域为 0; 观测掩码图将已访问栅格标记为 1, 未访问标记为 0; 当前位置指示图仅在智能体所在栅格处为 1, 其余位置为 0; 雷达结构提示图由 8 方向激光雷达投影得到, 探测到障碍物的栅格标记为 1。该多通道表示有效融合了信号信息与几何结构信息, 使网络在稀疏观测条件下仍具备较强的空间推断能力。

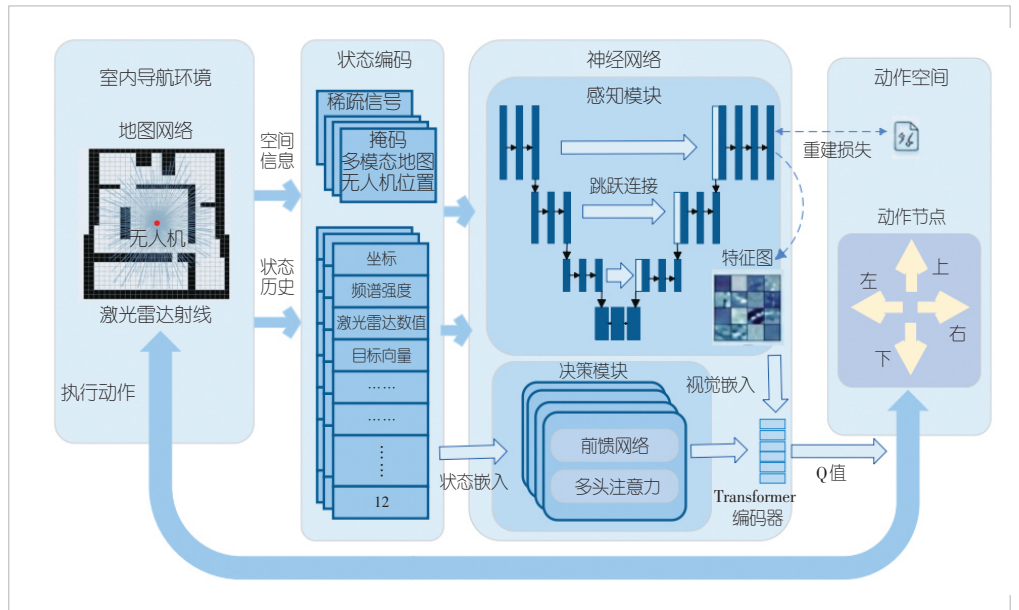


图1 本文所提地图构建与导航决策联合方法

本文采用UNet作为建图网络，其编码器包含初始双层 3×3 卷积和两次下采样，解码器通过 2×2 转置卷积上采样并与编码器对应层进行跳跃连接融合，通道数从128逐步恢复至32，最后通过 1×1 卷积输出两通道预测结果，分别为频谱信号场估计图 S_t 与障碍概率图 O_t ，均经Sigmoid激活以确保输出在 $[0,1]$ 范围内。为实现信号场重建与障碍结构推断的联合学习，本文采用多任务加权损失函数进行训练，具体为：

$$L_{\text{UNet}} = \lambda_1 \cdot \text{MSE}(S_t, S) + \lambda_2 \cdot \text{BCO}(O_t, M) \quad (4),$$

其中 $\lambda_1=15.0$ 、 $\lambda_2=25.0$ 为损失权重，MSE为均方误差，BCE为二元交叉熵损失。建图网络使用Adam优化器，学习率设为 5×10^{-4} 。重建的频谱地图为决策模块提供目标方位的梯度引导，障碍概率图则为安全导航提供约束信息。

2.2 决策导航模块

在理解感知模块所构建的环境表征过程中，决策模块需要解决无人机在部分可观测条件下的序贯决策问题。为此，本文采用深度强化学习框架，将导航策略学习建模为马尔可夫决策过程的求解。

为了详尽展示无人机在当前状态的所有可用状态信息，本文设计了14维标量状态向量 K_t 用于决策网络输入，包含2维归一化位置坐标、1维当前位置频谱强度、1维局部已访问比例、2维归一化目标方向向量，以及8维8方向激光雷达归一化距离读数。该状态向量在每个时间步更新，并堆叠最近12步形成历史序列输入深度学习网络，以提供时序上下文信息。

考虑到室内无人机导航具有明显的长期依赖特性，需要综合历史观测判断已探索区域，避免回环与重复访问，同时本文中决策网络需要结合建图结果计算更优的目标逼近路径。为此，本文采用Transformer构建导航决策网络。状态向量通过线性层映射到128维嵌入空间，将12步历史状态形成12个状态标记；同时将UNet输出的2通道地图通过三层卷积下采样，得到 $5 \times 5 \times 128$ 的特征图，展平为25个地图标记。随后将二者拼接形成序列，加入可学习的位置编码后输入4层Transformer编码器，最后取最后一个状态标记对应的输出，通过两层MLP映射为4个动作的Q值 $Q(K_t, \alpha; \theta)$ 。

本文还设计了基于时间、频谱梯度、探索奖励等多个评价指标所构成的奖励函数以引导智能体学习高效、安全的导航策略。在时间步 t ，智能体执行动作后获得的即时奖励定义为：

$$r_t = r_{\text{base}} + r_{\text{grad}} + r_{\text{exp}} + r_{\text{col}} + r_{\text{jit}} + r_{\text{goal}} \quad (5),$$

其中，基础时间惩罚 r_{base} 鼓励快速到达目标；频谱梯度奖励 r_{grad} 为核心奖励，通过比较移动前后的频谱强度差值提供密

集的目标导向信号；探索奖励 r_{exp} 对首次访问新栅格给予奖励，并惩罚重复访问；碰撞惩罚 r_{col} 在尝试进入障碍物时触发，抖动惩罚 r_{jit} 在连续两步执行相反动作时触发，到达奖励 r_{goal} 在成功进入目标邻域时给予。

在强化学习训练方面，本文设计了基于深度Q网络(DQN)的强化学习框架，训练阶段使用 ϵ -greedy策略选择动作， ϵ 从1.0按衰减系数从0.999 5衰减至0.1。为缓解Q学习过程中的目标震荡问题，本文采用目标网络并使用软更新策略，在决策网络使用AdamW优化器，设置学习率为 10^{-4} 。训练过程中，UNet建图网络与Transformer决策网络在同一循环内联合更新，使建图结果逐步形成更有利于导航决策的空间表示，同时决策网络也能够适应建图误差并学习稳定的目标导向策略，实现感知与决策的协同优化。综上所述，频谱与激光雷达联合具身建图与导航算法的完整流程如算法1所示。

算法1 频谱与激光雷达联合具身建图与导航算法

输入:初始位置 p_0 ,目标信号源特征,最大步数 T_{max} ,训练轮数 N

输出:训练后的建图网络 θ_{map} 和决策网络 θ_{dec}

- 1:初始化UNet建图网络参数 θ_{map} ,Transformer-DQN参数 θ_{dec}
- 2:初始化经验回放缓冲区 \mathcal{D} ,容量为60 000
- 3:初始化探索参数 $\varepsilon = 1.0$
- 4: **for** episode = 1 to N **do**
- 5: 随机生成环境地图,初始化智能体位置和目标位置
- 6: 初始化多通道栅格张量 $M_0 = 0$
- 7: **for** $t = 1$ to T_{max} **do**
- 8: 获取当前位置激光雷达局部观测和频谱采样值
- 9: 更新多通道栅格张量 M_t ,
- 10: UNet建图网络推断: $(S_t, O_t) = f_{\text{map}}(M_t; \theta_{\text{map}})$
- 11: 构建决策输入:将结果与状态向量编码为token序列
- 12: 以 ϵ -greedy策略选择动作 a_t
- 13: 执行动作 a_t ,获取奖励 r_t 和新状态 s_{t+1}
- 14: 存储 (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) 至缓冲区 \mathcal{D}
- 15: 从 \mathcal{D} 中采样batch,计算联合损失
- 16: 反向传播更新 θ_{map} 和 θ_{dec}
- 17: **if** 到达目标 **or** 碰撞 **or** T_{max} **then break**
- 18: **end for**
- 19: 更新 ε
- 20: **end for**

3 实验结果与分析

为验证本文提出的室内频谱地图构建与具身导航联合

框架的有效性,在大小为 40×40 的地图仿真环境中开展实验,训练数据集包含7 200张地图,无人机在不同地图中随机初始化目标点与起点位置进行训练与测试,墙体区域由二值矩阵表示,每个回合最大步数设置为600,雷达射线数为8,最大探测距离为10栅格,状态维度为14,历史序列长度为12,Transformer嵌入维度为128,层数为4,注意力头数为8,前馈神经网络(FFN)维度为512,折扣因子 γ 为0.98,软更新系数 τ 为0.005,经验回放池容量为60 000,批量大小为128。图2展示了导航轨迹、局部观测和全局重建地图。

本文采用成功率、碰撞率和最佳模型测试成功率3个指标综合评估导航性能。成功率定义为成功到达目标的回合数占总回合数的比例;碰撞率为每回合发生碰撞的步数占总步数的比例;最佳模型测试成功率为所训练的最佳模型在测试集不同难度地图中到达目标的回合数占总回合数的比例。为全面验证本文方法的有效性,设计了4组对比实验:

1) 仅使用激光雷达方法:移除频谱信息通道测试纯几何导航能力。

2) 仅使用频谱强度方法:移除雷达结构提示测试纯信号导向能力。

3) 基于边界的自主探索算法(FE):经典的基于边界探索策略^[12],是机器人自主探索中一种广泛使用的算法,其核心思想是通过识别已知空间与未知空间的交界区域,并引导机器人前往这些区域以逐步构建完整地图。

4) 长短期记忆(LSTM)神经网络:一种重要的目前使用较多的时间序列算法^[13],主要解决长序列训练过程中的梯度消失和梯度爆炸问题。本文将Transformer替换为LSTM进行状态建模。

所有对比方法均训练5 000轮并采用相同的课程学习

策略。

图3展示了各方法在5 000轮训练过程中的成功率曲线。从成功率曲线可以看出,本文方法的最终成功率稳定在82%,明显优于其他方法。训练过程中虽有波动,但整体呈上升趋势,表明融合频谱强度观测与激光雷达信息的策略可以出色完成导航。仅使用频谱强度方法成功率约68%,表明该方法虽然具备一定的目标导向能力,但由于缺乏结构约束从而在障碍密集场景中性能受限。采用LSTM方法的成功率约65%且波动较大,说明LSTM在长期依赖建模能力上不如Transformer稳定。采用FE方法的成功率稳定在58%左右,说明该方法作为基于规则的方法在性能上相对受限。仅使用激光雷达方法成功率仅45%且波动巨大,表明缺乏目标引导信息会导致策略在长距离任务中严重退化。

图4展示了各方法在5 000轮训练过程中的碰撞率对比图,从碰撞率对比图可见,仅使用频谱强度方法碰撞率明显高于其他方法,说明该方法缺乏障碍物感知,导致智能体频

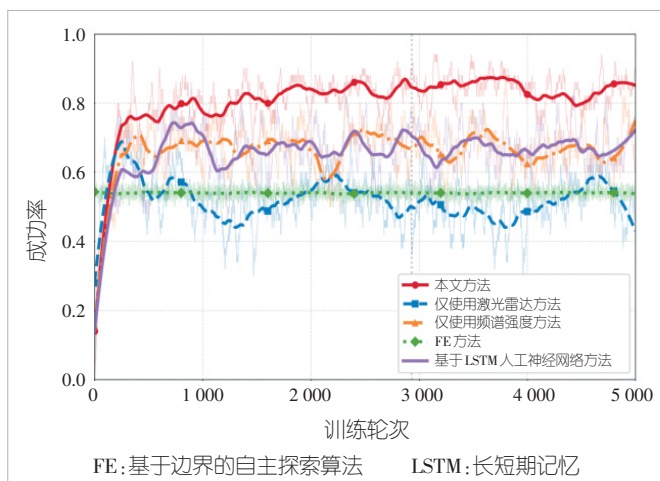


图3 不同方法在训练过程中的成功率对比图

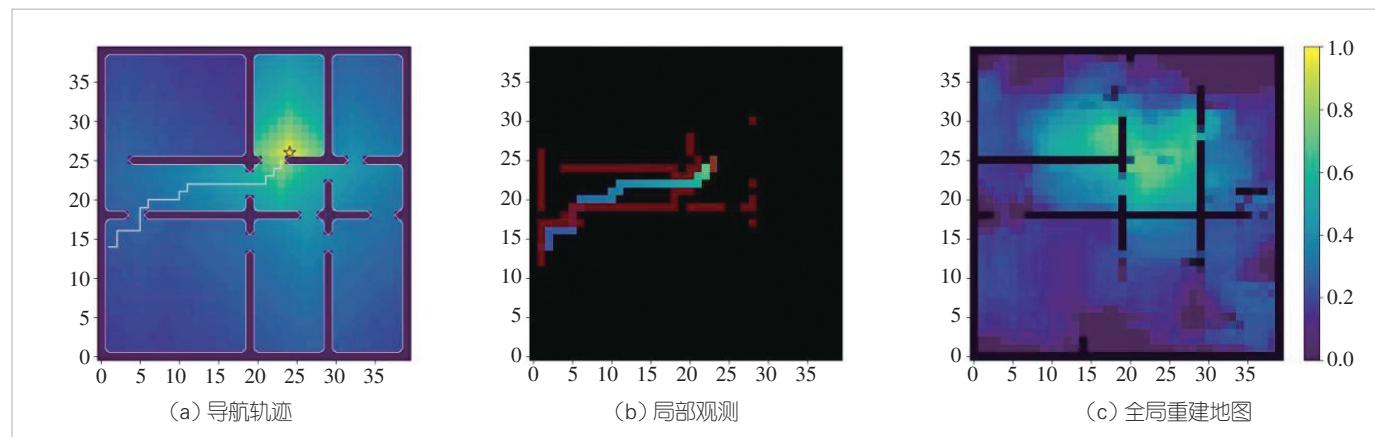


图2 导航轨迹、局部观测和全局重建地图

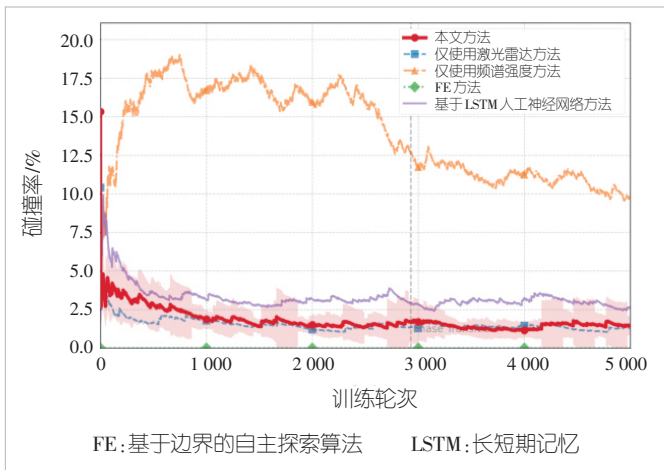


图4 不同方法在训练过程中的碰撞率对比图

繁撞墙，即使朝着目标方向移动也会因无法避障而产生大量无效碰撞。而本文方法、仅使用激光雷达方法和基于LSTM方法的碰撞率均维持在3%~8%的低水平，说明雷达信息和地图重建对避障至关重要。采用FE方法的碰撞率接近0%，这是因为该方法基于已知地图进行规划从而天然避免了碰撞，但代价是牺牲了路径效率。

图5展示了各方法在5000轮训练过程中的最佳模型测试成功率对比图，本文将200个测试集按障碍物比例分为3种难度，取各对比方法训练最佳模型进行测试。从测试集成功率对比图可以看出，本文方法的最佳模型在不同难度的地图中成功率均高于其他方法，且优势随地图难度增加愈发明显，在高难度地图中仍实现了88%的导航成功率，证实了本文方法所训练模型的可靠性与优越性。

由以上实验结果可知，首先，频谱强度与激光雷达的多模态融合具有必要性，仅使用激光雷达缺乏目标引导，仅使

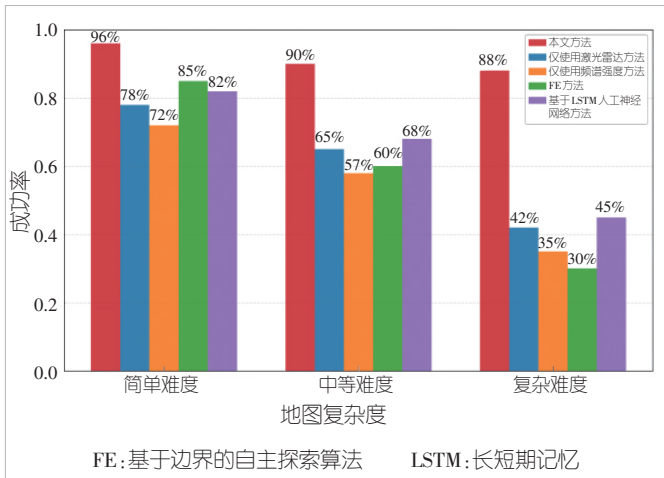


图5 最佳模型测试成功率对比图

用频谱信息缺乏避障能力，二者融合才能实现高效、安全的导航，本文方法通过感知网络有效实现了这一融合；其次，基于Transformer的决策网络在相同输入条件下在成功率、碰撞率等方面均优于LSTM网络，验证了本文决策网络在长期依赖建模上的优势，是一种安全、高效且鲁棒的导航方法。

为验证所提方法的尺度可扩展性，在保持网络结构不变的情况下，本文将训练的最佳模型分别在 20×20 、 40×40 、 60×60 和 80×80 四种地图尺度上进行测试。其中 20×20 对应 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 小型房间， 60×60 对应 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ 仓储空间， 80×80 对应 $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ 大型厂房。各尺度测试集均为200个。

结果表明，随着地图尺度增大，成功率有所下降但仍保持在70%以上，说明方法具有合理的尺度扩展能力；碰撞率和路径长度随尺度增加而增长，与更大搜索空间带来的更高探索难度一致；在 20×20 小尺度场景中成功率接近90%，验证了方法在不同规模场景中的有效性。上述结果说明，本文所采用的多通道栅格张量表征和UNet编解码器结构天然支持不同分辨率输入，具备良好的尺度可扩展性。

为验证所提框架向室外低空场景的可推广性，本文构建了室外低空参数配置的仿真实验。具体为，采用 60×60 栅格，每个栅格对应 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的物理区域，覆盖总面积为 $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 的低空区域，以稀疏建筑物群模拟室外遮挡环境，障碍物占比约8%~12%；采用3GPP TR 38.901标准中的Urban Macro (UMa) 路径损耗模型，发射功率46 dBm，载频3.5 GHz，路径损耗指数2.2（视距）/3.5（非视距），阴影衰落标准差4 dB（视距）/7.8 dB（非视距），并部署3个宏基站作为信号源。

实验结果表明，在该室外配置下，本文方法经100轮测试后导航成功率达到86%，碰撞率为3.7%。由于室外场景障碍物稀疏、信号传播更规则，导航性能相比室内场景有所提升，进一步验证了该框架从室内到室外场景的可迁移性，说明本文框架对低空通信网络覆盖场景具有适用性。

4 结束语

本文面向广域立体覆盖的低空通信网络中室内未知环境下的无人机导航任务，针对传统几何导航缺乏目标引导、单独依赖频谱信息易忽略障碍约束等问题，提出了一种面向未

表1 不同地图尺度下的实验结果

地图尺度	成功率/%	碰撞率/%
20×20	89.5	2.3
40×40	82.0	5.6
60×60	76.0	7.8
80×80	71.0	9.2

知环境的频谱与激光雷达联合具身建图与导航方法。该方法基于具身智能,融合稀疏频谱观测、观测掩码、位姿提示与激光雷达结构线索。具体而言,在表征层面,设计了融合频谱与几何特征的四通道栅格张量,将多模态信息统一编码在同一空间表征中;在架构层面,设计了建图网络与决策网络的双向耦合机制,实现了感知与决策的联合优化而非简单串联;在奖励设计层面,融合了频谱梯度引导、探索激励与碰撞惩罚等多维目标,使无人机能够在频谱引导与几何约束之间自适应平衡。对比实验表明,本文方法在目标导向能力与策略稳定性方面均优于对比方法,验证了频谱引导与几何感知融合策略的有效性。多尺度实验验证了方法的尺度可扩展性,室外低空参数配置的仿真实验进一步验证了框架向低空通信网络覆盖场景推广的可行性。

参考文献

- [1] Alhafnawi M, Bany S H A, Masadeh A, et al. A survey of indoor and outdoor UAV-based target tracking systems: current status, challenges, technologies, and future directions [J]. IEEE access, 2023, 11: 68324–68339. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3292302
- [2] Kim D K, Chen T. Deep neural network for real-time autonomous indoor navigation [PP/OL]. (2015–11–15)[2026–01–15]. <https://arxiv.org/abs/1511.04668>
- [3] Zhang J, Wu Y, Liu W, et al. Novel approach to position and orientation estimation in vision-based UAV navigation [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2010, 46(2): 687–700. DOI: 10.1109/TAES.2010.5461649
- [4] Ge S S, Fua C. Complete multi-robot coverage of unknown environments with minimum repeated coverage [C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2005: 715–720. DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570202
- [5] Twigg J N, Fink J R, Yu P L, et al. RSS gradient-assisted frontier exploration and radio source localization [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2012: 889–895. DOI: 10.1109/ICRA.2012.6225059
- [6] Chhikara P, Tekchandani R, Kumar N, et al. DCNN-GA: a deep neural net architecture for navigation of UAV in indoor environment [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(6): 4448–4460. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3027095
- [7] Karaman S, Frazzoli E. Sampling-based algorithms for optimal motion planning [J]. The international journal of robotics research, 2011, 30(7): 846–894. DOI: 10.1177/0278364911406761
- [8] LaValle S M. Planning algorithms [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2006. DOI: 10.1017/cbo9780511546877
- [9] Cadena C, Carlone L, Carrillo H, et al. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: toward the robust-perception age [J]. IEEE transactions on robotics, 2016, 32(6): 1309–1332. DOI: 10.1109/TRO.2016.2624754
- [10] Hausknecht M, Stone P. Deep recurrent Q-learning for partially observable MDPs [EB/OL]. [2026–01–15]. <https://arxiv.org/pdf/1507.06527>
- [11] Gupta S, Davidson J, Levine S, et al. Cognitive mapping and planning for visual navigation [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2017:

7272–7281. DOI: 10.1109/CVPR.2017.769

- [12] Yamauchi B. A frontier-based approach for autonomous exploration [C]//Proceedings 1997 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation CIRA 97. 'Towards New Computational Principles for Robotics and Automation'. IEEE, 1997: 146–151. DOI: 10.1109/CIRA.1997.613851
- [13] Yu Y, Si X S, Hu C H, et al. A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures [J]. Neural computation, 2019, 31(7): 1235–1270. DOI: 10.1162/neco_a_01199

作者简介



张佳益, 南京航空航天大学电子信息工程学院在读硕士研究生; 主要研究方向为无人机具身智能。



梁宏韬, 南京航空航天大学电子信息工程学院在读博士研究生; 主要研究方向为低空具身智能、多模态融合与电磁频谱具身智能管控。



万奕尧, 南京航空航天大学在读博士研究生; 主要研究方向为深度学习、多模态融合。



周福辉, 南京航空航天大学人工智能学院教授、博士生导师, 国家优秀青年科学基金获得者; 主要研究方向为频谱智能管控和资源鲁棒优化、认知智能与知识图谱。



吴启晖, 南京航空航天大学特聘教授、副校长, 博士生导师, 教育部“长江学者”特聘教授; 主要研究方向为认知科学与应用、电磁空间频谱认知智能管控、无人机认知集群。

突破无线移动通信蜂窝覆盖局限的路径探讨



Exploring Pathways to Break Through Wireless Mobile Cellular Network Coverage Limitations

李建东/Li Jiandong, 盛敏/Sheng Min, 刘俊宇/Liu Junyu

(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 Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602008

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260428.1031.002>

网络出版日期: 2026-04-28

收稿日期: 2026-03-06

摘要: 无线移动通信覆盖呈现人口密集区域过覆盖、低空立体空域欠覆盖、远域远海无覆盖的非均衡格局。传统蜂窝覆盖已难以满足密集化、立体化及广域按需覆盖需求。围绕如何突破移动通信系统平面蜂窝覆盖局限, 阐述从信号覆盖到容量覆盖、从平面覆盖到立体覆盖、从固定覆盖到广域按需覆盖的技术途径, 探讨密集无线网络中的重叠覆盖干扰管控规律、多棱柱立体覆盖结构、卫星系统和地面移动网络融合的广域按需覆盖等关键技术与基本原理, 形成了广域立体密集无线移动通信覆盖体系, 最后展望了该体系进一步增强的研究方向。

关键词: 无线覆盖; 密集干扰管控; 立体覆盖结构; 融合覆盖方法

Abstract: Wireless mobile communication coverage exhibits a highly heterogeneous pattern characterized by over-coverage in densely populated regions, insufficient coverage in low-altitude airspace, and near-zero coverage in remote wide areas. Conventional cellular networks are increasingly inadequate to support the emerging demands for ultra-dense, three-dimensional, and wide-area coverage. This paper focuses on overcoming the inherent limitations of traditional two-dimensional cellular coverage. It investigates key technological pathways, including the evolution from signal-oriented coverage to capacity-oriented coverage, from two-dimensional coverage to three-dimensional coverage, and from fixed coverage to wide-area ubiquitous coverage. Furthermore, we explore the fundamental principles and enabling technologies, including interference management in dense wireless mobile networks, three-dimensional coverage structures based on multiple-prism architectures, and wide-area coverage enabled by the combination of mobile core networks and satellite systems. The wireless coverage architecture for wide 3D dense wireless mobile communication systems is established. Finally, future research directions to enhance the capability of the coverage architecture are discussed.

Keywords: wireless coverage; interference management in dense networks; three-dimensional coverage structure; integrated coverage scheme

引用格式: 李建东, 盛敏, 刘俊宇. 突破无线移动通信蜂窝覆盖局限的路径探讨 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 50-55. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602008

Citation: Li J D, Sheng M, Liu J Y. Exploring pathways to break through wireless mobile cellular network coverage limitations [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 50-55. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602008

党的十八届五中全会提出, 实施网络强国战略和国家大数据战略, 拓展网络经济空间, 促进互联网和经济社会融合发展^[1]。无线覆盖是构筑网络空间的基石, 决定了网络经济的发展速度、辐射范围与影响程度。我们需要保证国家利益在哪里, 无线覆盖就到哪里。伴随着第6代移动通

信、人工智能、智能体互联网等战略基础设施的兴起, 20世纪由美国贝尔实验室提出并沿用至今的蜂窝覆盖体系, 已不再满足密集化、立体化、广域化的信息大动脉建设需求。为此, 本文围绕如何突破传统平面蜂窝覆盖展开探讨, 破解现有网络空间“过覆盖”“欠覆盖”“无覆盖”并存的难题。

1 移动通信无线覆盖的现状与需求分析

移动通信无线覆盖网络整体呈现出鲜明的非均衡格局, 具体表现为: 人口聚集区网络重叠部署过覆盖、低空立体空

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB2902300); 国家自然科学基金项目 (62121001); 陕西省重点研发计划项目 (2024CY2-GJHX-82)

域大范围欠覆盖以及远域远海等偏远区域无覆盖。本节将从地理地貌、经济发展、产业布局等多个角度对该非均衡的格局展开分析,分析改变这一格局的关键需求,为突破传统蜂窝覆盖的局限,构建广域、立体、密集的空天地一体化覆盖体系奠定基础。

1) 蜂窝基站密集部署区域,信号重叠过覆盖

在经济发达的人口聚集区(如中国胡焕庸线东南侧),通信基站部署密集,信号重叠过覆盖特征明显。这些地区以平原、沿海平缓地貌为主,地势开阔,无大面积荒漠与山地阻隔,蜂窝基站选址、部署与管线铺设难度低,为高密度蜂窝覆盖创造了基础条件。特别是发达的智慧大都市、大型交通枢纽、奥运会/全运会场馆、网红热门旅游景点,蜂窝基站高度密集部署,密度达每平方公里数百甚至到数千个。重叠覆盖引发严重的同频干扰,造成资源冗余^[2]。实测数据表明,此类超密集部署区域的用户信干噪比显著恶化,小区平均吞吐量下降40%~60%,有效覆盖性能下降50%以上,“有信号、无服务”的过覆盖问题突出。

2) 低空空域覆盖基础薄弱,立体空间欠覆盖

随着低空物流、无人机巡检、低空安防等新兴产业的快速发展,低空通信需求持续增长。传统地面蜂窝基站以下倾波束对地覆盖为主,信号能量集中于地表区域,垂直覆盖能力有限;受基站天线旁瓣辐射、地面反射与多径效应等因素的影响,立体空间信号杂乱,有效接收功率随高度增加迅速衰减,难以形成连续、可靠的垂直覆盖。实验结果表明,300 m以上中低空区域的网络覆盖率不足40%^[3]。低空覆盖能力的不足将直接导致飞行器通信中断与定位精度下降,引发偏航失控、航路冲突等安全隐患,这对低空空域覆盖的连续性与可靠性提出了远高于地面网络的要求。

3) 远域远海覆盖边界受限,移动通信无覆盖

在中国胡焕庸线西北侧的塔里木盆地、柴达木盆地,以及渤海湾海上油气等开发区域,受地面蜂窝基站覆盖距离的限制,仅能实现距公网50 km以内的近域、近岸、近海及浅滩区域的有效覆盖。离现网百公里或数百公里以外的中远海、深海远域脱离公网覆盖范围,难以满足油气勘探开发、安全生产及远洋航行的业务需求^[4]。远域远海的移动通信无覆盖已经成为制约中国油气等战略资源开发、海洋经济发展与海上安全保障的瓶颈。

针对上述无线移动通信覆盖中的过覆盖、欠覆盖以及无覆盖现状,本文以构建密集、立体、广域无线移动通信覆盖体系为目标,聚焦以下3个关键路径,以突破传统地面二维蜂窝覆盖的局限。

1) 构建弹性资源小区,消除密集重叠覆盖干扰

针对基站密集、信号重叠覆盖、资源利用率低的问题,深入分析密集覆盖场景的电波传播模型,挖掘重叠覆盖干扰与基站部署密度之间的关系,设计网络化重叠覆盖干扰协同管控技术。构建弹性资源小区(在该区域内可对干扰进行操控和抵消),消除冗余覆盖干扰,提升网络密集区域内的系统速率(单位面积传输速率),化解过覆盖带来的干扰大、成本高、资源浪费等痛点,为密集覆盖区域内每个用户提供极速通信体验。

2) 建立多棱柱立体覆盖结构,实现低空空洞覆盖

针对当前中低空信号覆盖率不足、垂直信号弱、空地链路高动态特性导致的服务不稳定问题,需构造低重叠、无空洞的最优多棱柱立体覆盖结构。以地面非规则部署的蜂窝基站为基础,进行基站簇化分割,形成适配多场景的多层协同覆盖模式,逼近立体覆盖的最优系统容量,从而实现千米级以下空域的无空洞、连续稳定覆盖。

3) 打破蜂窝固定覆盖边界,构建远程按需移动覆盖

针对远域远海无蜂窝覆盖的难题,要突破弱信号增强关键技术,扩展公用移动通信网的覆盖边界。同时利用现有卫星系统的广域覆盖特性,研制可移动的融合基站,构建伴随式移动通信网络,实现网络随身行,从而攻克远域远海无移动通信覆盖的难题,实现远域、远海的连续高速无线覆盖,建成覆盖战略资源区的信息大动脉。

下文将围绕从信号覆盖到容量覆盖、从平面覆盖到立体覆盖、从固定覆盖到广域按需覆盖这三大关键路径,梳理实现这些转变的基本原理与关键技术,阐述各类典型应用场景并归纳未来研究方向与挑战。

2 从信号覆盖到容量覆盖

早期移动通信网络的建设以消除覆盖盲区为核心目标,面向低密度用户和低速率业务场景,解决信号“从无到有”的问题,遵循“广覆盖、低承载、稳接入”的思路,保障语音通话、短信、低速网页浏览等基础通信需求。通常采用蜂窝组网架构,该架构下蜂窝小区边界固定,以宏基站为主、少量微基站为辅进行部署,实现大面积信号铺展。

随着智慧城市、工业物联网、车联网等场景的兴起,传统信号覆盖已难以满足通信需求,网络建设理念由信号覆盖向容量覆盖转变。容量覆盖在保证连续覆盖的基础上,以提升网络容量、传输速率及并发接入能力为核心。为此,网络密集化成为实现容量覆盖的关键手段,旨在通过大量部署蜂窝基站以提升资源的空域复用能力,进而提升系统容量。然而,在密集化过程中,蜂窝基站与用户之间的链路由“远距离/非视距传播”向“近距离/视距传播”转变。与此同时,

干扰信号呈现弱差异性和强相关性,致使干扰增长速度快于有用信号,引发干扰翘变现象^[5],如图1(a)所示。该现象会导致系统速率塌陷,即当基站密度持续增加并超过临界基站密度时,系统速率不会增加,反而快速下降,如图1(b)所示。

为解决系统速率塌陷问题,需突破传统固定蜂窝小区的局限(如图2所示),利用网络化的干扰管控方法,以用户为中心搭建弹性资源小区覆盖结构。该结构通过整合基站资源形成统一资源池和干扰操控空间,并根据业务分布动态调整小区形态:在高负载区域分裂小区以提升频谱利用率,在低负载区域合并小区以减少干扰与资源浪费。同时,资源小区支持无缝切换,用户移动过程中无需频繁更换小区接入,实现“网随人至”的弹性覆盖^[6]。

基于资源小区结构,可采用基于“先激活后关联”的具体干扰管控方案。该方案首先根据用户分布与基站负载水平,对空载、低负载基站进行休眠,仅按需激活必要的基站

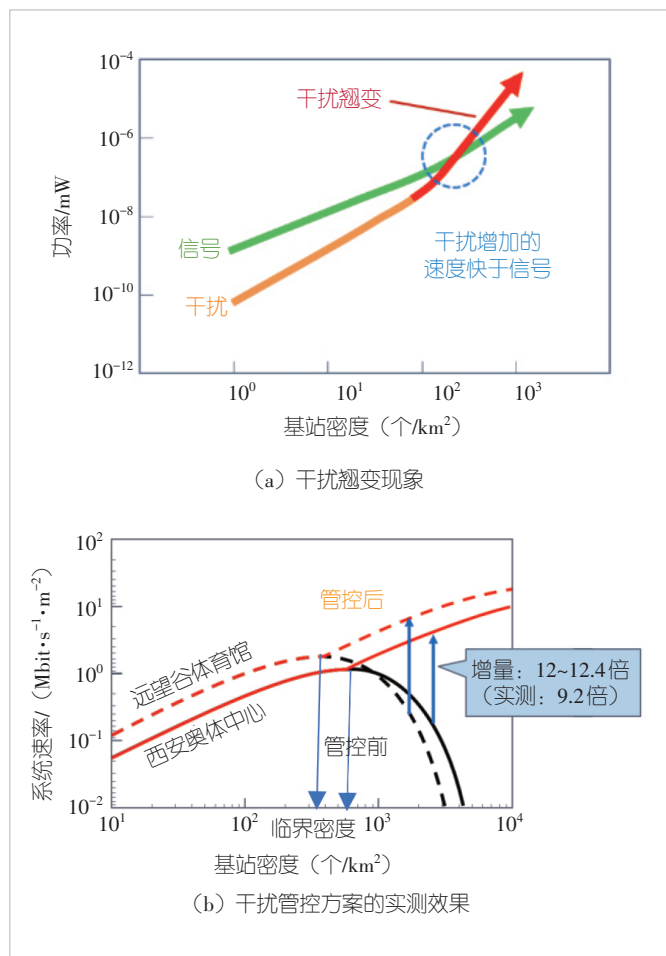


图1 密集网络中的干扰翘变现象与干扰管控效果

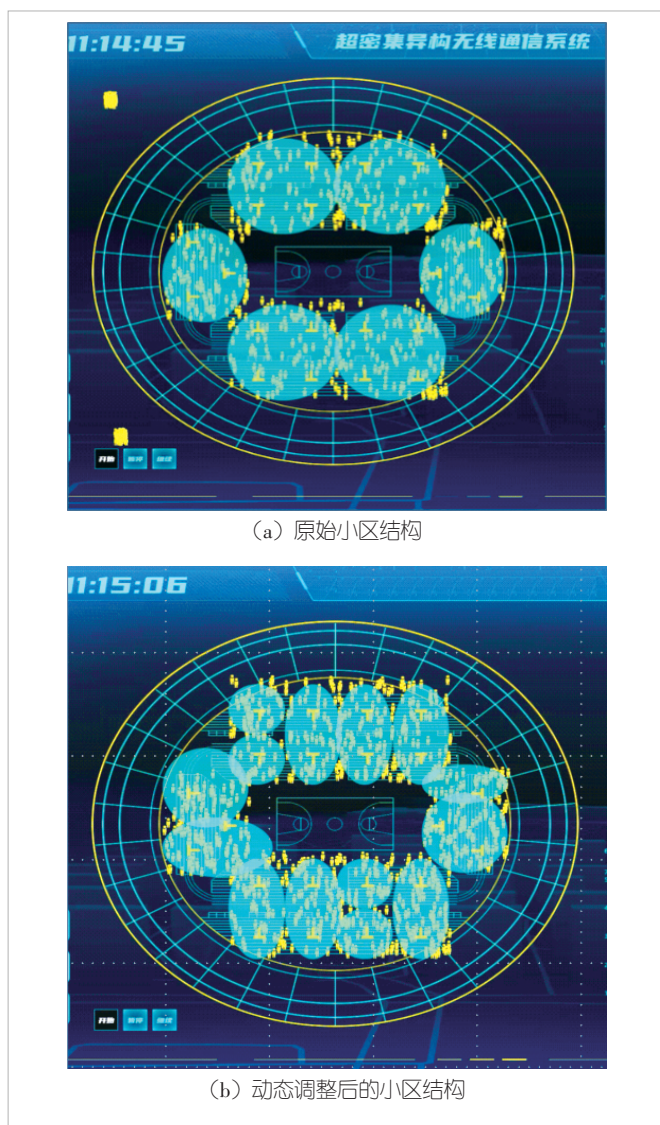


图2 弹性资源小区覆盖结构

节点,从源头减少干扰源数量,并利用干扰对齐/转移/中和等干扰操控技术,降低重叠覆盖带来的同频干扰。进一步地,对于已激活的基站,可根据基站与用户之间的信道质量与干扰水平,为用户关联干扰水平最低的基站,使有用信号强度增加的速度快于干扰信号,保障系统速率持续提升。该方案在西安奥体中心与西安远望谷内得到验证。实测结果表明,系统速率可提升9.2倍,如图1(b)所示。

3 从平面覆盖到立体覆盖

随着低空经济的快速发展,无人机巡检、低空物流等低空业务规模化应用,1 000 m以下低空空域已成为新的通信主战场,无线移动通信网络必须从地面二维平面覆盖向空地一体三维立体覆盖演进。传统蜂窝平面覆盖架构面向空域延

伸存在明显短板：1) 垂直覆盖能力薄弱：传统基站天线垂直波束宽度窄、下倾角固定，难以有效指向高空，导致中高空域信号快速衰减，形成大范围覆盖空洞；2) 覆盖结构不匹配空域特性：地面六边形蜂窝向空域延伸后，波束间重叠急剧增加、干扰难以控制，造成频谱效率大幅下降；3) 无法支撑空中高速移动：空中用户移动速度快、跨区频繁，链路连续性差，无法满足低空业务稳定通信需求。由此可见，面向低空新场景，传统平面覆盖模式已无法满足需求，亟需构建适配三维空间的立体覆盖结构^[7]。

立体覆盖结构的设计理念是在保持地面蜂窝网络基本架构不变的前提下，将二维平面覆盖单元沿垂直方向扩展，形成可填充的三维多棱柱立体覆盖结构。在保证空地连续覆盖的同时，最小化空域信号重叠率，从而实现无空洞、低干扰的立体覆盖。该结构可由平面结构延伸得到三棱柱、四棱柱、六棱柱等多种多棱柱覆盖结构。分析结果表明：四棱柱与六棱柱结构在空域内波束交叉重叠区域大，邻区干扰严重；而三棱柱结构在相同覆盖条件下，空间重叠率最小，波束关系清晰，干扰水平可控^[8]。因此，三棱柱是实现地对空立体覆盖的最优基本结构，能够在实现无缝三维覆盖的同

时，最大限度地降低重叠干扰，提升空域通信容量与稳定性，如图3所示。

为实现三棱柱覆盖单元内的无空洞、低重叠覆盖，可采用分层波束填充方法，如图4所示。该方法依据天线倾角正切切分规则，将三棱柱沿高度划分为低、中、高三层。地面3个基站的扇区波束分别指向3个高度层，形成分层覆盖填充模式。通过联合优化天线倾角、水平/垂直波束的宽度/高度以及发射功率，使三层波束在满足接收信号强度门限的前提下，填满整个三棱柱空间，最大限度减少层间重叠与邻区干扰。该方法可充分复用现有基站与天线资源，在不改变地面覆盖质量的前提下，实现1 000 m以下低空空域全覆盖，实测覆盖率达99%以上，为低空通信提供稳定可靠的通信保障。

4 从固定覆盖到广域按需覆盖

随着油气等战略资源的开发和利用、应急救援与海洋经济的快速发展，无线移动通信覆盖需要向人烟稀少的盆地、边远山区、沙漠、远域远海的广域空间演进。它要突破地面固定覆盖部署的限制，攻克系统干扰情况下的弱信号增强技

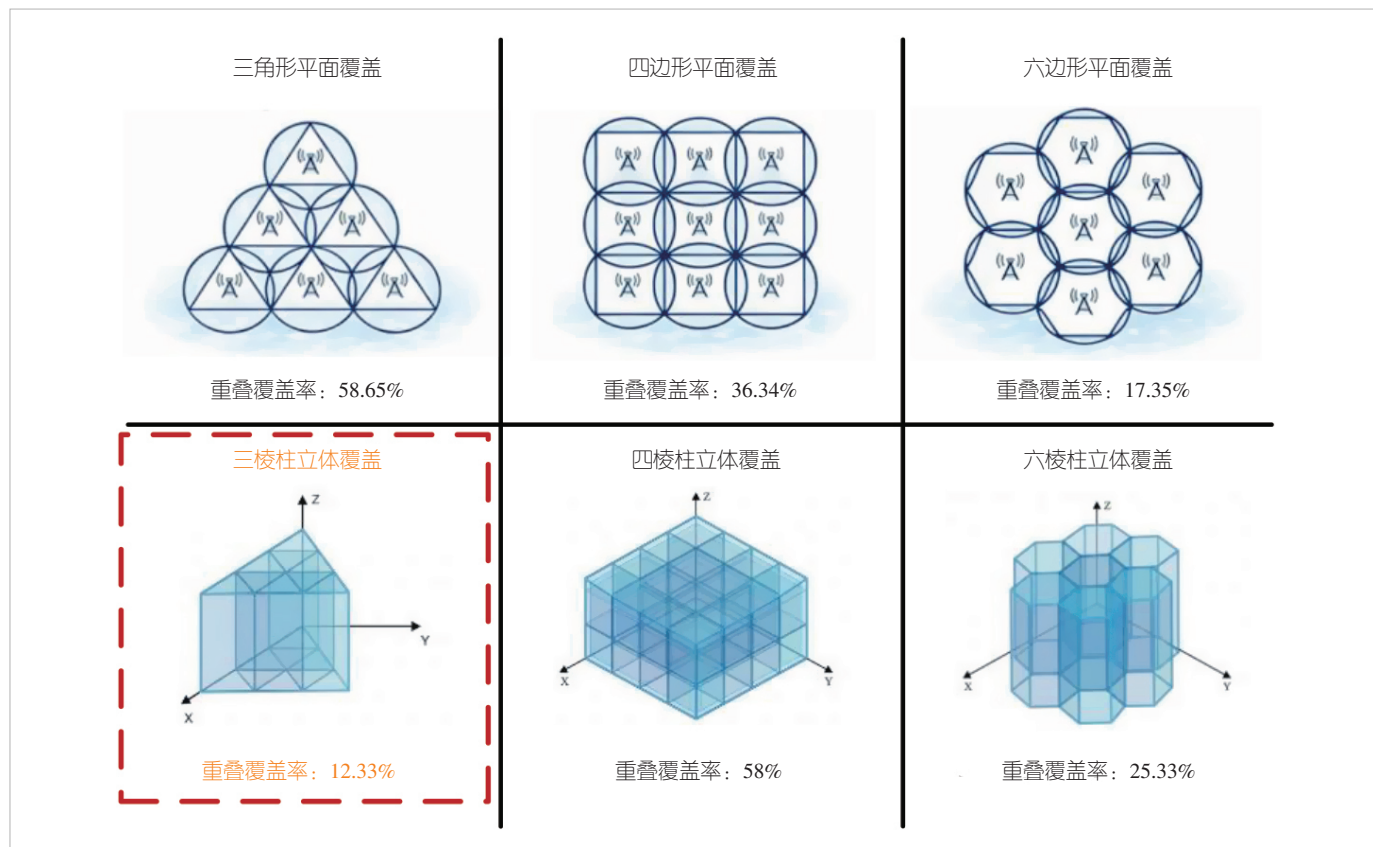


图3 平面覆盖结构与立体多棱柱覆盖结构

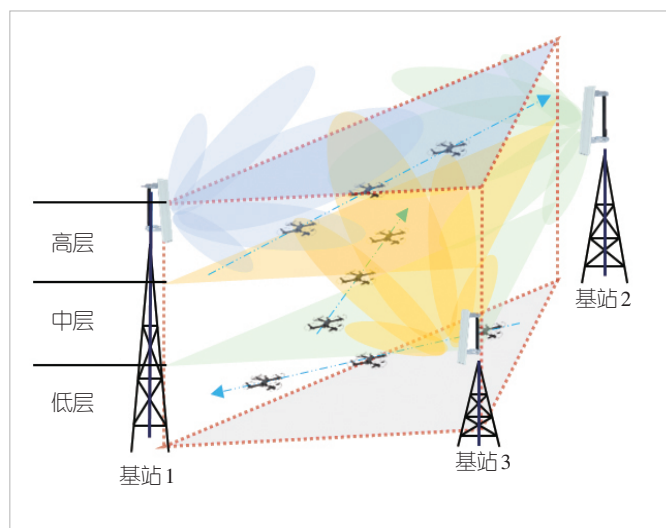


图4 三棱柱立体分层覆盖方法

术，延长公用移动通信覆盖距离，以扩展公用移动通信网的覆盖边界。同时利用现有卫星系统的广域覆盖特性，构建可移动融合基站，通过地面移动网络和卫星系统的并发传输，快速搭建高速伴随式的移动通信网络，实现“网络随身行”，解决广域按需覆盖的难题，消除生产区域的覆盖盲区，形成满足行业需求的信息大动脉^[9-10]。

按需覆盖是经济、高效地解决广域内重点/热点区域无线移动通信覆盖的方法。它要解决如下3方面的问题：1) 重点区域到公用基站的弱信号传输。重点区域（如油气田的钻井勘测点）到公网基站平均距离在百千米量级，参考信号接收功率低于门限接收电平，从而成为移动通信盲区。需采用微弱信号伴随式接力增强技术来扩展伴随式基站的回传距离。2) 多模式接续覆盖和多路并传覆盖。融合基站应当能够自动感知业务需求和传输环境，综合利用地面接续、卫星接续以及星地协同接续等覆盖模式，自动切换工作模式，确保复杂场景下信息全天候可靠回传。3) 快速部署和按需自组织覆盖。为了满足野外作业、应急部署的需求，融合基站应能够满足分钟级快速部署要求，且能够根据环境按需自组织入网，独立或联合构建满足业务需求的稳定移动通信覆盖网络。

按需覆盖的典型场景如图5所示。其中，图5(a)为油气田钻井勘探平台独立覆盖场景，图5(b)为多融合基站在应急救援区联合构建稳定覆盖。该技术可低成本、快速解决多行业、多地广域按需覆盖的需求。

5 无线移动通信覆盖的未来研究方向

面向下一代空天地海一体化通信愿景，未来移动通信系

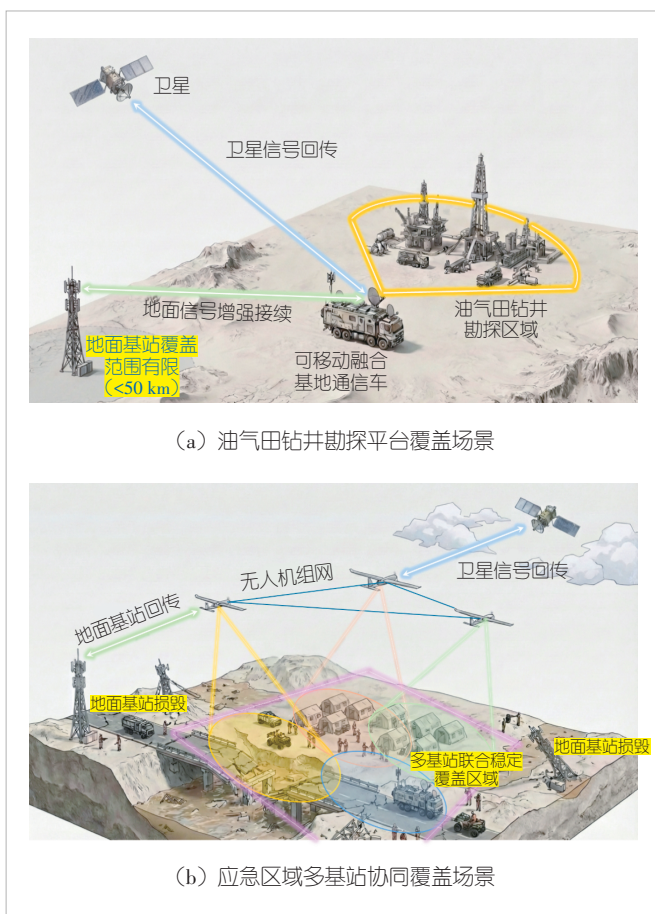


图5 按需覆盖的典型场景

统在无线广域立体密集覆盖体系上，围绕绿色低碳、智能原生、安全可控三大核心方向深度演进，强化高效能、自治化、内生安全等能力，从而进一步丰富广域立体密集无线移动通信覆盖体系。

1) 绿色低碳覆盖：可持续将成为未来全域无线覆盖的核心发展主线。以全生命周期能耗最低为目标，针对密集组网、立体延展、卫星广覆盖带来的高能耗问题，探索可再生能源供应、跨制式网络协同节能、覆盖与容量联合优化，实现全场景低碳高效运行，推动网络从性能优先向超低能耗优先转型。

2) 智能原生覆盖^[10]：随着大模型、智能体等AI技术的深度渗透，将智能原生嵌入网络覆盖规划、部署、优化与运维全流程。构建感知、决策、执行、反馈的闭环智能覆盖管控机制，使移动通信网络具备自组织、自修复、自演进能力，从而支撑覆盖结构、接入能力与业务分布更加精准匹配。

3) 安全可控覆盖：面向全域泛在连接，构建高可靠、抗干扰的内生安全体系。针对卫星链路、地空接入、远域远

海覆盖等场景存在的安全风险，重点研究空天地海一体化抗干扰安全传输、异常行为检测与入侵防御，保障低空通航、远域生产、远洋作业、边境安防等场景的通信安全。

6 结束语

本文以突破传统平面蜂窝覆盖为主题，分析了当前无线移动通信网络过覆盖、欠覆盖、无覆盖并存的深层成因，明确了：1) 构建弹性资源小区，消除密集重叠覆盖干扰；2) 建立多棱柱立体覆盖结构，实现低空无空洞覆盖；3) 打破蜂窝固定覆盖边界，构建远程按需移动覆盖的三大核心任务。围绕该任务，阐述了从信号覆盖到容量覆盖、从平面覆盖到立体覆盖、从固定覆盖到广域按需伴随覆盖的三大变革路径，形成了突破传统蜂窝覆盖的系统性理论框架与技术体系，建立了广域立体密集无线移动通信覆盖体系。最后，明确了绿色低碳、智能原生、安全可控将成为广域立体密集无线覆盖体系演进的新特征，为未来无线移动通信覆盖提供了重要参考。

参考文献

- [1] 习近平. 不断做强做优做大我国数字经济 [J]. 求是, 2022(2): 4-15
- [2] 中国联通智能城市研究院. 智慧城市统一运营白皮书 [R]. 2023
- [3] 中国信息通信研究院. 低空智联网发展研究报告 [R]. 2024
- [4] 紫金山实验室, 北京邮电大学. 卫星互联网承载网技术白皮书 [R]. 2025
- [5] Liu J Y, Sheng M, Li J D. Improving network capacity scaling law in ultra-dense small cell networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2018, 17(9): 6218-6230. DOI: 10.1109/TWC.2018.2856766
- [6] 尤肖虎, 王东明, 曹阳. 6G 无蜂窝大规模 MIMO 关键技术研究进展 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(1): 29-37. DOI: 10.12142/ZTETJ.202601006
- [7] Huang Y H, Ding H Y, Cao L, et al. A new interference-resilient scalable networking for low altitude [J]. Science China information sciences, 2026, 69(3): 132305. DOI: 10.1007/s11432-025-4684-x
- [8] 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
- [9] Sheng M, Zhou D, Bai W G, et al. 6G service coverage with mega satellite constellations [J]. China communications, 2022, 19(1):

64-76. DOI: 10.23919/JCC.2022.01.006

- [10] Liu J J, Shi Y P, Fadlullah Z M, et al. Space-air-ground integrated network: a survey [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2018, 20(4): 2714-2741. DOI: 10.1109/COMST.2018.2841996

作者简介



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, 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, 中国电子学会会士, 中国通信学会会士, IEEE Fellow; 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。



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, 中国通信学会会士, IEEE Fellow, 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 Transactions on 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 4 项。



刘俊宇, 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。

50G-PON 技术与应用



Technologies and Applications of 50G-PON

张宏熙/Zhang Hongxi, 孙砚峰/Sun Yanfeng,
傅华明/Fu Huaming

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

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602009

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20260430.1011.002>

网络出版日期: 2026-04-30

收稿日期: 2026-01-25

摘要: 结合技术标准与产品研发实践, 分析了 50G-PON 的物理层、低时延等关键技术。针对现网部署需求, 探讨了从 10G-PON 向 50G-PON 平滑演进中的时分复用技术与兼容性升级方案。基于高带宽、低时延特性, 分析了 50G-PON 在宽带接入、无线回传、工业控制等场景中的应用。指出 50G-PON 作为第 3 代 PON 技术, 是构建“泛在万兆全光网”的关键支撑。

关键词: 50G-PON; 时分动态带宽分配; 低时延; 单帧多突发

Abstract: Based on technical standards and product development practices, key technologies of 50G-passive optical network (50G-PON), including physical layer and low latency techniques, are analyzed. Addressing the requirements of existing network deployment, time-division multiplexing and compatibility upgrade solutions for the smooth evolution from 10G-PON to 50G-PON are explored. Leveraging the high-bandwidth and low-latency characteristics, applications of 50G-PON in scenarios such as broadband access, wireless backhaul, and industrial control are discussed. As the third-generation PON technology, 50G-PON is identified as a key enabler for constructing the “ubiquitous 10-gigabit all-optical network”.

Keywords: 50G-PON; time-division-multiplexing dynamic bandwidth allocation; low latency; single frame multiple burst

引用格式: 张宏熙, 孙砚峰, 傅华明. 50G-PON 技术与应用 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 56-62. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602009

Citation: Zhang H X, Sun Y F, Fu H M. Technologies and applications of 50G-PON [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 56-62. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602009

1 无源光接入技术演进

无源光网络 (PON) 是一种基于点到多点 (P2MP) 拓扑结构的光纤接入技术。其光分配网络 (ODN) 由纯无源光器件构成, 无需供电, 具备抗电磁干扰能力强、环境适应性强、部署灵活、易于扩展等优势, 广泛应用于宽带接入网、政企专网及工业互联网等领域。

自 21 世纪初以来, PON 技术历经 3 代发展:

1) 第 1 代: 以千兆无源光网络 (GPON) 和以太网无源光网络 (EPON) 为代表, 自 2005 年起实现商用, 支持百兆级到千兆级带宽接入, 推动了“光进铜退”的网络转型。

2) 第 2 代: 以 10G 无源光网络 (XG (S) -PON) 和 10G-EPON 为主, 自 2010 年开始试商用, 现已进入大规模部署阶段, 提供 1 Gbit/s 以上带宽, 支撑 4K/8K 超高清视频、虚拟现实 (VR)/增强现实 (AR) 等高带宽业务的发展。

3) 第 3 代: 即 50G-PON, 单波长速率提升至 50 Gbit/s, 是 10G-PON 的 5 倍, 同时具备更低时延、更高安全性和更强的业务承载能力。50G-PON 已于 2025 年启动试商用,

2026 年起进入批量部署阶段。

目前, 业界已启动对第 4 代 PON 技术的预研, 200G-PON 被视为下一代光接入网络的重要演进方向。如图 1 所示, PON 技术大约每 8~10 年完成一次代际升级, 持续推动接入网向“泛在万兆”演进。

50G-PON 的标准主要有电气与电子工程师协会 (IEEE) 和国际电信联盟电信标准化部门 (ITU-T) 两大标准体系。IEEE 定义的是 $N \times 25\text{G-EPON}$ 技术, 采用双波长绑定方式实现 50 Gbit/s 传输速率; ITU-T 定义的是单波长 50G-PON。其中, ITU-T 定义的单波长 50G-PON 已被多数运营商接受, 成为 10G-PON 之后的主流方案^[1-4]。

2 50G-PON 关键技术

2.1 物理层技术

图 2 展示了 50G-PON 的物理层架构。与 10G-PON 类似, 光线路终端 (OLT) 和光网络单元 (ONU) 均配备光发射组件 (TOSA) 与光接收组件 (ROSA), 分别用于光信号的发

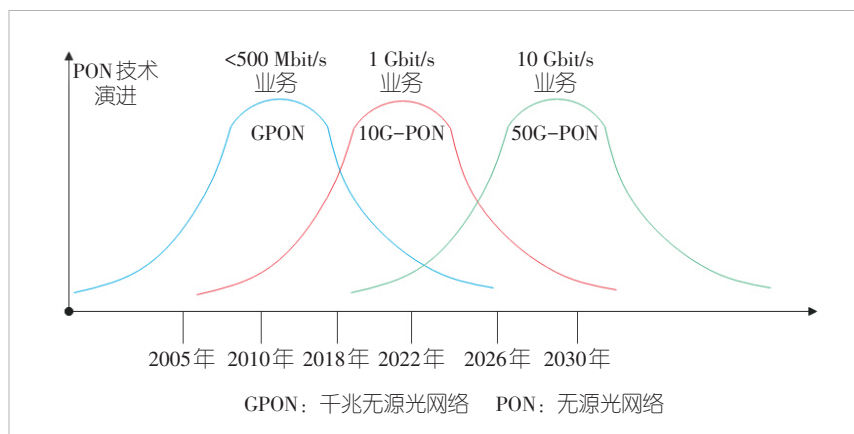


图1 PON技术演进趋势

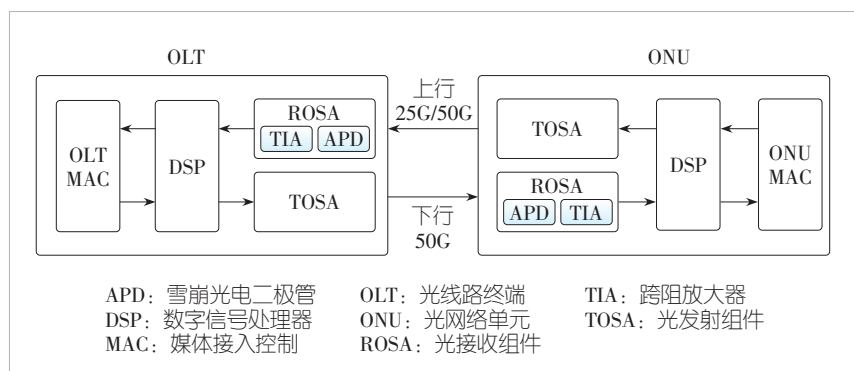


图2 OLT和ONU物理层组网

送和接收。其中，ROSA包含雪崩光电二极管（APD）和跨阻放大器（TIA），支持突发接收；TOSA需支持突发送，尤其是在上行方向。

相较于10G-PON，50G-PON的速率提升了5倍，但其链路色散容限仅为前者的1/25，导致信号失真加剧，对接收灵敏度提出了更高要求。在应用方面，50G-PON需与10G-PON的光功率预算对齐（通常为32 dB）。为此，50G-PON引入了数字信号处理（DSP）技术，其功能主要包括：1）信号均衡：补偿高速信号在光纤中传输产生的畸变；2）前向纠错（FEC）：提升误码容忍能力，保障链路可靠性。

在APD器件方面，存在两种技术路线：1）锗硅（GeSi）体系：工艺成熟，成本可控；2）铟化物（Sb-based）体系：在高增益下具有更低暗电流，理论灵敏度更优，但制造难度较大，尚未实现大规模商用。

2.2 灵活的FEC

50G-PON采用低密度奇偶校验码（LDPC），替代传统GPON/XG(S)-PON所使用的里德-所罗门（RS）码。LDPC具备更强的纠错能力，可在高误码率环境下恢复原始数据，是实现32 dB功率预算的关键支撑技术，通常集成于

DSP芯片中。

根据ITU-T G.9804.2标准，50G-PON定义了3种上行的LDPC编码模式，分别适用于不同场景，具体如表1所示。

该机制支持按ONU粒度动态调整上行FEC编码类型：1）对于链路质量好、带宽需求高的ONU，可启用高吞吐率模式以提升有效带宽；2）对于链路劣化或远距离ONU，则切换至高开销模式以增强容错能力；3）默认工作于缺省模式，兼顾性能与效率。

下行FEC通常以PON口为单位统一配置，也可结合网络负载进行灵活扩展。

2.3 低时延技术

针对上行低时延需求，50G-PON重点引入了单帧多突发（即单帧多Burst）技术。具体来说，对于时延敏感的业务，OLT在125 μs（GPON帧周期）的时间片内等间隔地为ONU进行多次带宽分配。由于每两个突发之间的间隔显著减小，时延也随之大幅降低。

PON网络由于存在动态带宽分配（DBA）调度机制，上行方向会引入较大的时延和时延抖动。为缓解该影响，传统GPON和XG(S)-PON通常采用免开窗技术（即ONU正常上线后关闭发现窗口，以避免引入时延抖动），或减小DBA调度周期。如果将调度周期减小至125 μs，时延抖动可控制在100 μs级别，这即为单帧多突发技术。由于每个业务突发都需要消耗额外的突发开销（包括前导码和保护时间，用于每个突发的信号恢复以及避免前后两个突发重叠），通常需要几百纳秒。而传统GPON或XG(S)-PON带宽有限，因此一般情况下每个125 μs的周期内只传送一次业务。

相比10G-PON，50G-PON将带宽提升了5倍，从而使单帧多突发成为可能，也为低时延业务的传送带来了更多可能性。图3展示了单帧2突发的场景，每个ONU的业务每隔

表1 LDPC算法差异

算法类型	开销占比	纠错效果	应用场景
高吞吐率	8%	较差	吞吐率要求高，线路质量较优
缺省	15.6%	较好	普通的应用场景
高开销	24%~35.3%	最好	吞吐率要求不高，线路质量较差

LDPC：低密度奇偶校验码

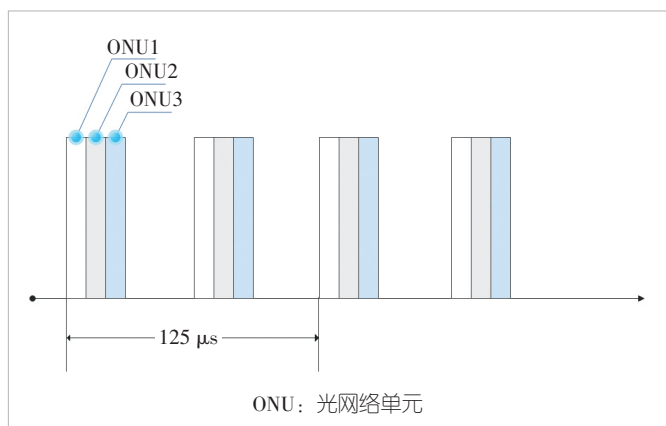


图3 单帧2突发场景

62.5 μs 传送一次，传送时延约为 62.5 μs 。根据 ITU-T G.9804.3 标准，50G-PON 的突发开销范围为 205.8~823.1 ns^[3]。假设 50G-PON 设备突发开销为 500 ns，如果采用单帧 8 突发技术，那么在 8 ONU 的情况下，64 个突发开销占用的时间片总额为 32 μs 。剩余可用于传送业务的带宽为 37 Gbit/s，扣除 FEC（按缺省 LDPC 码型）开销后，净带宽为 30 Gbit/s。因此，在该组网场景下，能够在提供 15.6 μs 时延能力的同时，传送 30 Gbit/s 的业务流量。

为更好地支持低时延需求，50G-PON 技术还引入了专用激活波长（DAW）、协同动态带宽分配（CoDBA）等技术。采用专用激活波长技术时，ONU 在专用波长上进行注册激活，业务波长不再进行注册开窗，从而减少因注册开窗带来的传输时延。CoDBA 通过 OLT 与上层业务系统（如 5G 基站）之间的协同调度，实现带宽资源的预测性分配。例如，在无线回传场景中，基站可提前通知 OLT 终端数据的到达时间，OLT 据此为 ONU 预留带宽，实现“即到即发”，大幅减少排队等待时延^[5]。

2.4 安全技术

50G-PON 继承了 10G PON 已有的安全技术，包括净荷加密、ONU 接入认证、PON 层光纤保护（Type B、Type C、Type D 保护）等。新一代 50G-PON 进一步增强了加密算法的强度：无论是净荷加密还是完整性校验，相关算法均由原有的 AES-128 升级为 AES-256，并新增支持 SM4、Camellia-128、Camellia-256 等加密算法。其中，国密算法 SM4 成为必选项^[2]。加密性能的提升有助于满足政企应用的合规性要求，同时也显著增强了设备的数据保密性与防篡改能力。

基于 PON 层的低时延控制技术与设备层面的刚性管道技术，50G-PON 网络能够提供增强的端到端业务切片功能，实现业务的硬隔离。尤其在工业与政企应用场景中，通过将生产网络与其他管理、办公网络部署于不同切片，从 OLT 到 ONU、从物理层到业务层均可实现有效隔离。这种立体纵深的防御机制不仅保障了低时延性能，还提升了网络安全性，避免了不同业务之间的相互干扰及潜在攻击。

3 基于原有 PON 网络的平滑演进

考虑到 ODN 网络建设成本高、周期长，50G-PON 必须支持与现有 GPON/XG(S)-PON/EPON 系统的共存，实现“一次部署、长期演进”。

3.1 GPON/XG(S)-PON 共存方案

从 PON 技术波长分布图（图 4）可以看出，ITU 标准为 50G-PON 上行波长规定了 3 种选项（Option）。其中，Option 1 和 Option 2 均与 GPON 或 XG(S)-PON 的波长重叠，而 Option 3（1 284~1 288 nm）位于独立波段，无重叠干扰，是实现 3 代 PON 共存的最佳选择。通过部署三模 Combo PON 板卡（集成 GPON、XG(S)-PON 和 50G-PON 功能），可在同一 PON 端口上实现 3 种技术的波分复用共存，无须更换

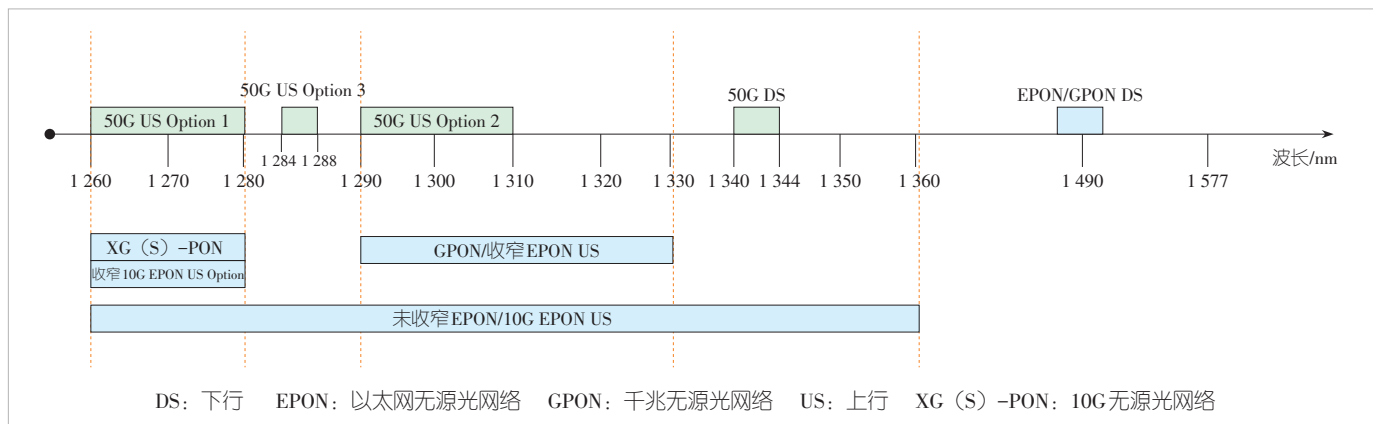


图4 PON技术波长分布

ODN, 从而平滑升级。

3.2 EPON/10G-EPON 共存方案

3.2.1 波分共存方案

与 GPON 相比, EPON 体系的演进具有特殊性。现网中 EPON ONU 有两类上行波长: 收窄后的波长 (1 290 ~1 330 nm) 和早期的宽波长 (1 260 ~1 360 nm)。对于仅有窄波长上行的 EPON 场景, 50G-PON 上行只须选用 ITU 标准中的 Option 3 波段 (1 284~1 288 nm), 各代 PON 系统的上下行波长便不会重叠。

宽波长 EPON ONU 的上行波段 (1 260 ~1 360 nm) 与 50G-PON 的所有上行可选波段及下行波段均重叠, 无法在同一 PON 端口下实现 3 代技术的波分兼容共存。其演进方案主要有两种: 一种是替换现网中的宽波长 EPON ONU。该方案技术难度较小, 但会增加投资成本, 且 50G-PON 的建设进程受限于 EPON ONU 的退网进度。在该方案下, 50G-PON 与 EPON 仍通过波分复用方式实现共存。另外一种方案则是后文提到的时分共存方案。

波分共存方案的一个难点在于, 现网中的宽波长 EPON ONU 需要进行有效检测, 否则波长干扰可能引起 50G-PON 上行或下行业务丢包。这是部署波分共存方案时需要重点考虑的问题, 但目前尚无有效的检测方法。

3.2.2 时分共存方案

实现宽波长 EPON 共存的另一方案是时分方案。该方案面临两个问题: 一是波长如何选择, 二是如何进行时分复用。

3.2.2.1 波长选择

50G-PON 的上行波长仍采用 ITU 定义的 Option 3 波段 (1 284 ~1 288 nm), 但为避免信号冲突, 需采用时分复用方式实现共存。对于下行方向, 需考虑标准定义的 1 342 nm 波长与非收窄 EPON 上行波长之间可能存在相互干扰, 可选用 1 360~1 430 nm 范围内的波长作为 50G-PON 的下行工作波长。此外, 在该波段内进行波长选择时, 还需避开早期光纤的水峰高损耗点 (约 1 383 nm 附近) 等影响因素^[6]。

3.2.2.2 时分 DBA

在波长冲突情况下进行时分复用需要依

赖时分 DBA 技术。该技术在统一调度周期的前提下, 将 50G-PON 与 EPON/10G-EPON 的带宽进行统一分配。以固定带宽为例, 如图 5 所示, 在 DBA 调度周期为 500 μ s 的情况下, ONU4 占用 1/5 的带宽。升级前, 原有的 EPON ONU 可使用 200 Mbit/s 的带宽; 升级为 50G-PON 后, 带宽扩大 50 倍, 可使用 10 Gbit/s 的物理带宽。

在每个带宽分配周期, EPON 和 50G-PON 的带宽依据相同的规则进行统一调度。在带宽分配上, 按照先分配固定带宽、再分配保证带宽、最后考虑尽力而为带宽的原则, 实现 EPON 与 50G-PON 的公平调度。这样既能保证新升级的 50G-PON 用户获得高速接入服务, 又能确保原有 EPON 用户的使用体验不受影响。

时分共存方案虽然能够解决兼容性问题, 但尚不够成熟。运营商和设备厂商正积极推动产业链发展及国际标准落地工作。2025 年, 中兴通讯与中国电信合作, 联合发布了 50G-PON 与宽波长 EPON 的共存方案。该方案采用 1 366 nm 的波长作为 50G-PON 的下行波长, 有效避免了下行波长与宽波长 EPON 上行波长的重叠问题。同时, 上行采用时分 DBA 技术, 在存在上行波长冲突的情况下, 实现了共存与演进的可能^[6]。

4 商用部署落地方案

2026 年起, 50G-PON 在各大运营商的商用部署规模将逐步扩大。在此过程中, 也存在一些关键的技术方案需要统筹考虑。

4.1 基于 10G-PON 的割接升级

无论是从 GPON/XG (S) -PON 网络升级, 还是从 EPON/10G-EPON 网络升级, 都需要采用 COMBO 技术。具体而言, 三模 Combo PON 光模块集成了 50G-PON、XG (S) -PON、

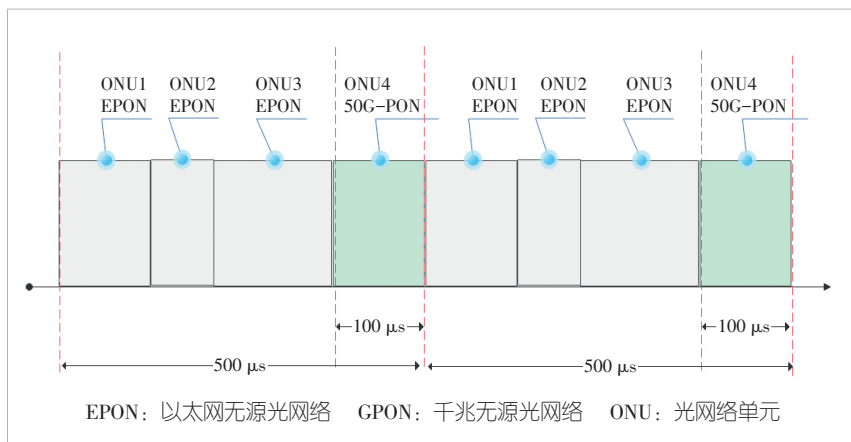


图5 时分动态带宽分配

GPON（或50G-PON、10G-EPON、EPON）的物理层功能，同时COMBO PON板卡集成了3个通道的MAC层功能。在升级过程中，ODN无须改动。升级OLT的COMBO板卡及光模块后，原有终端割接到新板卡上，业务可快速恢复；新的50G-PON ONU业务开通流程前向兼容，用户体验应与原有10G-PON无差别。

特别地，针对EPON体系向50G-PON升级的场景，存在波分和时分两种方案，分别适用于不同场景。对于存在宽波长EPON ONU的网络场景，需采用时分方案。考虑到后续宽波长EPON ONU逐步退网，而波分方案可提供更大带宽，因此需提前规划从时分方案向波分方案演进的路径。OLT侧可通过更换光模块的方式进行升级，也可采用同时支持波分和时分功能的光模块进行提前部署；而ONU侧则建议部署同时支持时分和波分两种下行波长的ONU。

4.2 管理和运维

当50G-PON与10G-PON组网时，在管理方面应考虑前向兼容，即升级后10G-PON网络的管理能力及管理接口应与原有网络对齐，而50G-PON的管理能力及管理接口也应在10G-PON的基础上先对齐，再新增50G-PON特有的部分。

在运维诊断方面，需要考虑引入数字信号处理器（DSP）后的影响。例如，均衡能力的提升增加了系统的复杂度，同时也需要考虑更多的故障引入点。此外，DSP的引入带来了一些链路质量分析的新方案，可以通过更靠近物理线路的环节对接收信号进行智能分析，以便更有效地对线路故障进行定位。

其他需要考虑的方面还包括：引入EPON时分方案后，由于带宽分配方案较为复杂，管理层面对50G-PON与10G-EPON/EPON的带宽进行统一折算，以避免带宽分配冲突。此外，在50G-PON与EPON波长重叠的情况下，对于可能存在的流氓ONU，需考虑其会对两个通道均产生影响。

5 应用场景分析

5.1 超宽带接入

50G-PON应用于家庭宽带接入场景时，主要为家庭客户提供高速上网、视频和语音服务。为满足不断增长的固网带宽需求，特别是4K/8K、AR、Cloud VR等业务（典型带宽需求为每户1~5 Gbit/s），接入网需要更大的带宽。在光纤到房间（FTTR）-H + Wi-Fi 7场景下，主从网关之间采用GPON或10G-PON组网，因此主网关上联OLT的链路采用

50G-PON是必然趋势。

园区或政企接入一般采用FTTR-B技术。对于有大容量业务接入且具备Wi-Fi 7加持的场景，50G-PON是主网关上联的首选方案。

2025年，工业和信息化部发布关于开展万兆光网试点工作的通知。截至2025年底，万兆小区和万兆园区已基于50G-PON完成部署试点。图6（a）展示了典型的FTTR-H应用场景，图6（b）展示了典型的FTTR-B应用场景。针对园区应用，主网关的接入需支持上联保护，图中跨OLT设备的Type B保护是典型的保护应用方案^[7]。

为保证低时延业务的可靠性，端到端切片是一种非常有效的技术。在如图6所示的FTTR-B场景中，生产网络对时延要求最高，而办公网和管理网对时延要求不高。将办公网、生产网和管理网分别划分到不同的业务切片中，针对时延性能要求高的生产网切片，PON层采用单帧多突发、固定带宽配置等低时延技术，转发面采用刚性管道等硬隔离技术，可以有效避免办公网和管理网对生产网的冲击，从而提升网络的安全性^[7]。

5.2 低时延应用

低时延确定性的应用主要体现在对时延及时延抖动的严格要求，例如远程医疗。为确保手术顺利完成，患者与医生之间的端到端通信时延须小于50 ms，且抖动小于200 μ s。在工业控制场景中，基本时延要求为8 ms，高生产效率和高精度控制场景下要求时延低于4 ms，而抖动需控制在10 μ s级别乃至1 μ s以下。图7展示了工业控制场景下控制端与被控端的典型组网。在PON中，时延抖动的主要瓶颈在于上行DBA所引入的抖动。对于一般应用场景，采用免开窗或专用激活波长的技术可满足200 μ s的基本抖动控制要求；若要实现100 μ s以下的抖动控制，则需引入单帧多突发机制；而欲达到微秒级或小于1 μ s的时延，还需结合时间敏感网络（TSN）及时间同步进行精确控制。

50G-PON凭借其大带宽及低于100 μ s的时延能力，能够较好地满足移动无线网络对回传网络的技术指标要求。在10G-PON时代，5G回传场景中峰值带宽为3~20 Gbit/s的需求难以得到充分满足；而50G-PON基本不存在带宽压力。此外，在5G回传场景中，还可应用CoDBA技术，在PON网络与5G系统之间实现协同调度，从而有效降低传送时延。

2022年9月，中兴通讯在发布50G-PON样机期间，与中国移动合作，在现网完成了基于50G-PON承载5G小基站回传的外场试点，验证了其支持高带宽、低时延业务的能力。

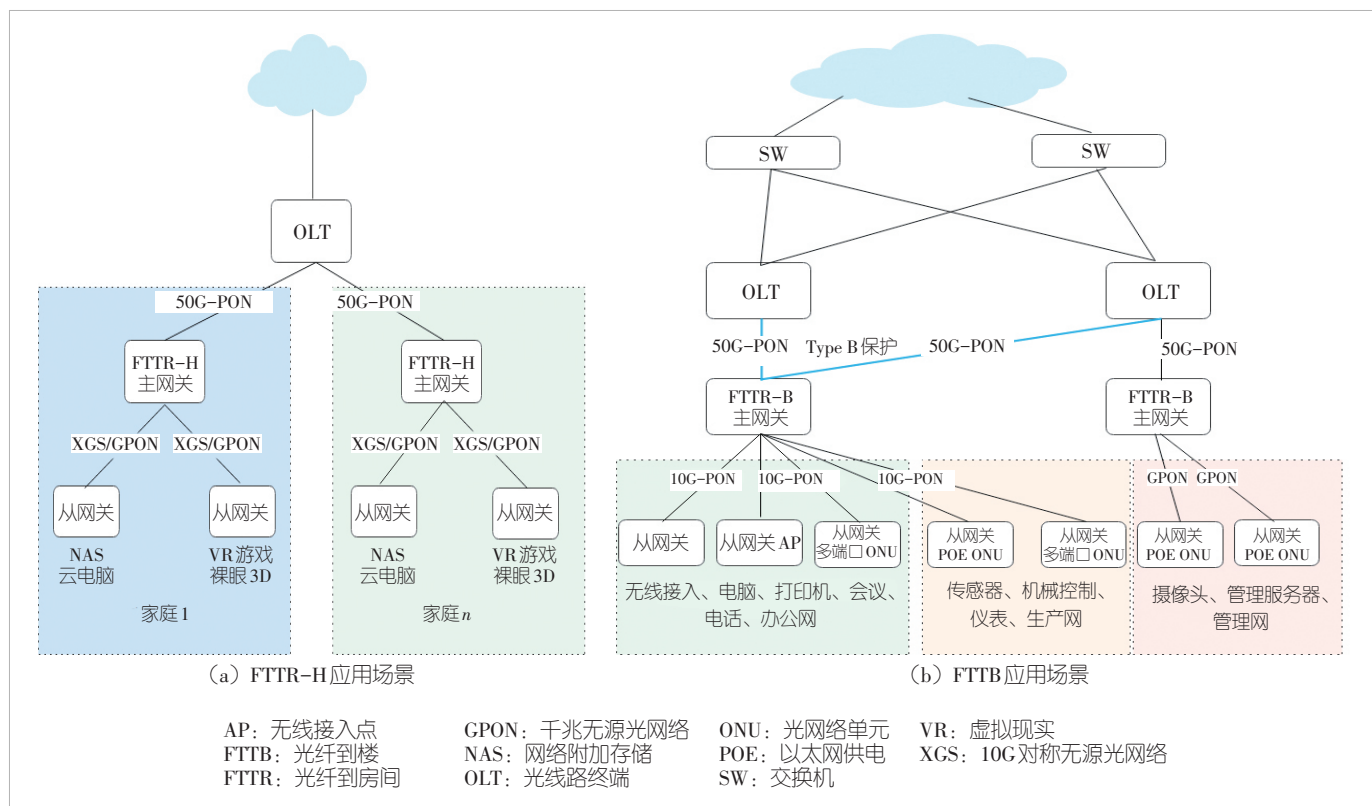


图6 FTTR-H及FTTB的应用场景

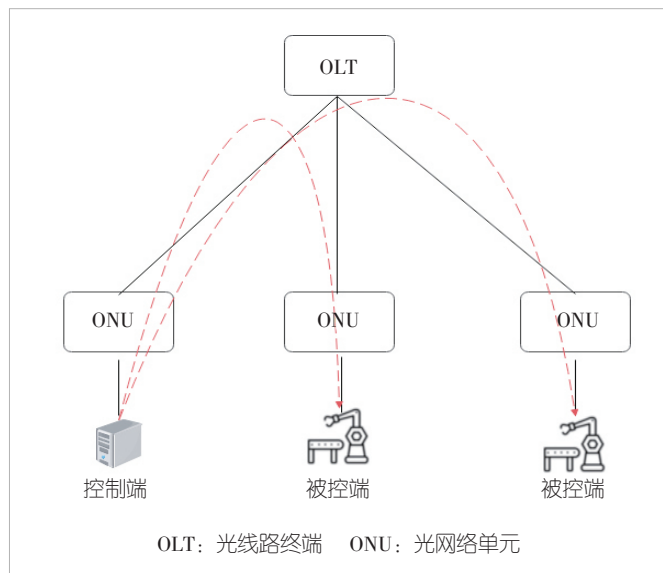


图7 工业控制应用场景

5.3 车载应用

随着智能驾驶技术的发展,汽车通信架构正由分布式计算向集中式演进。与此同时,车载传感器的带宽需求不断提升,数量成倍增长。传统的铜介质车载通信系统已难以满足汽车智能化发展的需求。相较于铜传输,光纤传输通信具有

带宽高、传输时延低、抗干扰能力强等优势,使得基于光纤介质的车载通信网络成为发展趋势。在此背景下,PON技术有望成为车载光通信的关键技术之一。其中,50G-PON凭借其高带宽与确定性低时延特性,未来将成为车载PON应用的主要技术方向。

5.4 智能化算力网络的接入底座

随着AI大模型、工业4.0等应用的爆发,全球算力需求正以年均30%以上的速度增长。中国信息通信研究院在《算力时代全光网架构研究报告(2024年)》中明确指出,算力网络需具备“大带宽、安全高可靠、确定性低时延、智能服务化”四大核心能力。在此背景下,50G-PON作为下一代万兆光接入技术,正成为连接用户与云端算力的“最后一公里”关键基础设施,推动算力服务从中心向边缘、从云端向终端全面渗透^[8]。

典型应用场景之一是AI算力服务下沉至OLT。借助50G-PON的大带宽与低时延特性,ONU上的智能应用可快速获取AI算力服务;同时,OLT侧的算力卡与ONU侧的算力主机共同构建高效的算力网络,使50G-PON技术真正成为高效算力网络的接入底座。值得注意的是,基于该50G-PON算力网络,PON网络自身还可获得AI流量感知、AI运

维助手等能力，从而进一步提升50G-PON光接入网服务的稳定性和可靠性^[9]。

6 结束语

50G-PON作为第3代PON技术，凭借单波50 Gbit/s的高速率、微秒级低时延特性以及良好的平滑演进能力，正成为构建“泛在万兆全光网”的关键支撑技术。该技术不仅能够满足超高清视频、云游戏、VR/AR等消费升级场景对带宽的需求，还可深度赋能工业互联网、远程医疗、智能驾驶、算力网络等新型生产性场景，推动光通信从“连接万物”向“智能服务”演进。随着2026年的规模部署，50G-PON将为数字中国与智能化社会构筑坚实可靠的光接入底座。

参考文献

- [1] ITU G. 9804.1 Amendment 3 Higher speed passive optical networks-requirements [S]
- [2] ITU G. 9804.2 Amendment 3 Higher speed passive optical networks-common transmission convergence layer specification [S]
- [3] ITU G.9804.3 Amendment 3. 50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): physical media dependent (PMD) layer specification [S]
- [4] 黄新刚, 杨波. 50G-PON 标准进展及关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(3): 72-80. DOI: 10.12142/ZTETJ.202403012
- [5] 张伟良, 黄新刚, 马壮. 基于专用激活波长的低时延50G-PON原理与实现 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(4): 58-62. DOI: 10.12142/ZTETJ.202204012
- [6] 杨波, 张德智, 刘波. 50G-PON平滑演进的挑战和方案研究 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(6): 20-28. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506004
- [7] 中兴通讯. 50G-PON 技术白皮书 V2.0 [R]. 2023

- [8] 张平化, 王会涛, 付志明. 数据中心光模块技术及演进 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(1): 89-98. DOI: 10.12142/ZTETJ.202401015
- [9] 张伟良, 王霄雨, 黄新刚. 基于动态通道绑定的更高速无源光网络 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(2): 100-106. DOI: 10.12142/ZTETJ.202402014

作者简介



张宏熙，中兴通讯股份有限公司光接入产品技术总工；主要负责PON领域的技术研究和产品竞争力提升工作；发表论文2篇，获授权专利20余项。



孙砚峰，中兴通讯股份有限公司光接入局端产品经理；长期从事光接入产品的研发工作；所负责的PON OLT产品技术创新成果显著，曾获国家科学技术进步奖二等奖。



傅华明，中兴通讯股份有限公司有线研究院FM研发中心副主任；长期从事光通信领域的大容量系统设备的研发与产品创新，带领团队在多个重大专项中实现关键技术突破，推动产品竞争力持续提升；获得多项专利授权。



可重构智能表面辅助的通感一体化系统波束成形设计综述

A Review on Beamforming Design for Reconfigurable Intelligent Surface-Aided Integrated Sensing and Communication Systems

廖勇/Liao Yong, 韦东卫/Wei Dongwei

(重庆大学, 中国 重庆 400044)

(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602010

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20241111.1644.002>

网络出版日期: 2024-11-12

收稿日期: 2024-09-25

摘要: 可重构智能表面 (RIS) 技术在通感一体化 (ISAC) 系统设计中具有重构无线信号传输环境和信号波形调控等优势。针对 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形的最新研究成果进行系统综述, 从无源 RIS、有源 RIS、混合 RIS 3 个方面, 归纳分析现有波束成形设计的典型优化算法及应用效果, 同时分析 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形设计面临的技术挑战。最后从智能化波束成形、安全隐私优化、能量效率优化、近场传播波束成形设计 4 个方面, 对该领域的未来研究趋势进行展望, 为相关后续优化设计提供参考。

关键词: 可重构智能表面; 通感一体化; 波束成形; 反射相移; 权衡优化; 6G

Abstract: Reconfigurable intelligent surface (RIS) technology offers distinct advantages in the design of integrated sensing and communication (ISAC) systems, such as reshaping the wireless signal propagation environment and regulating signal waveforms. This paper systematically reviews the latest research advances in beamforming design for RIS-assisted ISAC systems. Typical optimization algorithms and corresponding application performance of existing beamforming schemes are summarized and analyzed from three perspectives: passive RIS, active RIS, and hybrid RIS. Meanwhile, the technical challenges confronted in beamforming design for RIS-assisted ISAC systems are dissected. Finally, future research trends in this field are prospected from four aspects: intelligent beamforming, security and privacy optimization, energy efficiency optimization, and near-field propagation beamforming design, so as to provide references for relevant subsequent optimization design.

Keywords: reconfigurable intelligent surface; integrated sensing and communications; beamforming design; reflection phase shift; trade-off optimization; 6G

引用格式: 廖勇, 韦东卫. 可重构智能表面辅助的通感一体化系统波束成形设计综述 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 63-72. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602010

Citation: Liao Y, Wei D W. A review on beamforming design for reconfigurable intelligent surface-aided integrated sensing and communication systems [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 63-72. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602010

随着经济社会的不断发展, 为了满足新的业务需求, 6G 移动通信技术应运而生。6G 具备太比特每秒级吞吐量和亚毫秒级延迟的优势, 在远程医疗、无人机、无人驾驶等应用场景中能发挥更大的作用^[1-3]。

通感一体化 (ISAC) 被认为是 6G 的关键候选技术之一。过去雷达传感和无线通信独立发展^[4]。虽然雷达传感和无线通信对信号处理的方式有所区别, 但是随着毫米波和太赫兹

通信技术在下一代蜂窝网络中的应用^[5], 无线通信系统频段将与雷达系统频段重叠, 并且两者都朝着天线阵列规模化和设备小型化方向发展^[6], 通信与感知将集成在一个系统中。这样可以减小设备尺寸, 解决收发机拥堵问题^[7]。ISAC 具有更低的部署成本、更广的感知范围, 可以同时提供通信和定位服务, 在智慧低空、智慧交通、智慧生活等场景中有广泛的应用前景^[8-10]。

可重构智能表面 (RIS) 是 6G 中的一项关键技术。毫米波和太赫兹是未来 6G 的备选频段, 但高频信号仍面临路径

基金项目: 重庆市自然科学基金项目 (CSTB2023NSCQ-MSX0025)

损耗高、盲区大、设备维护成本高等问题。RIS可以智能地重构无线传播环境,构建非视距链路,规避障碍物带来的穿透损耗,提高网络容量,扩大覆盖范围,减少盲区并降低系统维护成本^[11-13]。RIS可分为无源RIS和有源RIS,其上部署的反射元件(RE)能够通过可调的反射系数对入射射频信号进行反射。两种RIS的主要区别在于:有源RIS上部署了大量有源RE,能够将入射信号放大后反射^[14]。混合RIS同时部署了无源RE和有源RE,其对系统性能的提升效果会随无源与有源RE的数量及比例不同而存在差异。目前,学界中已经有大量研究证实,RIS能够被有效应用于无线通信领域,并且展现出显著优势^[15-19]。与此同时,移动通信运营商和设备厂商也纷纷投入到RIS的研发中,通过仿真验证与原型系统实验,进一步证明了RIS在提高覆盖率、网络容量和通信服务质量(QoS)等方面的优势^[20-21]。

同时,RIS在ISAC领域中也发挥着巨大作用。部署RIS能够提高ISAC系统的通信和感知性能。RIS通过非视距环境中建立虚拟视距路径提高雷达对被遮挡目标的探测性能,并且有源RIS还能有效补偿路径损耗,提高信干噪比(SINR),进而提高目标检测精度^[22-24]。文献[25]通过仿真分析,证明了在双功能雷达通信系统(DFRC)中部署RIS,能够提高回波信号的信噪比,降低杂波干扰。目前,针对RIS辅助ISAC系统设计的研究日益增多^[26-27],Marco等^[28]对RIS进行了全面介绍,但该综述对RIS在ISAC系统中的应用分析略显不足,并未深入探讨RIS在此类应用中的具体优势和挑战。朱政宇等^[29]结合RIS的特点分析了RIS在ISAC系统中的优化设计,探讨了RIS辅助的ISAC系统中波束成形设计的问题。然而,该工作在原理分析和优化方法介绍方面仍存在不足。值得注意的是,波束成形与反射相移矩阵优化设计对RIS辅助ISAC系统的构建十分重要,关系到系统通信性能和感知性能的权衡。目前学界主要通过设计不同的优化算法,来对RIS辅助的ISAC系统进行波束成形优化。如何设计出一个鲁棒性更强、复杂度更低的优化算法,使得设计的波束在系统中发挥出更优性能,进而提高ISAC系统的通信和感知性能,已成为当前研究的热点和难点问题。

为此,本文对RIS辅助的ISAC系统中的波束成形设计进行了系统综述。本文主要工作和贡献如下:首先,描述无源RIS、有源RIS和混合RIS辅助ISAC系统的波束成形设计的基本原理和数学模型。其次,从无源RIS、有源RIS和混合RIS 3个角度,分别对波束成形的研究现状进行归纳、对比与分析。最后,指出亟待解决的问题和挑战,并对未来的研究趋势进行展望。

1 系统模型

本节将描述无源RIS、有源RIS、混合RIS辅助的ISAC系统的数学模型,包括复合信号公式、系统加权和速率(WSR)和探测功率等,给出RIS辅助的ISAC系统中通信与感知的性能指标,指出其中的波束成形优化问题。

1) 无源RIS辅助的ISAC系统模型

常见的无源RIS辅助的ISAC系统模型如图1所示。系统由配备了 M 根发射天线和 M 根接收天线的基站(BS)以及含有 N 个RE的RIS组成。在RIS的辅助下,该系统可同时服务 K 个单天线用户并且能够对单个目标进行感知。RIS将下行信号的主要波束对准用户。

在系统下行链路中,BS发射的信号可以表示为^[30]:

$$\mathbf{x} = \mathbf{W}_c \mathbf{s}_c + \mathbf{W}_r \mathbf{s}_r = \mathbf{W} \mathbf{s} \quad (1)$$

其中,我们定义 $\mathbf{W}_c \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 为通信波形的波束成形矩阵, $\mathbf{W}_r \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 为雷达波形的波束成形矩阵。 $\mathbf{s}_c \in \mathbb{C}^K$ 和 $\mathbf{s}_r \in \mathbb{C}^M$ 分别表示 K 个用户的通信符号矢量和 M 个雷达感知符号矢量,各自满足 $\mathbb{E}\{\mathbf{s}_c \mathbf{s}_c^H\} = \mathbf{I}_K$ 和 $\mathbb{E}\{\mathbf{s}_r \mathbf{s}_r^H\} = \mathbf{I}_M$,并且 $\mathbb{E}\{\mathbf{s}_c \mathbf{s}_r^H\} = 0$ 。定义系统发射符号矢量为 $\mathbf{s} \triangleq [\mathbf{s}_c^T, \mathbf{s}_r^T]^T \in \mathbb{C}^{K+M}$,且 $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_K, \dots, s_{K+M}]^T$ 。定义系统波束成形矩阵为 $\mathbf{W} \triangleq [\mathbf{W}_c, \mathbf{W}_r] \in \mathbb{C}^{M \times (K+M)}$ 。系统中每个用户都能接收到BS-用户和BS-RIS-用户链路的复合信号,其中用户 k 接收到的复合信号为:

$$y_k = (\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + d_k^H) \mathbf{x} + n_k \quad (2)$$

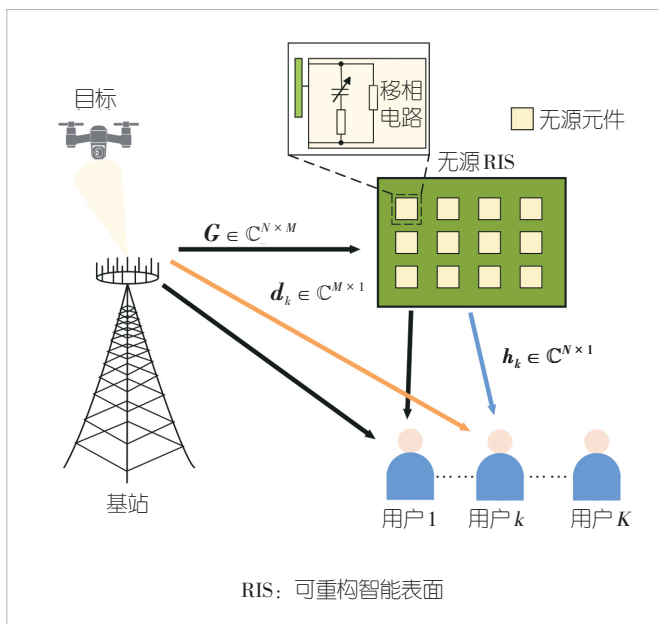


图1 无源RIS辅助的ISAC系统模型

其中, $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 、 $\mathbf{d}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 、 $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 分别表示 BS 与 RIS、BS 与用户、RIS 与用户间的信道。RIS 的反射系数矩阵定义为 $\Phi \triangleq \text{diag}(\boldsymbol{\varphi})$, 其中 $\boldsymbol{\varphi} \triangleq [\phi_1, \dots, \phi_N]^T$ 是满足 $|\phi_n| \leq 1, \forall n$ 的反射系数向量。 $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_k^2)$ 为用户 k 处的加性高斯白噪声 (AWGN)。用户 k 的 SINR 为:

$$\gamma_k = \frac{|(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^{K+M} |(\mathbf{h}_k^H \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_k^2} \quad (3),$$

其中 \mathbf{w}_j 是 \mathbf{W} 的第 j 列, 即 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_j, \dots, \mathbf{w}_{K+M}]$ 。

2) 有源 RIS 辅助的 ISAC 系统模型

有源 RIS 辅助的 ISAC 系统, 如图 2 所示, 由于存在有源 RE, 可以对入射信号进行放大。然而, 这会引入额外的热噪声, 此时用户 k 接收到的复合信号为:

$$y_k = (\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{x} + \mathbf{h}_k^H \mathbf{P} n_v + n_k \quad (4),$$

其中, \mathbf{P} 表示有源 RIS 的放大倍率矩阵。有源元件产生的热噪声表示为 $n_v \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_v^2 \mathbf{I})$, 则用户 k 的 SINR 为:

$$\gamma_k = \frac{|(\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |(\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_j|^2 + \|\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi\|^2 \sigma_v^2 + \sigma^2} \quad (5)。$$

3) 混合 RIS 辅助的 ISAC 系统模型

混合 RIS 辅助的 ISAC 系统如图 3 所示。混合 RIS 由 N 个排列为 $N_1 \times N_2$ 的矩形阵列 RE 组成, 其中含 A 个有源元件和 $N - A$ 个无源元件。定义 $\Psi = \mathbf{C} \Phi$ 为有源元件的反射系数矩阵

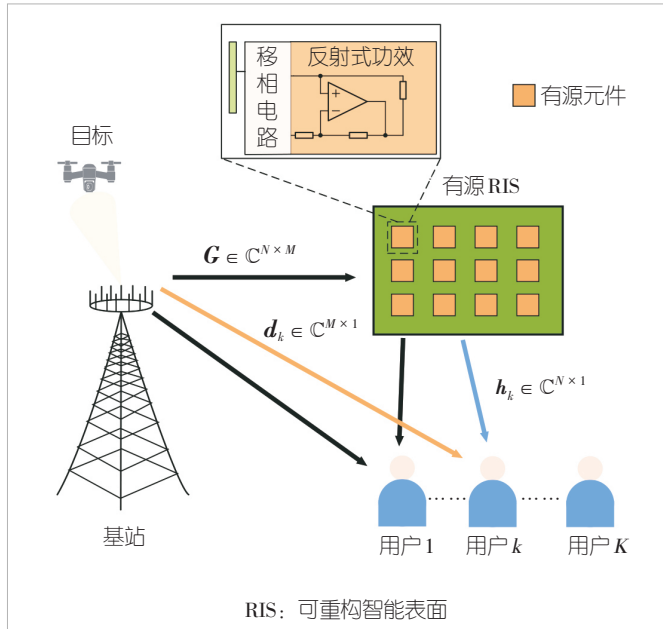


图2 有源RIS辅助的ISAC系统模型

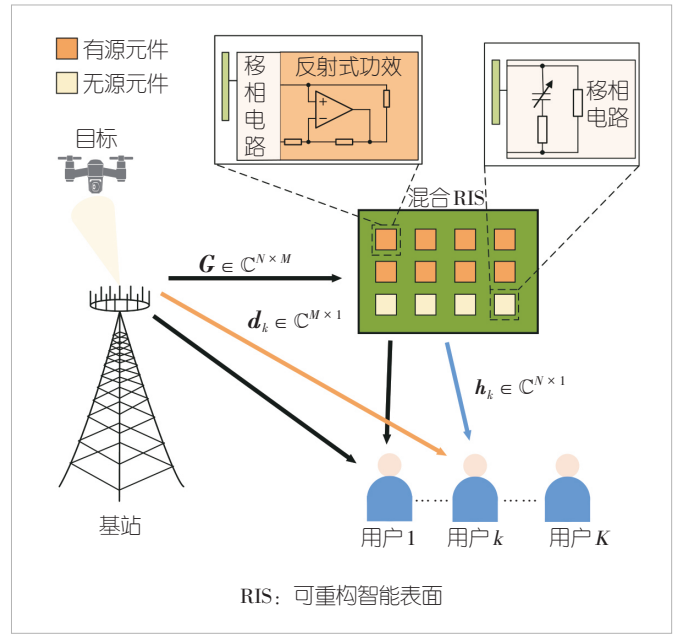


图3 混合RIS辅助的ISAC系统模型

阵, $\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{I}_N - \mathbf{C}) \Phi$ 为无源元件的反射系数矩阵, 则混合 RIS 的反射相移矩阵为 $\Phi = \Psi + \boldsymbol{\theta}$ 。对角阵 \mathbf{C} 的前 A 行与 $N \times N$ 的单位矩阵相同, 则可以得到用户 k 的 SINR:

$$\gamma_k = \frac{|(\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |(\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Phi \mathbf{G} + \mathbf{d}_k^H) \mathbf{w}_j|^2 + \|\mathbf{h}_k^H \mathbf{P} \Psi\|^2 \sigma_v^2 + \sigma^2} \quad (6)。$$

4) 优化问题

WSR 可以评估系统的总体吞吐量, 可作为评判系统通信性能的指标。WSR 可以表示为:

$$R = \sum_{k=1}^K \mu_k R_k \quad (7),$$

其中 μ_k 为用户 k 设置的权重, 由公平性和 QoS 要求决定。用户 k 的通信可实现速率 R_k 为:

$$R_k = \log_2(1 + \gamma_k) \quad (8)。$$

雷达感知具有目标检测和参数估计的功能。为了保证系统能更好地接收目标回波信号、降低干扰信号, 可采用最大化目标方向信号功率同时最小化非目标方向信号功率的方法, 以此保证雷达感知性能。因此, 在 ISAC 系统中, 通常将雷达探测功率作为评估感知性能的指标。BS 在 θ_m 方向上发射信号的探测功率为:

$$P(\theta_m) = \mathbf{a}^H(\theta_m) \mathbf{W} \mathbf{W}^H \mathbf{a}(\theta_m) \quad (9)。$$

若 BS 为均匀线阵, 则有导向矢量

$a(\theta_m) \triangleq \left[1, e^{j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_m)}, \dots, e^{j2\pi (M-1) \frac{d}{\lambda} \sin(\theta_m)} \right]^T$, 其中 d 和 λ 分别表示天线间距与信号波长。

为了在系统总发射功率和 RIS 反射系数单位模量特性的约束下, 最大化系统的 WSR 和目标探测功率, 需要对系统波束成形矩阵 \mathbf{W} 和 RIS 的反射系数矩阵 Φ 进行设计优化。优化问题可以表达为^[31]:

$$\max_{\mathbf{W}, \varphi} \quad \varepsilon \sum_{k=1}^K \mu_k R_k + (1 - \varepsilon) P(\theta_m) \quad (10),$$

$$\text{s.t.} \quad \|\mathbf{W}\|_F^2 \leq P_t \quad (10a),$$

$$|\phi_n| \leq 1, \forall n \quad (10b),$$

其中, 为了使 WSR 和目标探测功率均能实现最大化, 在公式 (10) 中引入了正则化参数 ε 。 P_{BS}^{\max} 表示 BS 最大发射功率。

约束条件不同, 优化问题的表达形式也会不同。该优化问题为多目标优化问题, 且目标函数复杂度较高, 属于非凸问题, 因此需要寻找合适的优化算法来进行问题求解。

2 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形设计

第 1 节描述了 RIS 辅助 ISAC 波束成形的数学模型, 本节将针对该模型给出现有的波束成形设计。根据应用场景的不同, 我们将其分为无源 RIS、有源 RIS 和混合 RIS 3 种场景, 并归纳、对比和分析目前代表性的 ISAC 系统波束成形方法。

2.1 无源 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形

在 RIS 辅助 ISAC 系统中, 雷达感知性能和通信性能主要由雷达的探测功率和通信可实现总和速率衡量, 在系统中波束成形的优化设计问题对于权衡 ISAC 系统的通信性能和

雷达感知性能尤为重要。

针对这一优化问题, 学界已提出多种优化设计方法。陶启慧等^[32]提出了基于加权最小均方误差 (WMMSE) 和分数规划 (FP) 的交替优化 (AO) 算法来解决这一优化问题, 相关算法流程如图 4 所示。交替优化波束成形矩阵 \mathbf{W} 和反射相移系数 φ , 如公式 (10) 所述, 使得加权和速率 \mathbf{R} 和目标探测功率 $P(\theta_m)$ 最大化。

Liu 等^[33]提出了基于 FP、最大化-最小化 (MM)、交替方向乘子法 (ADMM) 和一些复杂变换算法, 来联合求解 BS 发射/接收波束成形和 RIS 反射相移系数。Zhong 等^[34]提出了一种块坐标下降 (BCD) 的算法, 来最大限度地提高雷达的 SINR, 降低多用户通信的干扰。此外, 他们还提出了一种 Dinkelbatch-ECF 算法。陆睿等^[35]利用流形优化求解非凸问题的优势, 提出了一种基于流形优化的交替算法 (MO-AA) 对所提出的优化问题进行求解, 提高了系统通信服务质量与通信和速率。

段雪虎等^[31]提出了主动波束成形的连续凸逼近 (SCA) 双层迭代算法与被动波束成形的 FP 算法, 并通过在瑞利信道和莱斯信道中的仿真进行验证。结果表明, 该方法在提升主波束增益的同时, 也会导致侧波束增益升高。王宇哲等^[36]针对系统获取瞬时信道状态信息开销过大问题, 提出了一种统计信道状态信息 (CSI) 的联合波形设计方案, 并提出了一种交替优化算法来求解最优的基站发送协方差矩阵与 RIS 的对角相移矩阵。Xing 等^[37]在最小检测概率约束下最大化用户信噪比, 对通信和传感波束成形器、接收组合向量和 RIS 相移进行了交替优化与更新。Mai 等^[38]针对雷达干扰、多用户干扰和自由度低等问题, 通过引入替代优化算法, 使用黎曼共轭梯度 (RCG) 和黎曼最速下降 (RSD) 算法优化波束, 从而降低总干扰。Liu 等^[39]开发了一种高效迭代算法, 在最坏情况雷达信噪比限制、发射功率预算和反射系数的单

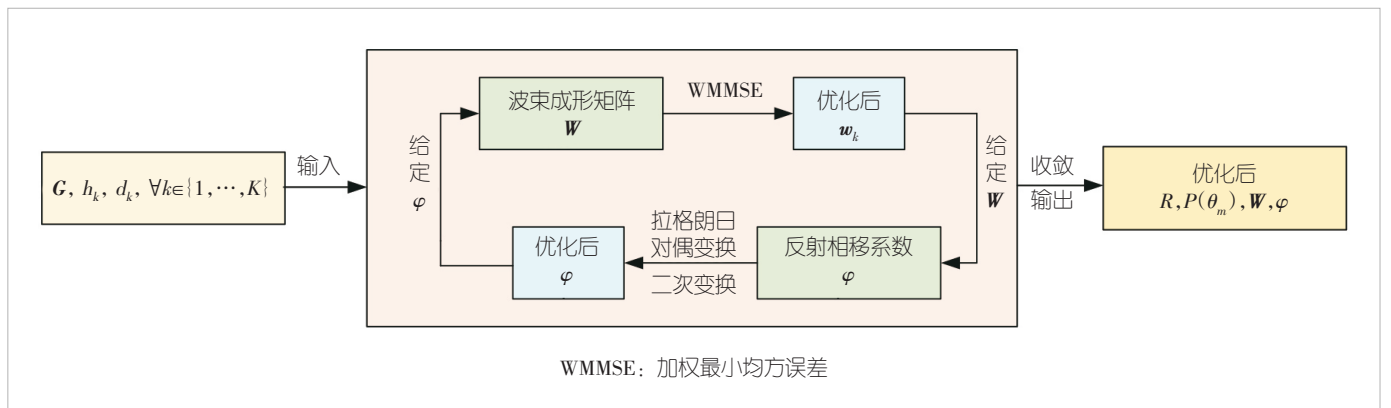


图4 基于WMMSE和FP的联合波束成形设计算法流程图^[29]

位模数限制下,使多用户通信的和速率达到最大。

无源 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形设计算法如表 1 所示。

2.2 有源 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形

有源 RIS 上的有源器件虽然能够抑制乘法衰落效应,但是会增加系统的总功耗。与无源 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形设计一样,有源 RIS 辅助系统的设计也会面临多约束优化问题。

有源 RIS 辅助 ISAC 系统中速率最大化的优化问题,除了存在基站最大发射功率的约束外,还存在有源 RIS 自身的功率放大器最大功率 P_A^{\max} 的约束。有源 RIS 的反射功率 P_A 由所需信号功率和放大的噪声功率组成,可表示为:

$$P_A = \sum_{k=1}^K \|P\Phi G w_k\|^2 + \|P\Phi\|^2 \sigma_v^2 \quad (11),$$

其中 P 为有源 RIS 的放大倍率矩阵。基于公式 (11), 有源 RIS 的输出总功耗约束条件如下^[40]:

$$\sum_{k=1}^K \|P\Phi G w_k\|^2 + \|P\Phi\|^2 \sigma_v^2 \leq P_A^{\max} \quad (12)。$$

常见的基于 AO 与 FP 的有源 RIS 和速率最大化问题及联合波束成形与反射相移优化设计流程如图 5 所示,其中系统输入为信道 G 、 h_k 和 d_k ,待优化变量为波束成形矩阵 W 和反

射矩阵 Φ ,以及通过 FP 方法引入的辅助变量 ρ 和 α 。结合公式 (6) 和公式 (8),通过交替优化 4 个变量首先得到最优解,随后再不断更新迭代,直至总和速率 R 收敛。

Yu 等^[41]提出了一种四跳传感链路的有源 RIS 辅助 ISAC 系统,通过 MM 算法处理非凸的雷达 SINR 目标函数,并开发了基于半正定松弛 (SDR) 的方法来解决由此产生的四元问题。Rihan 等^[42]在满足用户信噪比和雷达信噪比的 QoS 要求的前提下,考虑了与发射功率和 RIS 配置有关的通信系统 EE 最大化问题。为解决所考虑的优化问题,他们开发了一种基于 AO 算法的迭代程序。EE 受 RIS 元件数量、RIS 位置、最低频谱效率系统要求和信道状态信息准确性的影响。在给定条件下已证明,有源 RIS 性能普遍优于无源 RIS。

Zhu 等^[43]基于 BCD、Dinkelbach 算法和 MM 算法开发了一种高效的联合优化算法,并验证了在 ISAC 系统中部署主动 RIS 的优势。为了最大限度地提高雷达输出信噪比并满足通信用户的 QoS 要求,需要联合设计发射波束成形器、有源 RIS 反射系数和雷达接收滤波器。为了在保证通信质量的同时最大限度地提高目标检测功率,Hao 等^[44]在 BS 中引入了延迟对齐调制 (DAM) 技术来补偿多路径延迟,首先利用替代优化方法将非凸问题解耦为两个子问题,再通过二次约束二次方程程序和 SDR 方法将每个子问题转化为凸问题。此外,为了降低 SDR 方法的复杂度,他们还提出了一种基于 MM 算法的迭代算法。

表1 基于无源 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形设计算法

文献	优化算法	基准算法	算法效果
[32]	基于 AO、WMMSE、FP 算法	基于 WMMSE 的随机优化算法、无 RIS 辅助模型	仿真结果证明,与基准方案相比,目标路径上探测功率和 WSR 都有提升
[33]	基于 FP、MM、ADMM 的联合求解算法	所提系统仅通信模型、所提系统仅感知模型和通信波束和感知波束分别优化模型	展示了在资源有限的情况下通信与雷达传感之间的性能权衡
[34]	BCD、Dinkelbachs-ECF 算法	无 RIS 辅助的 ISAC 和基于感知的 RIS 模型	所提方法在 SINR 和可实现总速率方面都有更好的性能
[35]	基于流形优化的交替算法	ADMM	所提算法在收敛性能与 ADMM 相近的情况下有更好的系统性能
[31]	SCA、FP	无 RIS 辅助的 ISAC 模型	在 Rician 信道下可实现和速率与感知功率都能得到有效改善
[36]	基于统计 CSI 的联合波束设计方案	所提交替优化算法模型	大系统近似结果与由蒙特卡洛平均实现的系统遍历速率保持高度一致,证明了所得近似结果的准确性
[37]	一种基于分段式搜索算法	随机 RIS 相移模型、无检测概率约束模型、定向相移模型	信噪比和回波功率均优于基准模型
[38]	基于 RCG-RSD 交替优化算法	RSD-Norm-SVD 交替算法、无 RIS 的 ZF 波束成形设计模型	所提设计能有效降低雷达和多用户总干扰,权衡通信和传感性能
[39]	基于 FP、MM、ADMM 的高效迭代算法	随机反射系数的 RIS 和无 RIS 的 ISAC 系统	总和速率和雷达信噪比均优于基准方案

ADMM: 交替方向乘子法
AO: 交替优化
BCD: 块坐标下降
CSI: 信道状态信息
ECF: 逐元素闭式
FP: 分数规划
ISAC: 通感一体化
MM: 最大化-最小化
RCG: 黎曼共轭梯度
RIS: 可重构智能表面
RSD: 黎曼最速下降
SCA: 连续凸逼近
SINR: 信干噪比
SVD: 奇异值分解
WMMSE: 加权最小均方误差
WSR: 加权和速率

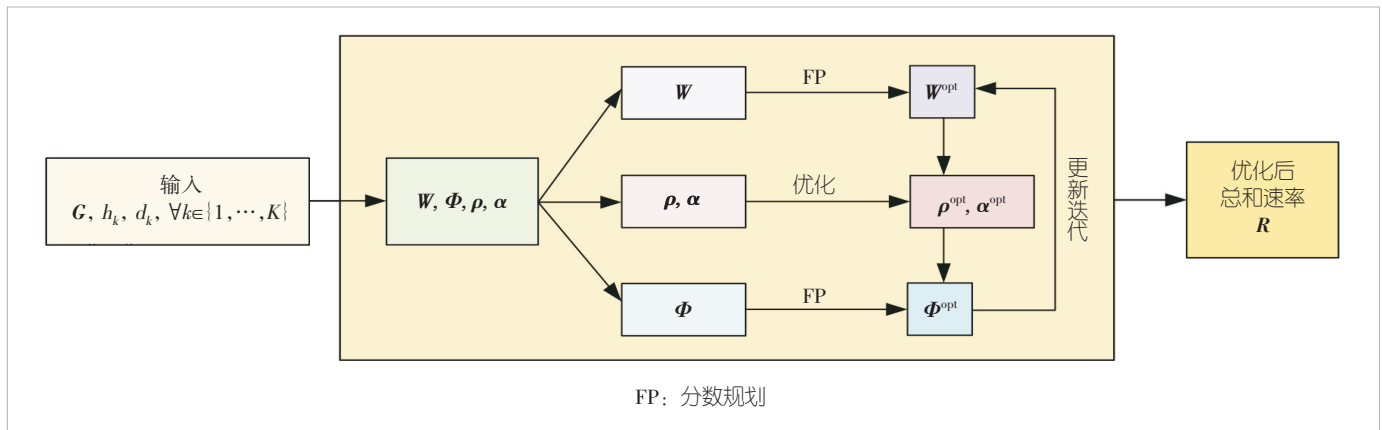


图5 有源RIS和速率最大化问题及联合波束成形与反射相移优化设计流程图^[40]

大多数RIS只能反射入射信号，这就要求发射器和接收器部署在RIS的同侧，而实际部署时会受到地理因素的限制。可同时发射与反射的可重构智能表面（STAR-RIS）不仅可以入射信号反射到同侧空间，还能透射到相反空间，并且反射信号和透射信号分别由反射系数和透射系数独立控制，从而实现全空间覆盖，提高了自由度和网络部署的灵活性^[45-46]。Liu等^[47]提出了一种基于STAR-RIS辅助ISAC系统，引用了半无限松弛法、MM和顺序秩一约束松弛（SROCR）法，开发了一种高效的整体迭代算法对非凸问题进行优化。

有源RIS辅助ISAC系统的波束成形设计算法如表2所示。

2.3 混合RIS辅助ISAC系统波束成形

混合RIS中既有无源器件也有有源器件，能够缓解乘法衰落效应。相比于单纯的有源RIS，混合RIS能够在尽可能保证系统性能的同时降低系统功耗。

在混合RIS系统中，存在无源RIS器件和有源RIS器件，系统总功耗变为：

$$P = \frac{1}{a} (\|\mathbf{W}_c\|^2 + \|\mathbf{W}_r\|^2) + \frac{1}{b} P_{\text{RIS}} + P_c + P_r \quad (13)。$$

混合RIS功耗为：

$$P_{\text{RIS}} = \|\psi G(\mathbf{W}_c + \mathbf{W}_r)\|_F^2 + \|\psi\|_F^2 \sigma_c^2 \quad (14)。$$

公式（13）中， a 、 b 分别表示BS和RIS的放大器效率，总功耗公式中第一项表示BS发射功率， P_c 表示用户和BS消耗的硬件功率， P_r 是RIS消耗的电路功率。

褚宏云等^[48]在满足BS发射功率、波束图增益、混合RIS功率和反射系数幅值约束的条件下，联合优化基站端的波束成形和混合RIS的相移，并基于级联深度学习网络构建了相移网络和波束成形两阶段优化网络，如图6所示。第一阶段优化可得到相移矩阵 Φ 和有效信道 \mathbf{H} ，将其输入第二阶段网络后可进一步得到优化后的波束成形矩阵 \mathbf{W} 。相比于经典的交替优化算法，该方法复杂度更低，系统性能更优。

Liao等^[49]提出了一种基于AO的设计方案，以低复杂度的方式交替优化BS的发射波束成形设计和混合RIS的系数矩阵。仿真结果表明，增加有源RIS器件数量会比增加无源

表2 基于有源RIS辅助的ISAC系统波束成形设计算法

文献	优化算法	基准算法	算法效果
[41]	基于MM算法和SDR的优化算法	无源RIS辅助的系统	相比无源RIS系统,具有更高的鲁棒性,主动RIS的实施可显著减轻四跳传感链路中的乘法衰落影响
[42]	基于AO、FP算法	通过改变RIS类型和器件、部署位置进行对比	EE受RIS元件数量、RIS位置、系统最低频谱效率要求和信道状态信息准确性的影响
[43]	基于BCD、Dinkelbach、MM的优化算法	无源RIS辅助ISAC模型、主动RIS辅助雷达模型	与被动RIS辅助ISAC系统比,主动RIS可实现高达32 dB的雷达信噪比提升
[44]	基于SDR算法和基于MM的AO算法	有无DAM技术系统模型	在太赫兹系统上,具有DAM的有源RIS在通信和传感性能方面优于其他方案
[47]	半无限松弛法、MM、SROCR	传统RIS、随机STAR-RIS和无STAR-RIS辅助的ISAC系统	与传统RIS相比,STAR-RIS可以有效权衡通信与感知性能

AO: 交替优化
BCD: 块坐标下降

DAM: 延迟对齐调制
FP: 分数规划

ISAC: 通感一体化
MM: 最大化-最小化

RIS: 可重构智能表面
SDR: 半正定松弛

SROCR: 顺序秩一约束松弛
STAR: 同时发射与反射

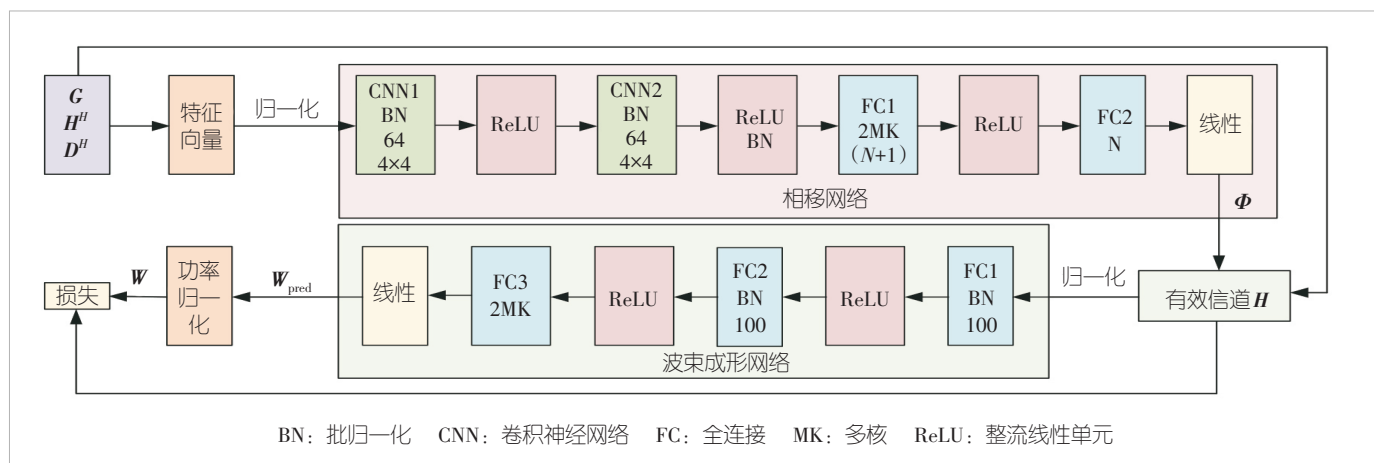


图6 两阶段波束成形网络结构图^[48]

RIS 器件更能有效改善系统整体性能。Sankar 等^[50]提出了一种基于交替优化的求解算法，用于设计发射波束成形器和 RIS 系数。相关数值模拟证明了所提出的混合 RIS 辅助 ISAC 系统的性能明显优于无源 RIS 辅助 ISAC 系统和无 RIS 的 ISAC 系统。Hao 等^[51]研究了一种借助混合可重构智能面的毫米波 ISAC 系统，采用了混合预编码结构。通过二次约束二次规划（QCQP）和 SDR 技术将波束成形优化子问题转化为凸问题，再通过 ADMM 进行求解。

Zhao 等^[52]研究了一种模式选择性混合 RIS，其每个元件都能在主动模式和被动模式之间切换，并提出了一种基于交替优化的方法，用于求解一类非凸优化问题，即在满足每个 CU 的通信要求、BS 的发射功率约束以及有源 RIS 单元约束的前提下，最大限度地提高雷达输出信噪比。最终得到的系统性能优于有源 RIS 或无源 RIS 辅助的方案。

混合 RIS 辅助的 ISAC 系统波束成形设计算法如表 3 所示。

3 技术挑战和研究趋势

3.1 技术挑战

尽管 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形的研究取得诸多研究成果，但是在以下几个方面仍存在一些技术挑战：

1) 算法复杂度

波束成形优化算法的复杂度随着 BS 天线数、用户数、RIS 反射单元数的增加而提高。未来接入网络的设备越来越多，算法的收敛速度也会随之降低，进而会影响通信的 WSR 和雷达的 SINR，最终影响系统性能。因此，如何设计低复杂度的优化算法来提高算法收敛速度是一个巨大挑战。

2) 通信环境

未来的 ISAC 系统要面对多种复杂的现实环境。例如，在车联网的 ISAC 系统中，时常要面对高速移动的场景，需要避免信号失真、增强信号回波，以保证系统的通信和感知性能。对此，可以借助正交时频空间（OTFS）调制技术来提高系统在动态环境中的性能，适应复杂环境^[53]。

表3 基于混合RIS辅助的ISAC系统波束成形设计算法

文献	优化算法	基准算法	算法效果
[48]	基于级联深度学习网络的求解算法	传统AO优化模型、无源RIS、有源RIS、无RIS模型	基于深度学习的方法的系统性能优于基于传统的AO算法的系统
[49]	AO、SDR	只进行信息传输的混合RIS辅助ISAC系统、RIS相位随机、无源RIS	降低优化问题的复杂度,相较于基准方案,提高了系统性能
[50]	AO	无源RIS、随机RIS、无RIS方案	研究证明少部分RIS处于激活状态,性能也优于基准方案
[51]	QCQP、SDR、ADMM	有源RIS和无源RIS分别结合全数字预编码和混合预编码	与全数字编码结构相比,所提出的系统具有更高的能效和更好的通信和传感性能
[52]	AO、MM、Dinkelbach、SDR、BCD	无源RIS、有源RIS	所提方案性能优于仅由主动或被动RIS辅助的同类方案

ADMM: 交替方向乘子法
AO: 交替优化

BCD: 块坐标下降
ISAC: 通感一体化

MM: 最大化-最小化
QCQP: 二次约束二次规划

RIS: 可重构智能表面
SDR: 半正定松弛

3) 能量效率与功耗

波束成形设计需要考虑系统的能量效率问题。当大规模部署 RIS 时, 系统功耗一定是不能忽略的问题。有源 RIS 和混合 RIS 都需要考虑部署面积和部署位置以平衡功耗和系统性能。在系统功耗恒定的情况下, 当增加有源 RIS 的发射功率超过一定限度时, 雷达 SINR 就会下降^[41, 43]。文献[48]讨论了 RIS 元件数目与能量效率的关系。绿色 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形设计也是一大挑战。

4) 近场传播

近场与远场通信的边界由瑞利距离确定。瑞利距离与阵列孔径的平方成正比, 与波长成反比。近场传播的典型特征包括球面波模型、空间非平稳性、宽带波束斜视效应等。原有的远场传播技术在近场传播时会造成严重的性能损失^[54]。在 RIS 辅助 ISAC 系统中, RIS 的超大阵列孔径与高频段通信特性, 使得其更适合工作在近场传播环境中。若仍使用远场通信技术, 将会对系统性能造成严重影响。

3.2 研究趋势

未来 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形研究将主要集中在智能化、安全性以及能量效益方面:

1) 智能化波束成形

未来 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形设计将更加智能化, 通过机器学习、深度学习 (DL) 等技术实现自适应波束成形。Sheen 等^[55]构建了一种 DL 模型, 在无需 CSI 的情况下, 通过捕获动态环境和通信网络之间的相互作用与特征, 预测出 RIS 的最佳相移。Taha 等^[56]基于 DL 方法, 提出了一种混合 RIS 辅助无线通信系统的波束成形设计方案, 有效降低了系统开销。深度强化学习 (DRL) 具有更强的决策能力和学习效率。Feng 和 Huang 等^[57-58]将 DRL 技术结合到 RIS 联合波束成形和反射相移的设计中, 使得系统能够在环境中学习, 逐步得到最优的发射波束和相移矩阵, 具有良好的鲁棒性和更快的收敛速度。

2) 安全隐私优化

未来 RIS 辅助 ISAC 系统设计在兼顾系统性能的同时要关注安全性问题。朱政宇等^[59]针对存在窃听者的 ISAC 系统安全性低的问题, 提出一种安全资源分配算法。该算法在满足基站和干扰机最大发射功率、雷达 SINR 约束条件下, 对发射波束成形和反射相移进行联合优化, 在最大化系统保密率的同时, 保证了通信与感知性能。

3) 能量效率优化

未来 RIS 辅助 ISAC 系统的波束成形设计将注重能量效率优化, 通过优化波束形状和传输路径, 减少能量损耗, 提

高系统的能效性能。Li 等^[60]开发了一套优化传输方案, 来平衡能效和频谱效率, 与采用相等功率分配或固定 RIS 相移器相比, 显著提高了频谱效率。对于含有有源 RIS 的 ISAC 系统, 不仅要关注 BS 发射功率, 还要考虑 RIS 模块中有源器件的功耗, 权衡雷达 SINR 与通信总和速率, 以保证系统的通信和感知性能, 实现高能效波束成形设计。

4) RIS 近场传播环境波束成形

RIS 具有超大阵列孔径、低成本、易部署、低功耗等优点, 有望在未来用于构建近场传播环境。在 RIS 辅助的 ISAC 系统中, 基于 RIS 创造的近场传播环境, 能够提高 ISAC 系统的通信和感知性能。首先, 相比于远场通信, 近场通信具有提升信道容量、提供更高空间自由度的优势。其次, 近场特有的空间非平稳性和宽带波束斜视效应, 能加速系统感知定位并提高定位精度^[61]。未来, 由 RIS 构建的近场传播环境也将成为 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形设计中不可忽视的条件。

4 结束语

本文首先描述了 RIS 辅助 ISAC 系统的通用信号模型, 包括无源 RIS、有源 RIS 和混合 RIS 3 种应用场景, 并给出波束成形优化问题建模。其次, 按无源 RIS、有源 RIS、混合 RIS 3 类场景, 对 ISAC 系统中波束成形设计和优化算法进行系统分析、归纳与对比。最后, 探讨了 RIS 辅助 ISAC 系统波束成形设计的技术挑战, 并展望了其未来研究趋势。其中, 如何降低优化算法的复杂度、权衡通信与雷达感知性能, 是当前面临的重要挑战; 而开发新的优化算法、引入人工智能等新技术, 将成为未来推进 RIS-ISAC 系统波束成形发展的关键突破口。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Kak A, Nie S. 6G and beyond: the future of wireless communications systems [J]. IEEE access, 2020, 8: 133995-134030. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3010896
- [2] Saad W, Bennis M, Chen M Z. A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems [J]. IEEE network, 2020, 34(3): 134-142. DOI: 10.1109/MNET.001.1900287
- [3] Zhang Z Q, Xiao Y, Ma Z, et al. 6G wireless networks: vision, requirements, architecture, and key technologies [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2019, 14(3): 28-41. DOI: 10.1109/MVT.2019.2921208
- [4] Zhang J A, Liu F, Masouros C, et al. An overview of signal processing techniques for joint communication and radar sensing [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2021, 15(6): 1295-1315. DOI: 10.1109/JSTSP.2021.3113120
- [5] Rappaport T S, Xing Y C, Kanhere O, et al. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities

- and challenges for 6G and beyond [J]. IEEE access, 2019, 7: 78729–78757. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2921522
- [6] Liu F, Cui Y H, Masouros 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
- [7] Liu F, Masouros C, Petropulu A P, et al. Joint radar and communication design: applications, state-of-the-art, and the road ahead [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(6): 3834–3862. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2973976
- [8] 李萍, 郭晓江. 通信一体化关键技术与应用 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(2): 72–78. DOI: 10.12142/ZTETJ.202302014
- [9] Yuan J H, Fei Z S, Wei Z Q. Integrated sensing and communication (ISAC) technologies for future wireless communication [J]. ZTE communications, 2024, 22(3): 1–3. DOI: 10.12142/ZTECOM.202403001
- [10] 胡文豪, 何振耀, 徐甜甜, 等. 通信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
- [11] 马红兵, 张平, 杨帆, 等. 智能超表面技术展望与思考 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(3): 70–77. DOI: 10.12142/ZTETJ.202203012
- [12] Zhu Y T, Xu Z Y, Zhang H T. Cooperative distributed beamforming design for multi-RIS aided cell-free systems [J]. ZTE communications, 2024, 22(2): 99–106. DOI: 10.12142/ZTECOM.202402013
- [13] 李萍, 叶峥峥, 冀建武. 智能超表面自动化部署解决方案 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(6): 70–74. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506010
- [14] Long R Z, Liang Y C, Pei Y Y, et al. Active reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(8): 4962–4975. DOI: 10.1109/TWC.2021.3064024
- [15] Wu Q Q, Zhang R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(11): 5394–5409. DOI: 10.1109/TWC.2019.2936025
- [16] Pan C H, Zhou G, Zhi K D, et al. An overview of signal processing techniques for RIS/IRS-aided wireless systems [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2022, 16(5): 883–917. DOI: 10.1109/JSTSP.2022.3195671
- [17] Huang C W, Zappone A, Alexandropoulos G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(8): 4157–4170. DOI: 10.1109/TWC.2019.2922609
- [18] Dai L L, Wang B C, Wang M, et al. Reconfigurable intelligent surface-based wireless communications: antenna design, prototyping, and experimental results [J]. IEEE access, 2020, 8: 45913–45923. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977772
- [19] Basar E, Di Renzo M, De Rosny J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE access, 2019, 7: 116753–116773. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2935192
- [20] Yuan Y F, Gu Q, Wang A N, et al. Recent progress in research and development of reconfigurable intelligent surface [J]. ZTE communications, 2022, 20(1): 3–13
- [21] Hou X L, Li X, Wang X, et al. Some observations and thoughts about reconfigurable intelligent surface application for 5G evolution and 6G [J]. ZTE communications, 2022, 20(1): 14–20. DOI: 10.12142/ZTECOM.202201003
- [22] Rihan M, Grossi E, Venturino L, et al. Spatial diversity in radar detection via active reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE signal processing letters, 2022, 29: 1242–1246. DOI: 10.1109/LSP.2022.3175417
- [23] Zhang H B, Zhang H L, Di B Y, et al. MetaRadar: multi-target detection for reconfigurable intelligent surface aided radar systems [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(9): 6994–7010. DOI: 10.1109/TWC.2022.3153792
- [24] Wang F Z, Li H B, Fang J. Joint active and passive beamforming for IRS-assisted radar [J]. IEEE signal processing letters, 2022, 29: 349–353. DOI: 10.1109/LSP.2021.3134899
- [25] 刘让, 罗泓昊, 李明. 智能超表面在通信感知一体化系统中的应用 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(3): 53–57, 69. DOI: 10.12142/ZTETJ.202203009
- [26] Prasobh Sankar R S, Deepak B, Chepuri S P. Joint communication and radar sensing with reconfigurable intelligent surfaces [C]//Proceedings of IEEE 22nd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2021: 471–475. DOI: 10.1109/spawc51858.2021.9593143
- [27] Di B Y, Zhang H L, Song L Y, et al. Hybrid beamforming for reconfigurable intelligent surface based multi-user communications: achievable rates with limited discrete phase shifts [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(8): 1809–1822. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3000813
- [28] Di Renzo M, Zappone A, Debbah M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2450–2525. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007211
- [29] 朱政宇, 宁梦珂, 孙钢灿, 等. 智能超表面辅助通信感知一体化系统研究综述 [J]. 移动通信, 2023, 47(11): 51–58
- [30] Liu X, Huang T Y, Shlezinger N, et al. Joint transmit beamforming for multiuser MIMO communications and MIMO radar [J]. IEEE transactions on signal processing, 2020, 68: 3929–3944. DOI: 10.1109/TSP.2020.3004739
- [31] 段雪虎, 陈立伟, 王桐. RIS辅助的通信感知一体化波束形成设计 [J]. 应用科技, 2024, 51(5): 182–189. DOI: 10.11991/yykj.202310012
- [32] 陶启慧, 栗欣, 刘蓓, 等. RIS辅助通信一体化: 波束成形和反射相移的联合设计 [J]. 移动通信, 2024, 48(3): 61–65
- [33] Liu R, Li M, Liu Q, et al. SNR/CRB-constrained joint beamforming and reflection designs for RIS-ISAC systems [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(7): 7456–7470. DOI: 10.1109/TWC.2023.3341429
- [34] Zhong K, Hu J F, Pan C H, et al. Joint waveform and beamforming design for RIS-aided ISAC systems [J]. IEEE signal processing letters, 2023, 30: 165–169. DOI: 10.1109/LSP.2023.3242554
- [35] 陆馨, 刘陈, 宋云超, 等. 基于流形优化的RIS辅助通信一体化系统传输方案设计 [J]. 无线电通信技术, 2024, 50(3): 555–563
- [36] 王宇哲, 刘一龙, 张军. 基于统计CSI的RIS辅助通信一体化波束成形设计 [J]. 无线电通信技术, 2024, 50(2): 328–333
- [37] Xing Z, Wang R, Yuan X J. Joint active and passive beamforming design for reconfigurable intelligent surface enabled integrated sensing and communication [J]. IEEE transactions on communications, 2023, 71(4): 2457–2474. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3244246
- [38] Mai Y Y, Du H Q. Joint beamforming and phase shift design for RIS-aided ISAC system [C]//Proceedings of IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2022: 155–160. DOI: 10.1109/ICCC56324.2022.10065868
- [39] Liu R, Li M, Swindlehurst A L. Joint beamforming and reflection design for RIS-assisted ISAC systems [C]//Proceedings of 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). IEEE, 2022: 997–1001. DOI: 10.23919/EUSIPCO55093.2022.9909807
- [40] Zhang Z J, Dai L L, Chen X B, et al. Active RIS vs. passive RIS: which will prevail in 6G [J]. IEEE transactions on

- communications, 2023, 71(3): 1707–1725. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3231893
- [41] 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, 2024, 72(3): 1578–1595. DOI: 10.1109/TCOMM.2023.3332856
- [42] Rihan M, Zappone A, Buzzi S, et al. Power control and active RIS design for energy-efficient integrated sensing and communications [C]//Proceedings of 57th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. IEEE, 2023: 774–778. DOI: 10.1109/IEEECONF59524.2023.10476742
- [43] Zhu Q, Li M, Liu R, et al. Joint transceiver beamforming and reflecting design for active RIS-aided ISAC systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(7): 9636–9640. DOI: 10.1109/TVT.2023.3249752
- [44] Hao W M, Shi H, Sun G C, et al. Joint beamforming design for active RIS-aided THz ISAC systems with delay alignment modulation [J]. IEEE wireless communications letters, 2023, 12(10): 1816–1820. DOI: 10.1109/LWC.2023.3295912
- [45] Mu X D, Liu Y W, Guo L, et al. Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS aided wireless communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(5): 3083–3098. DOI: 10.1109/TWC.2021.3118225
- [46] Xu J Q, Liu Y W, Mu X D, et al. STAR-RISs: simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(9): 3134–3138. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3082214
- [47] Liu Z P, Li X, Ji H, et al. Toward STAR-RIS-empowered integrated sensing and communications: joint active and passive beamforming design [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2023, 72(12): 15991–16005. DOI: 10.1109/TVT.2023.3294338
- [48] 褚宏云, 杨梦瑶, 黄航, 等. 混合智能反射面辅助的通感感知一体化: 高能波束成形设计 [J]. 电子与信息学报, 2024, 46(6): 2462–2469
- [49] Liao C K, Wang F, Han G J, et al. Beamforming design for hybrid active-passive RIS assisted integrated sensing and communications [J]. IEEE communications letters, 2023, 27(11): 2938–2942. DOI: 10.1109/LCOMM.2023.3314609
- [50] Sankar R S P, Chepuri S P. Beamforming in hybrid RIS assisted integrated sensing and communication systems [C]//Proceedings of 30th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). IEEE, 2022: 1082–1086. DOI: 10.23919/EUSIPCO55093.2022.9909562
- [51] Hao W M, Qu Y C, Zhou S, et al. Joint beamforming design for hybrid RIS-assisted mmWave ISAC system relying on hybrid precoding structure [J]. IEEE Internet of Things journal, 2024, 11(18): 29455–29469. DOI: 10.1109/JIOT.2024.3390134
- [52] Zhao R, Hu X Y, Liu C W, et al. Joint beamforming and mode selection design for hybrid RIS assisted integrated sensing and communications [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2024: 1–6. DOI: 10.1109/WCNC57260.2024.10571105
- [53] Yuan W J, Wei Z Q, Li S Y, et al. Integrated sensing and communication-assisted orthogonal time frequency space transmission for vehicular networks [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2021, 15(6): 1515–1528. DOI: 10.1109/JSTSP.2021.3117404
- [54] Cui M Y, Wu Z D, Lu Y, et al. Near-field MIMO communications for 6G: fundamentals, challenges, potentials, and future directions [J]. IEEE communications magazine, 2023, 61(1): 40–46. DOI: 10.1109/MCOM.004.2200136
- [55] Sheen B, Yang J, Feng X L, et al. A deep learning based modeling of reconfigurable intelligent surface assisted wireless communications for phase shift configuration [J]. IEEE open journal of the communications society, 2021, 2: 262–272. DOI: 10.1109/OJCOMS.2021.3050119
- [56] Taha A, Alrabeiah M, Alkhateeb A. Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning [J]. IEEE access, 2021, 9: 44304–44321. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3064073
- [57] Feng K M, Wang Q S, Li X, et al. Deep reinforcement learning based intelligent reflecting surface optimization for MISO communication systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(5): 745–749. DOI: 10.1109/LWC.2020.2969167
- [58] Huang C W, Mo R H, Yuen C. Reconfigurable intelligent surface assisted multiuser MISO systems exploiting deep reinforcement learning [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(8): 1839–1850. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3000835
- [59] 朱政宇, 杨晨一, 李铮, 等. 智能反射面辅助通感一体化系统安全资源分配算法 [J]. 电子与信息学报, 2025, 47(1): 66–74. DOI: 10.11999/JEIT240083
- [60] You L, Xiong J Y, Ng D W K, et al. Energy efficiency and spectral efficiency tradeoff in RIS-aided multiuser MIMO uplink transmission [J]. IEEE transactions on signal processing, 2021, 69: 1407–1421. DOI: 10.1109/TSP.2020.3047474
- [61] 赵亚军. 基于智能超表面的6G近场网络构建 [J]. 移动通信, 2024, 48(4): 1–11

作者简介



廖勇, 重庆大学微电子与通信工程学院副研究员; 主要研究方向为智能信号与信息处理、数字技术及其应用; 主持国家级和省部级项目10余项; 发表论文150余篇。



韦东卫, 重庆大学微电子与通信工程学院在读本科生; 主要研究方向为智能信号与信息处理。

基于信息-能源-时间三元组的 算力资源综合度量与优化方法研究



Comprehensive Measurement and Optimization Method of Computing Power Resources Based on Information-Energy-Time Triplet

刘超清/Liu Chaoqing¹, 周丹媛/Zhou Danyuan²,
缪政/Miao Zheng³, 丁亦志/Ding Yizhi¹, 武振宇/Wu Zhenyu¹

(1. 中国移动通信集团设计院有限公司, 中国 北京 100080;

2. 中国移动通信集团有限公司, 中国 北京 100033;

3. 中移(苏州)软件技术有限公司, 中国 苏州 215000)

(1. China Mobile Group Design Institute Co., Ltd., Beijing 100080, China;

2. China Mobile Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China;

3. China Mobile (Suzhou) Software Technology Co., Ltd., Suzhou 215000, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602011

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.tn.20260422.1724.003>

网络出版日期: 2026-04-24

收稿日期: 2025-11-20

摘要: 现有算力度量方法以浮点运算次数(FLOPS)为单一指标, 忽视了能效与时间效率, 导致资源调度不合理。提出一种基于“信息-能源-时间”三元组的算力资源综合度量与优化方法。构建了以最优硬件为基准的归一化评分模型, 将算力、能效比、时间3个维度归一化至[0,1]区间, 并支持性能优先、节能优先、响应优先等场景化权重配置。基于“算力网络”的仿真验证表明, 该方法能够有效提升资源利用率, 降低能耗并优化任务执行时间, 为算力网络的精细化资源管理提供了新方案。

关键词: 算力网络; 算力度量; 信息-能源-时间三元组; 归一化评分; 能效比; 动态调度

Abstract: Existing computing power metrics rely solely on Floating Point Operations Per Second (FLOPS) as a performance indicator, neglecting energy efficiency and time efficiency, which leads to suboptimal resource scheduling. To address this issue, a comprehensive measurement and optimization method for computing power resources based on the “information-energy-time” triplet is proposed. A normalized scoring model benchmarked against optimal hardware is constructed, which normalizes the three dimensions of computing power, energy efficiency ratio, and time into the [0, 1] range, and supports scenario-specific weight configurations such as performance, energy-saving, and response priorities. Simulation verification based on the “Computing Network Brain” shows that the proposed method can effectively improve resource utilization, reduce energy consumption, and optimize task execution time, providing a new solution for fine-grained resource management in computing power networks.

Keywords: computing power network; computing power measurement; information-energy-time triplet; normalized scoring; energy efficiency ratio; dynamic scheduling

引用格式: 刘超清, 周丹媛, 缪政, 等. 基于信息-能源-时间三元组的算力资源综合度量与优化方法研究 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 73-80. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602011

Citation: Liu C Q, Zhou D Y, Miao Z, et al. Comprehensive measurement and optimization method of computing power resources based on information-energy-time triplet [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 73-80. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602011

1 概述

1.1 算力网络发展背景

随着国家一体化大数据中心算力枢纽项目(即“东数西算”工程)的逐步推进,“算力网络”作为一种新兴网络概念应运而生。算力网络的核心在于借助先进的网络技术,实现不同地理分布的算力中心之间的互联互通,并对上述资源进行实时监控。基于该机制,算力网络能够在全局范

围内智能地分配与调度各类任务及数据传输,从而提升算力资源的利用效率,促进算力、数据与应用资源的共享与整合。简而言之,算力网络是一种具备全局感知、分配与调度能力的智能网络系统,其体系架构如图1所示。

基于“算力可用、可控、可计量”的一体化算力交易调度平台,目前常用的算力系统调度方法包括集中式、分布式、层次式和混合式调度等,主要通过动态精准调度算力供

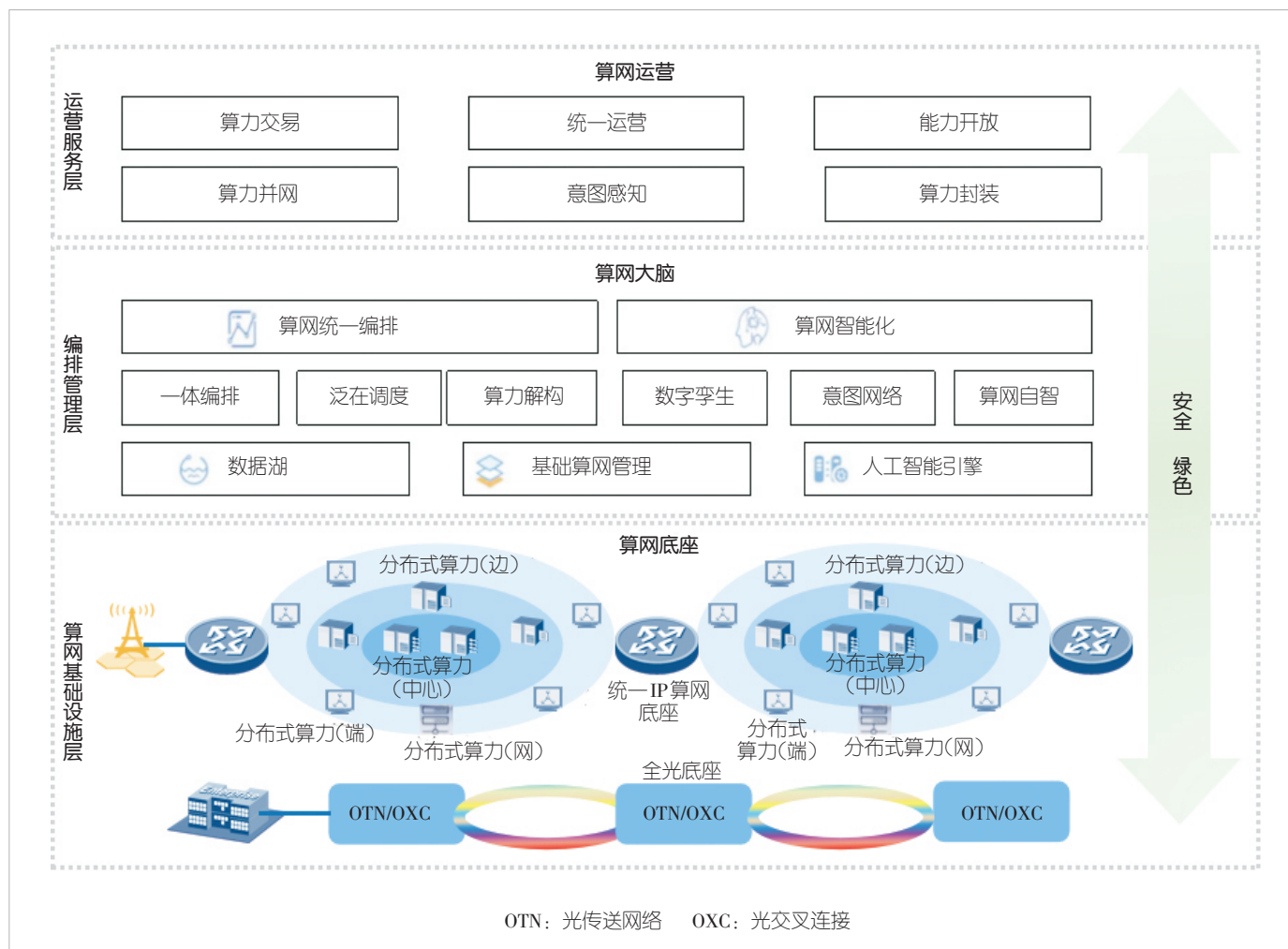


图1 算力网络体系架构示意图

给侧的资源，以调整资源分配。

云计算、大数据和人工智能技术的迅速发展，计算任务的复杂性不断提升，都为算力网络调度带来了更为严峻的挑战。算力调度问题本质上是一个多约束、多目标的优化问题，涉及资源分配、任务调度和成本效益分析等多个方面。在云计算环境中，计算任务通常需要在多个物理或虚拟服务器上执行，每个任务均具有特定的计算需求和截止时间。资源分配的目标是在满足所有任务需求的前提下，最小化资源使用成本或最大化资源利用率。由于任务和资源的多样性以及需求的动态变化，算力调度问题通常具备大规模与高复杂性的特征。

1.2 现有算力度量的不足

算力是指服务器通过对数据进行处理并输出结果的计算能力，是衡量服务器或芯片计算能力的关键指标，数值越大表示计算能力越强。算力主要包括以中央处理器（CPU）芯

片为代表的通用算力，以及以图形处理器（GPU）/人工智能（AI）加速芯片为代表的高性能算力（即智能算力）。常用的计量单位为每秒所执行的浮点运算次数（FLOPS）。

传统算力性能指标存在以下不足：

- 1) 单一度量指标。现有技术通常仅以FLOPS作为算力的主要计量单位，忽视了算力资源的多样性与复杂性，难以全面反映不同计算任务与算法的实际需求。
- 2) 缺乏综合考量。FLOPS作为单一指标，无法兼顾能源效率、计算任务特性（如并行性、内存需求等）以及软件架构的先进性，而这些因素对算力性能具有重要影响。
- 3) 适应性不足。随着人工智能与大数据等技术的发展，现代计算任务日趋多样化，单一的FLOPS指标难以适应新场景下算力资源的复杂需求。
- 4) 资源调度局限。仅依赖FLOPS指标进行资源调度，容易造成资源分配不均衡，难以实现系统性能与能源效率的

整体优化。

5) 无法反映实际应用性能。FLOPS 指标主要衡量处理器的峰值性能,而在实际应用中,受内存带宽、输入输出(I/O)瓶颈等因素影响,往往难以达到该峰值。

1.3 相关研究工作

在算力度量与优化方面,学术界和工业界已进行诸多探索。Google 提出“Carbon-Aware Computing”框架,根据碳排放强度动态调度数据中心负载;Microsoft Azure 采用“Resource Central”系统,通过机器学习预测资源使用并优化能效。在中国,阿里云提出“绿色计算”模型,综合考虑电源使用效率(PUE)、碳排放与任务延迟;华为提出“全栈 AI 能效优化”方案,将 AI 训练任务调度至可再生能源富集区域。然而,这些方法大多聚焦于能源或性能的单一维度,尚未形成综合考虑能源、环境、计算效率及用户需求的统一模型。

本文将在第2章提出基于“信息-能源-时间”三元组的算力资源综合度量方法,相比上述单一维度方法,能够更全面地评估和调度算力资源。

2 基于信息-能源-时间三元组的算力优化方法

2.1 度量标准设定

本节中我们定义算力资源综合度量的3个核心维度及其量化指标。为构建归一化综合评分模型,需对3个维度进行准确定义和量化。

1) 运算能力(I):以 FLOPS 为基本单位进行衡量。为实现跨平台可比性,采用每秒万亿次浮点运算(TFLOPS)作为量化指标。该指标通过标准化基准测试获取。针对异构算力芯片类型,本方案通过统一基准测试套件进行测评,按 AI 训练、推理、高性能计算(HPC)等任务类型进行分类评估,确保跨平台的一致性。

2) 能源效率(η):以能效比(FLOPS/W)为关键指标进行衡量。该指标反映单位能耗下的运算能力,计算公式为 $\eta = I/P$,其中 I 为算力, P 为功耗。能效比越高,表示能源利用效率越优。能源效率体现了工艺的先进性和能源利用效率,是评估算力可持续性的关键因素。

3) 时间效率(T):以特定任务的执行时间(s)进行衡量。通过标准化基准测试任务(如 ResNet-50 图像识别)记录各硬件平台的执行时间。该指标反映软件架构先进性和软硬件协同效率。时间越短,执行效率越高。

为实现综合得分的统一量化处理,以上3个维度均采

用相对归一化方法,以当前云化资源池中的最优硬件性能作为基准进行标准化。

2.2 信息-能源-时间三元组的归一化模型

以资源池内最优硬件为基准的归一化综合评分模型如公式(1):

$$S = w_1 \times \frac{I}{I_{\max}} + w_2 \times \frac{\eta}{\eta_{\max}} + w_3 \times \frac{T_{\min}}{T} \quad (1)。$$

1) 参数说明

- I : 当前硬件的算力 (TFLOPS);
- I_{\max} : 当前资源池中的最大算力 (TFLOPS);
- η : 当前硬件的能效比 (TFLOPS/W), $\eta = I/P$;
- η_{\max} : 当前资源池中的最高能效比 (TFLOPS/W);
- T : 当前硬件的任务执行时间 (s);
- T_{\min} : 当前资源池中的最短任务执行时间 (s);
- w_1 、 w_2 、 w_3 : 权重因子, 满足 $w_1 + w_2 + w_3 = 1$, $w_i \in$

$[0, 1]$ 。

2) 模型特点

- 得分范围: $[0, 1]$, $S=1$ 表示在当前资源池中达到最优性能;
- 算力维度: I/I_{\max} , 体现相对于最优硬件的算力水平, 越高越好;
- 能效维度: η/η_{\max} , 体现相对于最优硬件的能效水平, 越高越好;
- 时间维度: T_{\min}/T , 体现相对于最短时间的效率水平, 时间越短得分越高。

3) 权重因子设定原则

- w_1 、 w_2 、 w_3 的值根据应用场景需求确定及调整, 且总和等于1, 以确保综合得分 S 的有效性;
- w_1 代表运算能力的权重, w_2 代表能效优化的权重, w_3 代表时间效率的权重。

w 权重因子的设定应根据实际应用场景的具体需求及数据中心的具体目标, 进行细致的调整与优化。

- 算力优先场景: 对于大规模 AI 训练、科学计算等对算力需求敏感的场景, 可设置较高 w_1 值;
- 能效优先场景: 对于绿色数据中心、边缘计算等对能耗敏感的场景, 可设置较高 w_2 值;
- 时间优先场景: 对于实时推理、在线服务等对延迟敏感的场景, 可设置较高 w_3 值;
- 均衡场景: 对于通用计算场景, 可采用相对均衡的权重配置。

4) 模型适用范围

当前模型适用于软件栈统一、同类型硬件资源池。在跨硬件类型进行比较时， T 维度因软件适配度的差异而存在不可公度性问题。建议在实际应用中限定比较范围或引入软件适配系数进行修正。

2.3 模型计算示例

下面我们通过具体示例说明归一化模型的使用方法（实际应用时需结合现有数据中心的硬件配置、系统软件架构及性能等）。

2.3.1 基础数据假设

假设某数据中心资源池包含两种异构服务器，需为图像识别任务选择最优算力资源。基准测试采用 ResNet-50 模型在 ImageNet 数据集上的推理任务，资源池硬件规格如表 1 所示。

资源池基准值为：

- $I_{\max} = \max(1.89, 312) = 312$ TFLOPS（GPU 服务器）；
- $\eta_{\max} = \max(0.009\ 2, 1.04) = 1.04$ TFLOPS/W（GPU 服务器）；
- $T_{\min} = \min(1\ 800, 300) = 300$ s（GPU 服务器）；
- 图像识别任务推荐使用 FP16 混合精度，可显著提升 GPU 效率。

2.3.2 归一化计算

假设应用场景以平衡性能与能效为目标，采用权重配置 $w_1=0.4$ ， $w_2=0.4$ ， $w_3=0.2$ 。

1) CPU 服务器综合得分

算力归一化： $I/I_{\max} = 1.89/312 = 0.0061$ ；能效归一化： $\eta/\eta_{\max} = 0.009\ 2/1.04 = 0.008\ 9$ ；时间归一化： $T_{\min}/T = 300/1\ 800 = 0.166\ 7$ 。

$$S_{\text{CPU}} = 0.4 \times 0.006\ 1 + 0.4 \times 0.008\ 9 + 0.2 \times 0.166\ 7 = 0.002\ 4 + 0.003\ 6 + 0.033\ 3 = 0.039\ 3 \quad (2)。$$

2) GPU 服务器综合得分

算力归一化： $I/I_{\max} = 312/312 = 1.0$ ；能效归一化： $\eta/\eta_{\max} = 1.04/1.04 = 1.0$ ；时间归一化： $T_{\min}/T = 300/300 = 1.0$ 。

$$S_{\text{GPU}} = 0.4 \times 1.0 + 0.4 \times 1.0 + 0.2 \times 1.0 = 1.0 \quad (3)。$$

3) 结果分析

GPU 服务器在 3 个维度上均达到资源池最优水平，综合得分为满分 1.0，因此应作为图像识别任务的优选资源。与 CPU 服务器相比，GPU 服务器的算力提升 165 倍（312/1.89），能效提升 113 倍（1.04/0.009 2），执行时间缩短 83%（从 1 800 s 降至 300 s）。从综合权重得分来看，GPU 服务器与 CPU 服务器的比值约为 25 : 1（1/0.039 3）。具体情况如表 2 所示。

2.3.3 资源分配优化

基于综合得分可指导算力资源的智能调度：

- 高得分资源（ $S \rightarrow 1$ ）：优先分配计算密集型任务；
- 中等得分资源（ $0.5 < S < 1$ ）：适合平衡型任务；
- 低得分资源（ $S < 0.5$ ）：仅作为弹性扩展资源；
- 优化效果预期：通过将图像识别任务优先调度至 GPU 服务器，相比 CPU 服务器可实现约 25 倍的综合能力提升。

2.4 对综合得分 S 值任务依赖性的分析

1) S 值与任务相关

S 值是“硬件 \times 任务”的联合属性，同一硬件在不同任务下对应的 S 值可能不同。以 CPU 和 GPU 为例：

- 在 AI 训练任务中，GPU 凭借其大规模并行计算能力，

表 2 资源池硬件综合得分及调度建议示例

服务器	S 值	排名	调度建议
GPU 服务器	1.000 0	1	优先分配任务
CPU 服务器	0.039 3	2	仅在 GPU 资源不足时使用

CPU：中央处理器 GPU：图形处理器

表 1 资源池硬件配置及基准测试结果示例

参数	CPU 服务器	GPU 服务器	说明
处理器	Intel Xeon Gold 6248R	NVIDIA A100 80GB PCIe	—
核心规格	24 核/48 线程	6 912 Shaders	—
算力 I /(TFLOPS)	1.89	312(FP16 Tensor)	CPU 实测 SGEMM、GPU FP16 性能
功耗 P /W	205	300	官方 TDP 值
能效比 η /(TFLOPS/W)	0.009 2	1.04	$\eta = I/P$
执行时间 T /s	1 800	300	ResNet-50 推理时间
软件架构	标准框架	优化 CUDA 库	—

CPU：中央处理器 CUDA：统一计算设备架构 GPU：图形处理器 SGEMM：单精度通用矩阵乘法 TFLOPS：每秒万亿次浮点运算

S 值通常远高于CPU;

- 在逻辑推理任务（如复杂的条件分支、递归调用）中，CPU 凭借其强大的分支预测与低延迟特性， S 值反而可能高于GPU。

2) 时间维度 T 具有任务敏感性

T 是 S 值任务依赖性的主要来源。同一硬件的时间维度得分取决于所执行的具体任务:

- AI训练任务: GPU 的 T_{norm} 通常远优于CPU（矩阵运算效率高);

- 编译构建任务: CPU 的 T_{norm} 可能优于GPU（编译器优化成熟);

- 数据库查询: 涉及大量分支判断，CPU 可能表现更优。

T 本质上是“软硬件协作效率”的度量，而非单纯的硬件执行时间。在软件栈统一的场景下， T 反映硬件架构差异; 在软件生态存在差距的场景下， T 会放大生态成熟度的影响。

3) 等价性的任务相对性

2.3 节模型计算示例中“25 台 CPU \approx 1 台 GPU”的等价性具有任务相关性: 该等价关系适用于AI训练类并行计算任务，但对于串行计算或逻辑推理任务则不成立。

因此，在进行算力评估和调度时，必须明确所针对的任务类型，否则 S 值的比较将失去意义。

3 基于“大云天穹”算网大脑的模拟验证

“大云天穹”算网大脑是中国移动算力网络的核心中枢系统（如图2所示），向下拉通算力网络全域资源，向上支撑算网融合类全业务，旨在最大化算力供给能力、数据处理能力、网络连通能力与业务供给能力。

算网大脑构建了“5 个中心、2 个网关”的整体架构。其中，5 个中心包括设计中心、编排调度中心、感知接入中心、能力接入中心与智能中心。设计中心负责算网业务拓扑、流程及端到端解决方案的设计，形成算网产品方案; 编

排调度中心承担业务需求分析、算网产品方案加载、一体化方案生成与交付、资源能力调度及实例全生命周期管理等职能; 感知接入中心实现算网多专业、多维度数据的感知接入，完成算网全域数据的汇聚与管理; 能力接入中心负责基础设施层能力的接入与管理，包括接入认证、能力封装、能力管理与执行监控等; 智能中心提供业务需求解析、方案设计、业务与资源调整调度等过程中的智能化能力。

2 个网关分别为网络域能力网关与算力域能力网关。网络域能力网关实现对网管系统实时感知、敏捷开通、动态优化能力的纳管与开放; 算力域能力网关实现对异构算力服务，以及基础设施即服务（IaaS）、平台即服务（PaaS）、软件即服务（SaaS）各层服务的集中接入与开放。

本研究基于中国移动算网大脑，通过引入基于信息、能

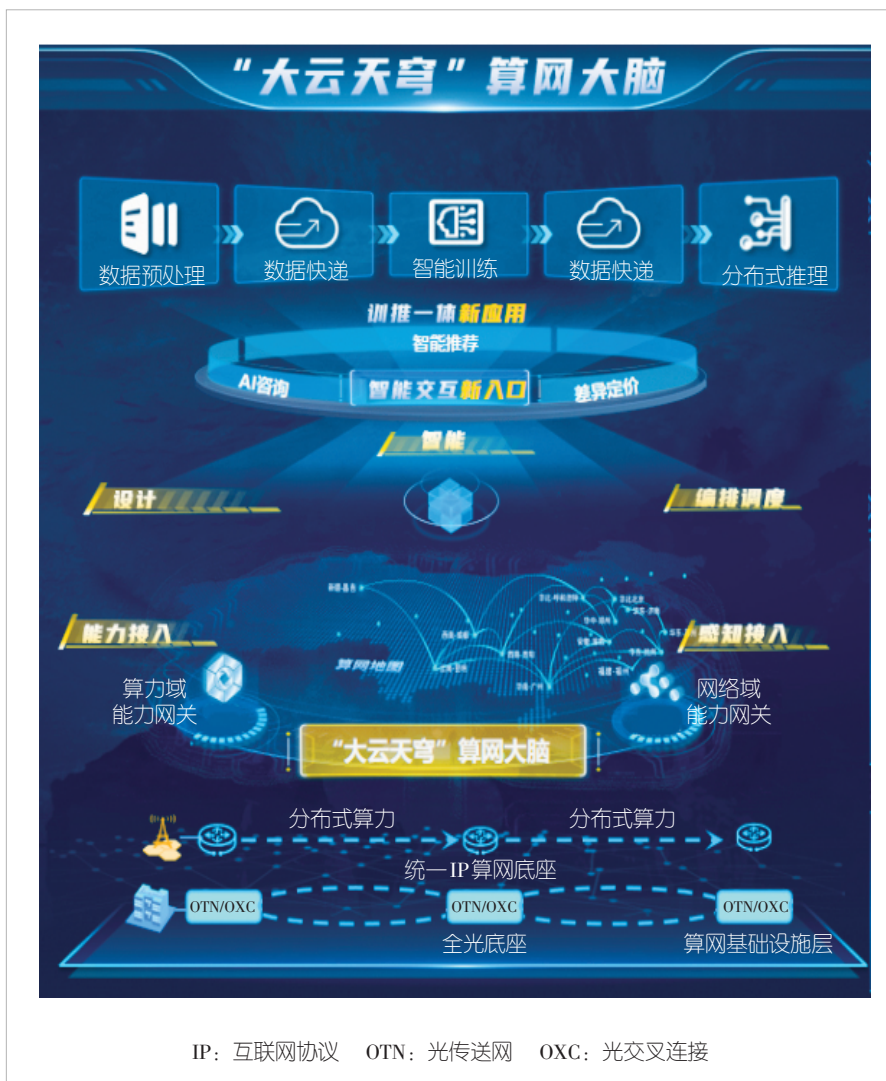


图2 “大云天穹”算网大脑体系架构示意图

源与软件架构先进性的综合评估体系，融合机器学习算法，构建了一种创新的算力资源管理与优化平台，并开展了模拟实验验证。该验证实验平台由算力度量模型、资源优化算法及动态调整机制3部分组成，依托算网大脑的智能调度能力，部分解决了传统算力度量方式单一、资源调度效率偏低及能源效率不高等问题。验证结果表明，所提出的“三元组”度量优化方法在提升资源利用率、降低运营成本、减少环境影响等方面具有显著效果，有助于数据中心与云计算平台实现资源的精细化管理。

3.1 算法与计算模型设计

1) 数据预处理与需求预测：收集并预处理算力系统相关数据，包括任务需求、资源状态、网络状况等，通过时序预测模型对算力需求进行预测。

2) 算法模型：构建基于机器学习的模型（如随机森林或神经网络），以各项度量指标为输入，输出综合评估分数。训练采用历史数据集进行交叉验证，优化模型参数，确保预测准确性。

3) 动态调整机制：集成在线学习模块，根据新数据实时调整模型权重，以适应硬件与软件架构的变化。权重因子可依据实时监控数据与反馈循环动态调整。例如，当系统检测到能源消耗过高时，可自动增加 w_2 的权重，以优化能源效率。

4) 参数赋权的动态监测与反馈机制：随着任务性质、资源状况及外部条件（如能源价格波动）的变化， w_1 、 w_2 、 w_3 的最优组合需进行动态调整。例如，在算力中心投产初期，系统可能更注重效率与时间（即较高的 w_1 和 w_3 ）；随着能耗数据的积累与节能目标的凸显， w_2 的比重可能上升。通过实时监测算力网络状态与任务执行情况，并结合反馈循环与机器学习机制，权重策略可不断优化，实现最佳资源分配，形成闭环优化，持续提升资源调度效果。

3.2 系统设计及体系模块架构

系统核心功能模块如下：

- 1) 用户界面：提供交互界面，直观展示算力资源的综合评分，并支持定制化查询与排序功能。
- 2) 数据输入/输出模块：支持用户手动或自动上传硬件配置、能耗及性能数据。

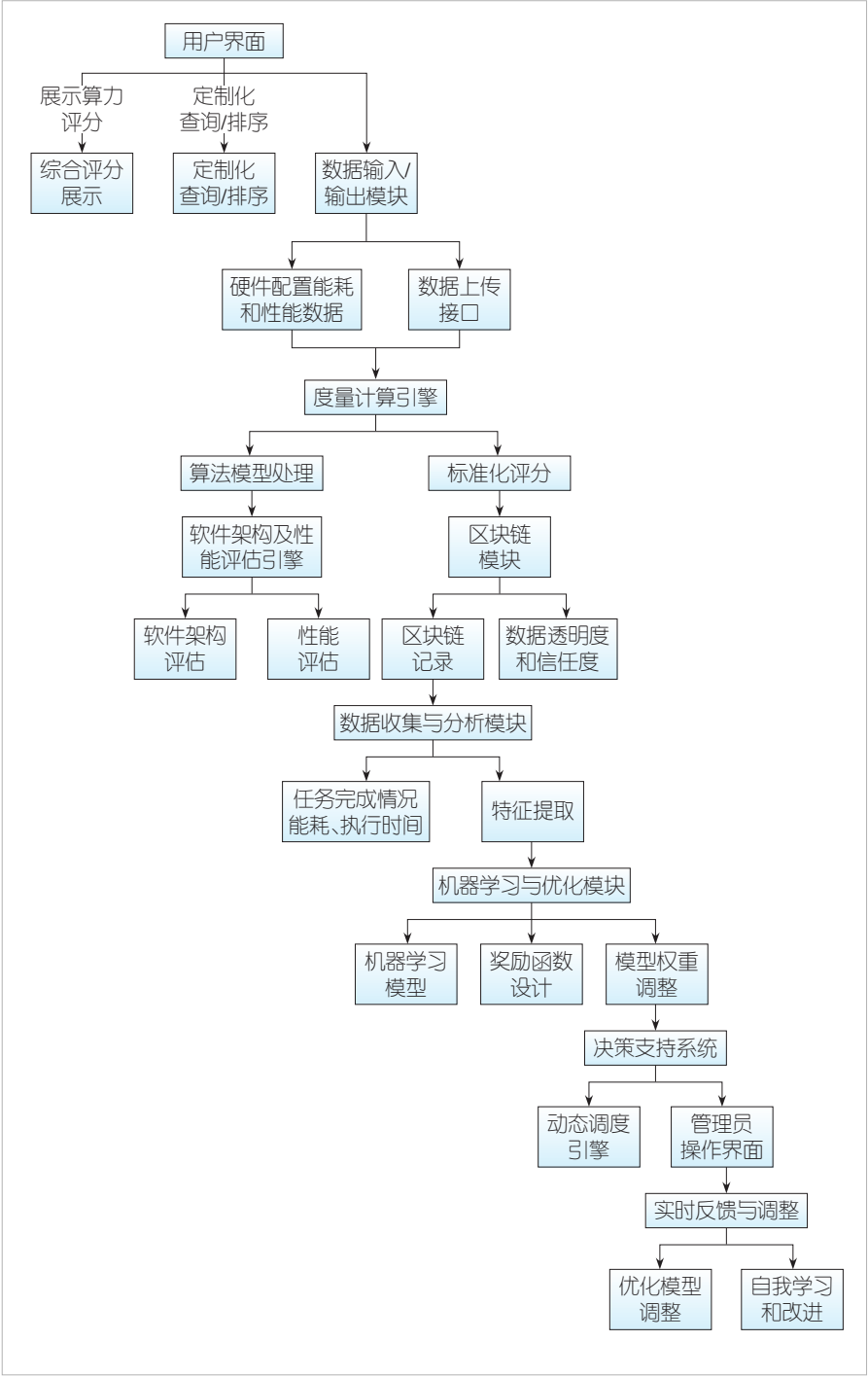


图3 系统核心功能模块及相互关系示意图

3) 度量计算引擎：内置基于信息-能源-时间三元组的算法模型，接收输入数据后，依据统一算力标识符进行处理，输出标准化的算力评分。

4) 软件架构及性能评估引擎：集成代码分析工具，支持计算引擎与业务算法的智能解耦，自动评估软件架构的先进性与性能。

5) 区块链模块：采用区块链技术（私有链）实现数据存证，记录硬件状态与调度决策，通过智能合约自动执行权重更新。

6) 数据收集与分析模块：实时监控并收集算力资源的运行数据，从中提取关键特征。

7) 机器学习与优化模块：设计并训练机器学习模型，实现权重的自动调整与多目标奖励函数的优化。

8) 决策支持系统：基于当前权重与实时数据，动态调整算力资源分配策略，并提供管理员操作界面。

9) 实时反馈与调整：形成闭环控制，根据任务执行后的反馈持续优化模型，实现自我学习与迭代改进。

系统具体功能模块及其相互关系示意如图3所示。

3.3 仿真实验验证

3.3.1 实验目的与评价指标

本文验证了基于“信息-能源-时间”三元组的归一化评分模型在异构资源池调度中的理论有效性，分析了不同权重配置策略下的硬件选择差异，并对比了软件生态存在差距场景下的模型表现。实验通过测算综合得分 S ，考察不同策略下首选硬件的变化以及模型的区分能力。

3.3.2 实验设计与实验场景

1) 实验采用包含两款 GPU 设备的异构资源池：NVIDIA A10（FP16 125 TFLOPS、150W TDP、能效比 0.83 TFLOPS/W）与华为昇腾 910B（FP16 320 TFLOPS、310W TDP、能效比 1.03 TFLOPS/W）。两款设备性能接近但架构不同，用于验证三元组模型在不同维度权重下的选择逻辑。

2) FP16算力、功耗及能效比数据来源于公开参数。

3) 执行时间定义为完成单次 epoch 训练所需的时间

(s)。基于本文定义的基准测试任务（ResNet-50 模型、ImageNet 数据集、批次大小 256、FP16 混合精度训练），NVIDIA A10 的执行时间为 320 s/epoch，华为昇腾 910B 的执行时间为 380 s/epoch。

3.3.3 实验权重配置

为展示三元组模型各维度的主导作用，实验采用特征化的权重配置，具体如表3所示。

3.3.4 实验结果

仿真实验结果如表4、表5所示，由此可得出以下结论：

1) 不同权重策略对应不同的 GPU 选择，这表明模型能够有效区分各维度的贡献。当硬件在各维度上各有优势时，模型支持基于权重配置实现差异化选择。

2) 三元组模型适用于同类型硬件资源池，而对于不同硬件类型之间的比较，需考虑软件适配度差异。

3) 在软件栈统一的场景下，差异化选择难度较大，模型的核心价值在于正确识别综合最优设备。

4) S 值是“硬件 \times 任务”的联合属性。进行算力评估时，必须明确所针对的任务类型；在调度决策中，应优先考虑任务与硬件的匹配度，而非单纯比较不同硬件的 S 值。

表3 特征化的权重配置

策略	权重配置(w_1, w_2, w_3)	适用场景	配置意图
算力优先	(0.8, 0.1, 0.1)	大规模 AI 训练	算力维度主导选择
能效优先	(0.1, 0.8, 0.1)	绿色数据中心	能效维度主导选择
时间优先	(0.1, 0.1, 0.8)	实时推理服务	时间维度主导选择
均衡策略	(0.34, 0.33, 0.33)	通用计算场景	各维度均衡评估

AI: 人工智能 CPU: 中央处理器 GPU: 图形处理器

表4 GPU各维度归一化得分

GPU 型号	I_{norm} (算力)	η_{norm} (能效)	T_{norm} (时间)	维度优势
NVIDIA A10	0.390 6	0.805 8	1.000 0	时间维度领先
华为昇腾 910B	1.000 0	1.000 0	0.842 1	算力、能效维度领先

CPU: 中央处理器 GPU: 图形处理器

表5 GPU4种策略综合得分对比

策略	权重(w_1, w_2, w_3)	首选 GPU	综合得分 S	A10 得分	昇腾得分	选择依据
算力优先	(0.8, 0.1, 0.1)	昇腾 910B	0.984 2	0.492 6	0.984 2	$I_{\text{norm}}=1.0$, 算力维度满分占优
能效优先	(0.1, 0.8, 0.1)	昇腾 910B	0.984 2	0.783 8	0.984 2	$\eta_{\text{norm}}=1.0$, 能效维度满分占优
时间优先	(0.1, 0.1, 0.8)	NVIDIA A10	0.919 6	0.919 6	0.873 6	$T_{\text{norm}}=1.0$, 时间维度满分占优
均衡策略	(0.34, 0.33, 0.33)	昇腾 910B	0.947 9	0.728 6	0.947 9	综合各维度评估, 算力+能效优势明显

GPU: 图形处理器

4 结束语

本文提出一种基于“信息-能源-时间”三元组的算力资源综合度量与优化方法。通过构建以最优硬件为基准的归一化评分模型，实现算力资源的标准化度量与场景化优化配置。该模型首次将三要素统一为可量化的算力评分，引入可解释的权重分配机制，支持算力优先、能效优先、时间优先等场景化策略切换，从而更精细地匹配任务需求与算力资源，同时兼顾能耗效率。

当前工作的主要局限在于：实验仅基于单一数据中心，尚未验证跨域调度效果；权重设定仍依赖人工经验初值。

下一步研究计划包括：1) 构建跨域试验环境，验证模型在“东数西算”跨枢纽场景下的效果；2) 引入强化学习自动搜索最优权重组合，减少人工干预；3) 与行业联盟合作，推动算力网络标准化认证，加快速度量模型与资源管理方案的标准化进程，促进“信息-能源-时间”三元组指标成为算力交易的行业标准。

综上所述，本文构建了一种可随技术进步与市场变化持续优化的综合算力资源度量与分配方法，验证了所提评估框架的有效性与竞争力。通过标准化度量、算法优化、系统设计与自动化赋权，为“东数西算”工程提供了一种可参考的技术方案，能够满足远期算力网络调度需求，具备一定的理论价值与工程落地可行性。

参考文献

- [1] 苗青, 归律, 张开飞, 等. 算力网络与“东数西算”工程实践 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2023
- [2] Radovanovic A, Koningstein R, Schneider L, et al. Carbon-aware computing framework [PP/OL]. arXiv(2021-06-11)[2026-02-18]. <https://arxiv.org/abs/2106.11750>
- [3] Microsoft. Resource central: AI-driven datacenter efficiency [R]. Microsoft Research, 2022
- [4] 阿里云. 绿色计算白皮书: 面向碳中和的云资源调度 [R]. 2023
- [5] 华为. 全栈AI能效优化技术白皮书 [R]. 2022
- [6] 中国移动通信集团有限公司. 算力网络白皮书 [R]. 2021
- [7] 工业和信息化部电子第五研究所. 异构融合计算技术白皮书(2023年)[R]. 2023

作者简介



刘超清，中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师；主要研究方向为算力网络、业务网、AI领域关键技术等。



周丹媛，中国移动通信集团有限公司项目经理；主要研究方向为云计算和人工智能技术、高性能网络等。



缪政，中移（苏州）软件技术有限公司计划部工程师；主要研究方向为分布式存储、混合云、绿色低碳与成本优化等。



丁亦志，中国移动通信集团设计院有限公司正高级工程师；主要研究方向为业务网、算力网络、信息能源融合关键技术等。



武振宇，中国移动通信集团设计院有限公司高级工程师；主要研究方向为算力网络、智算中心等。

5G网络运营安全管理系统研究与实践



Research and Practice of 5G Network Operation Security Management System

任若冰/Ren Ruobing¹, 费明/Fei Ming¹, 贾国祖/Jia Guozu¹,
许晨敏/Xu Chenmin², 郝振武/Hao Zhenwu³

(1. 中国移动通信集团广东有限公司, 中国 广州 510623;

2. 北京兴云数科技术有限公司, 中国 北京 100176;

3. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)

(1. China Mobile Group Guangdong Co., Ltd., Guangzhou 510623, China;

2. Beijing Xingyun Digital Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China;

3. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202602012

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20240926.1042.002>

网络出版日期: 2024-09-26

收稿日期: 2024-06-25

摘要: 基于内生安全理念, 提出并构建了一个面向5G网络的安全中心, 设计并实现了一套5G网络运营安全管理系统。该系统解决了5G安全数据采集的关键问题, 能够为5G专网运营提供一套具备智能闭环处置能力的安全运营管理体系。应用结果表明, 该系统有效提升了5G网络安全防护效能, 保障了5G行业应用与网络基础设施的安全, 为5G行业应用的安全落地提供了坚实的技术支撑。

关键词: 内生安全; 5G网络安全中心; 5G安全信息与事件管理(SIEM); 主机安全

Abstract: Based on the concept of endogenous security, a 5G network security center is proposed and constructed, and a security management system for 5G network operation is designed and implemented. This system addresses the key issue of 5G security data collection and provides an intelligent closed-loop disposal mechanism for secure operation management of 5G private networks. Practical application shows that the system effectively enhances the security protection capability of 5G networks, safeguards both 5G industry applications and network infrastructure, and provides solid technical support for the secure deployment of 5G industry applications.

Keywords: endogenous security; 5G network security center; 5G Security Information and Event Management (SIEM); host security

引用格式: 任若冰, 费明, 贾国祖, 等. 5G网络运营安全管理系统研究与实践 [J]. 中兴通讯技术, 2026, 32(2): 81-90. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602012

Citation: Ren R B, Fei M, Jia G Z, et al. Research and practice of 5G network operation security management system [J]. ZTE technology journal, 2026, 32(2): 81-90. DOI: 10.12142/ZTETJ.202602012

5G将增强移动宽带、高可靠低时延、低功耗大连接三大应用场景作为其核心需求, 其泛在的终端接入能力、面向多样化业务的强大承载能力、差异化的安全隔离能力, 能够为各类垂直行业客户打造定制化的虚拟专网, 满足电力、交通、工业、能源等客户对通信网络的差异化诉求, 从而持续不断地推动行业创新业务及商用模式的快速发展。但是, 在垂直行业网络中引入5G, 打破了企业传统的相对封闭、可信的网络环境, 加剧了网络安全风险。

因此, 5G在行业的规模化应用, 必须按需为5G网络提供安全能力, 保证工业互联网、车联网、物联网等网络安全。同时, 需要充分灵活地应用5G基础设施以及围绕5G网络的创新所带来的新技术与新能力, 使5G网络与垂直行业的安全充分受益。中国移动作为5G网络运营商, 必须落实

5G网络安全防护职责, 研究5G网络运营安全管理策略, 打造5G网络运营安全管理体系, 建设满足监管要求的安全可靠5G网络。

1 5G网络运营安全挑战

随着5G的规模商用及在垂直行业中的普及, 行业应用将吸引更多恶意攻击, 诸如电力、交通、工业制造、能源、金融等关键领域的高价值资产将成为首要攻击目标, 并可能给国家、社会和企业带来严重的风险。

垂直行业5G专网引入了5G网络切片、网络功能虚拟化(NFV)、多接入边缘计算(MEC)等新技术, 在支持智能网络服务定制的同时, 也打破了传统企业网络相对封闭可信的环境^[1], 引入了新的责任主体, 导致信任模型、网络基础设

施及网络边界复杂化。当前,5G网络运营安全面临如下挑战:

挑战1:为大力推动5G行业应用的普及与落地,需落实具备统一管理策略与有效监控手段的5G网络运营安全管理系统,形成一套目标明确、过程规范、多方协同、可复制推广、智能化、自动化的安全运营管理体系,打消各行业客户在使用5G专网产品时的安全顾虑,减少5G推广过程中由新技术、新模式所造成的安全阻力。

挑战2:在5G专网安全运营阶段,明确安全责任边界和识别各环节存在的安全风险至关重要,通过采取有效的安全防护措施确保5G网络稳定运行和资产安全。

挑战3:5G网络安全运营的基础是安全数据采集。全面地采集与分析5G网络安全相关的数据,对于发现和预防网络攻击、提高网络安全性与稳定性具有重要意义。

2 5G网络运营安全管理策略研究

为建设一个安全的5G网络,应对5G引入后带来的安全威胁,必须以中国相关安全政策、标准、规范为指导原则,以纵深防御思想为核心,采用先进设计理念与专业安全设备,形成完善的综合网络安全防护体系,避免来自各种目的的攻击、干扰和非法访问问题,全面满足网络安全等级保护需求及网络安全管理战略目标。

本文基于广东移动5G垂直行业业务场景,结合5G专网运营模式展开研究,提出5G网络运营安全管理总体策略,具体包括:

1)一体化的安全运营体系与管理策略。结合广东移动态势感知平台的能力与规划,提出可融入广东移动5G网络安全运营体系的安全建设方案及安全管理策略。基于三层模式构建一体化5G网络运营安全管理系统,通过大中小三层安全闭环,实现资产管理、脆弱性分析、威胁分析、合规检测等功能。从网络与系统的视角对5G网络中各类资产进行统一安全管理,避免多个系统各自孤立的情况。该系统既能满足广东移动安全管理的需要,也能满足5G网络和行业客户的安全需求。

2)专业的5G网络安全防护策略。开展5G网络安全风险与需求分析,明确安全责任边界,将5G专网划分为不同区域,在不同区域之间实现网络隔离与边界安全防护,并建立安全传输通道,同时通过在关键节点部署安全设备,提高专网网络韧性,从网元接入、边界防护、安全隔离、数据传输、MEC安全等方面开展安全防护策略研究。

3)全面的5G网络安全数据采集与预处理策略。全面采集5G网络安全数据,支持采集5G网络中的5G网元、安全

设备、安全系统的资产数据、系统状态、流量数据、日志数据、安全数据等,支持多种协议接口,实现对数据的采集、预处理、分层建模与汇聚,同时具备向上级态势感知平台转发功能,通过算法模型将分析后的数据进行关联分析和汇聚呈现,提高数据共享效率与安全事件响应效率,打造安全合规的5G网络。

2.1 5G网络运营安全管理体系与方案研究

为了解决5G网络缺乏有效安全防护手段、5G安全运营缺乏有效监控手段这两大痛点,本文中我们开展了基于5G网络运营安全管理总体策略的研究,与广东移动安全管理与技术体系相结合,与已建设运营的态势感知平台、大网流量监测等手段相结合,研发5G基础网络设施和5G应用安全防护方案,并在电力、政务等安全要求高的行业专网,开展试点验证,增强5G专网防护水平^[2]。同时,在广东移动现有5G网管平台、统一采集平台、态势感知平台的基础上,构建5G网络运营安全管理体系^[3],建设5G网络运营安全管理系统,实现5G专网安全数据采集与威胁检测,实现专网安全“可见可管可控”,如图1所示。

与传统信息技术(IT)网络的态势感知平台不同,5G网络因为虚拟化、网络切片、MEC等新技术,具有云化、非云化等特点。5G网络运营安全管理系统需要深入分析和研究5G网络场景下带来的网络安全风险,梳理和明确省级态势感知平台需要采集的数据。

5G网络运营安全管理系统从5G网络网元、安全设备、流量采集探针、资产安全管理平台等采集数据,并与公共漏洞发布平台等对接获取漏洞及威胁情报,然后结合5G网络具体架构与场景进行安全分析,建立评估模型和评估指标,对5G网络进行安全评估、安全态势预警及处置。

我们基于三层模式完成5G网络运营安全管理方案的研究,通过整网端到端全局、单域和设备网元层形成大中小三层安全闭环的能力,完成各个层次下的数据采集方式、能力和要求的研究^[4]。结合广东移动5G网络安全运营要求,指导5G网络数据采集能力的实现和5G网络安全运营工作的开展,如图2所示。

其中,三层安全闭环指的是:

1)大闭环:通过整网端到端的全局闭环,进行安全事件与资产等的关联分析、安全响应与处置联动,实现5G网络安全风险和态势的统一呈现。

2)中闭环:通过网管与网元的单域自闭环,支持网元上报采集信息和网管下发安全策略,无须依赖上级态势感知平台。

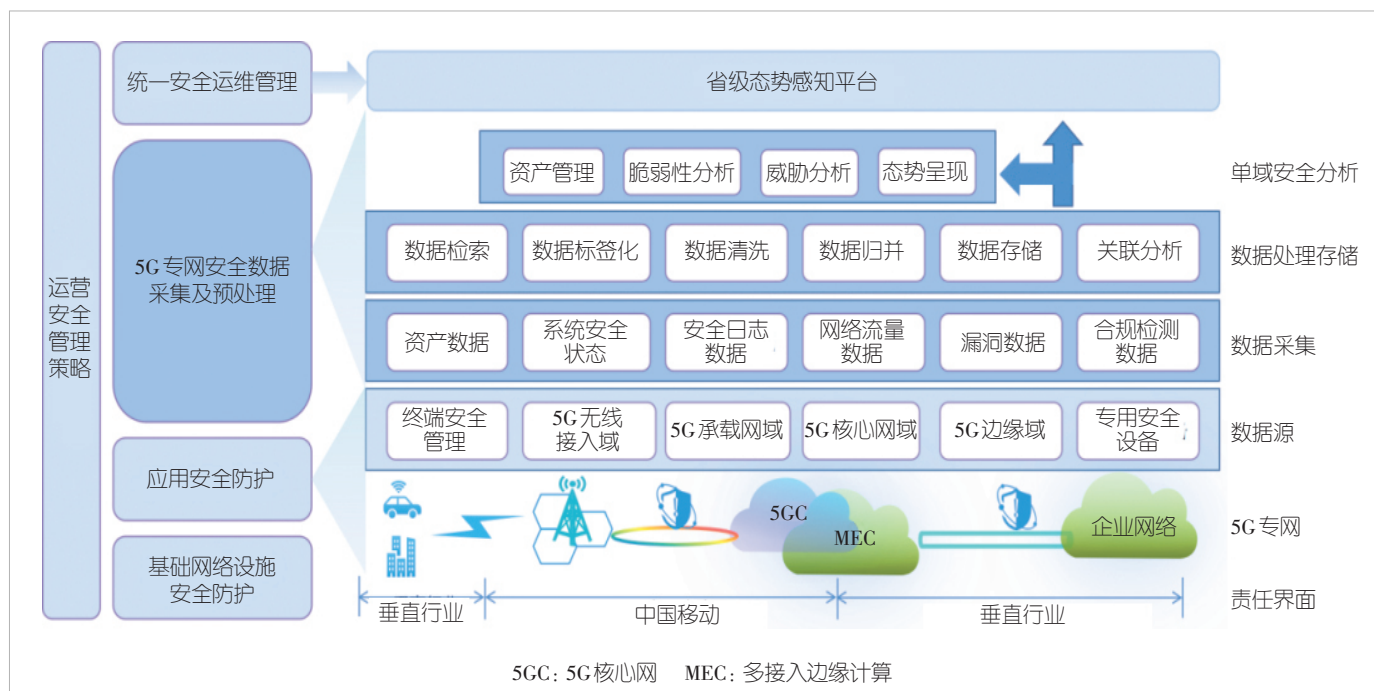


图1 5G网络运营安全管理体系架构

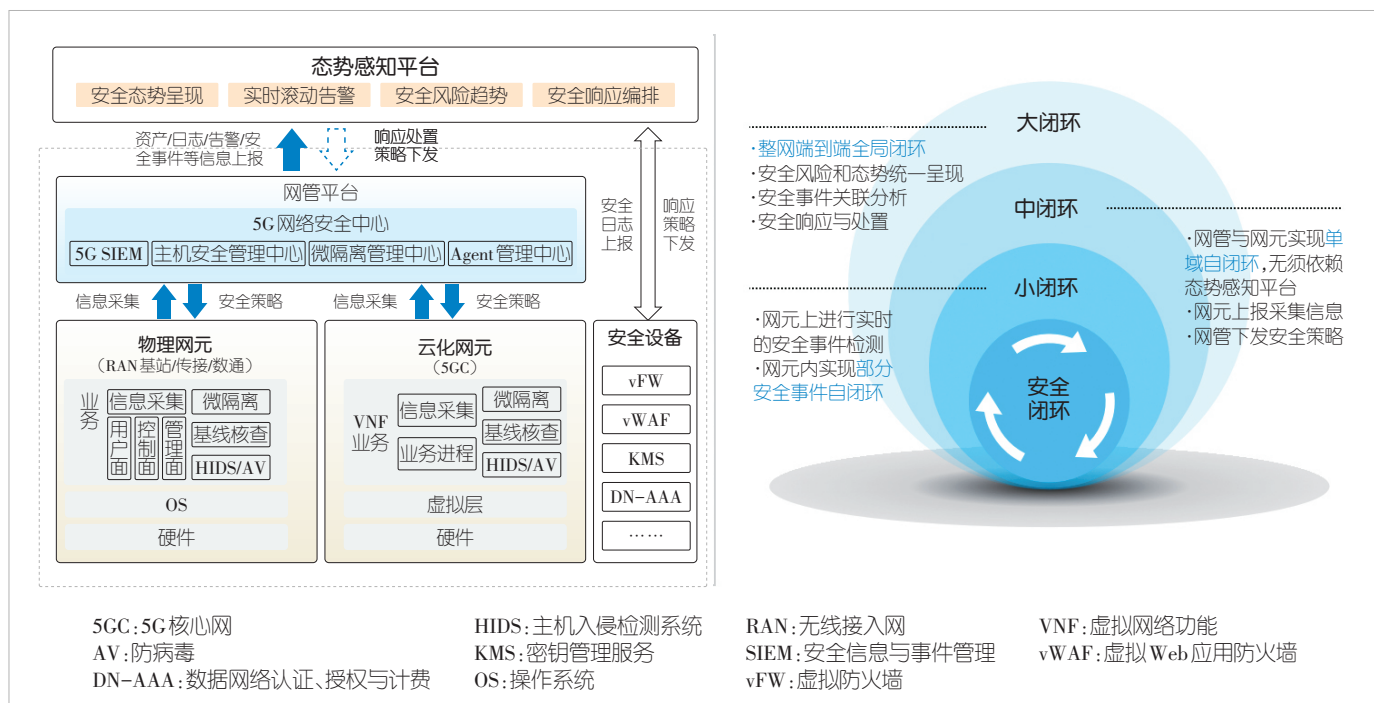


图2 基于三层模式的5G网络运营安全管理方案

3) 小闭环: 通过在网元上进行实时安全事件检测与拦截, 在网元内部实现部分安全事件自闭环。

2.2 5G网络安全防护方案研究

针对引入5G专网的企业, 我们研究安全责任边界划分,

具体如图3所示:

1) 运营商界面: 园区内从5G空口至MEC站点用户面功能 (UPF) 网元N6出口之间的端到端5G网络属于运营商资产, 包括基站、UPF、MEC平台、传输和承载设备, 运营商保证其安全性。

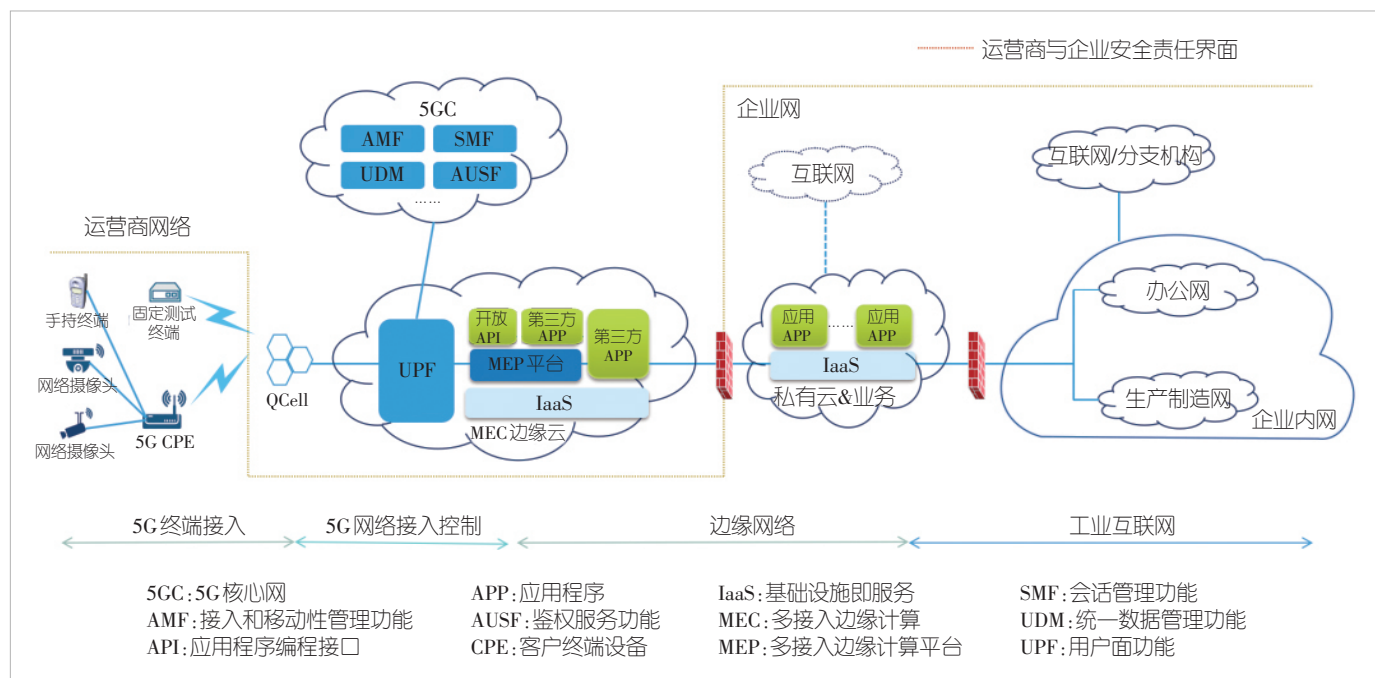


图3 5G专网安全责任边界

2) 企业客户界面：园区内的生产设备、5G终端、私有云承载的应用程序（APP）及其虚拟机（VM）属于企业资产，企业保证其安全性。

我们从5个方面对5G网络安全防护方案开展了研究：

1) 网元安全防护：MEC、UPF、基站、切片分组网（SPN）等作为组成5G专网的关键网元设备，通过强化N4/N6接口、安全配置核查、异常行为分析、入侵检测、网际协议安全（IPSec）通道认证和加密强度等方式保障网元设备自身安全。

2) 网络边界防护：在N3/N4/N6等重要接口和网络边缘、终端侧等风险暴露面，部署防火墙、入侵防御系统（IPS）、蜜罐等安全设备，强化分布式拒绝服务（DDoS）、安全检测以及全流量等防御能力，相关安全告警统一纳入态势感知平台监测分析，强化5G网络边界安全防护手段与管理能力。

3) 网络安全隔离：构建彼此隔离的5G网络切片，在无线接入网侧划分无线频谱和基站处理资源，在承载侧采用软隔离和硬隔离技术，在核心网侧采用接入策略控制、相互认证和安全隧道等方式实现安全隔离。

4) 网络传输安全防护：对于N3/N6接口通过IPSec对传输的数据进行机密性和完整性保护；对于N4接口通过对传输的信令进行机密性和完整性保护；对于N6/N9接口，数据面承载通过防火墙隔离和保护，以保护核心网网络安全。

5) MEC安全防护：部署云安全管理中心，采用多层接

入访问控制、内网隔离等手段，保障行业用户数据安全存储与访问，实现应用和数据全生命周期安全管理。

2.3 5G网络安全数据采集及预处理方案研究

5G网络安全数据采集及预处理方案确定了数据源的采集方案，开展对不同厂家的5G网元、网管、安全设备、安全系统等相关安全数据的研究，依据标准规范完成数据预处理关键技术的试验验证，实现5G网络运营安全管理的总体目标，支撑5G网络运营安全管理系统的建设和演进。

5G网络安全数据采集范围包括：

1) 5G网元安全数据采集：支持对5G核心网（5GC）、5G无线接入网（RAN）、MEC、5G终端等网元数据的采集。

2) 安全资产数据采集：安全资产数据覆盖范围广泛，需要支持对网元网管设备资产、网络设备资产、主机资产、安全设备资产、物联网资产、办公外设资产、应用系统资产、支撑系统资产、软件类资产等资产数据的采集。

3) 单域态势感知数据采集：在网管侧实现内生单域安全运维管理能力，构建支持感知业务的安全检测、响应处置和安全策略编排能力，对网元、网管自身的攻击入侵、软件篡改、恶意操作等安全事件和基线核查结果进行采集。

4) 专网平台类产品数据采集：调研分析5G专网场景中的平台类产品，研究并采集具有价值的平台上的数据。

5) 非IT类安全数据采集：支持对非云化网元、硬件网络设备等非IT类安全资产上的网络安全基础信息的采集。

2.3.1 应用场景研究

由于不同应用场景组网方式、设备部署等存在差异,需要研究在不同部署场景下采集的数据内容。应用场景可划分为单域态感、多域态感和运营技术(OT)域态感3种,如图4所示。

1) 单域态感应用场景:5G网络安全中心作为单域网管的内置组件部署,并在网元中部署安全代理Agent,支持管理单域内的5G RAN网元、5GC网元等。5G网络安全中心与网管集成部署,通过Agent采集单域内网元的资产数据、日志与安全事件,数据经处理、存储与单域安全分析后,支持北向接口上报至运营商省级态势感知平台。

2) 多域态感应用场景:当不同域间网络互通时,5G网络安全中心作为独立系统部署,并在网管和网元中部署安全代理Agent,支持管理不同域的网元、网管等。5G网络安全中心与网管分离部署,对接多个网管系统,通过Agent采集不同域的网管、网元的资产数据、日志与安全事件,数据经过处理、存储与多域关联分析后,支持北向接口上报至运营商省级态势感知平台。

3) OT域态感应用场景:5G网络安全中心作为独立系统部署,并在5GC下沉网元、多接入边缘计算平台(MEP)、虚拟机和业务应用系统中部署安全代理Agent,支持管理5GC下沉网元、终端安全管理系统、NodeEngine、流量探针、安全设备等。5G网络安全中心对接多种系统与安全设备,通

过Agent采集5G终端状态、资产和流量数据、日志与安全事件,数据经过处理、存储、威胁分析与响应联动,支持北向接口上报至企业态势感知平台。

2.3.2 数据采集及预处理策略研究

1) 资产采集策略

5G网络架构基于云化部署并采用服务化架构,使得5G网络架构中的资产种类更为广泛,资产逻辑关联关系更为复杂^[5]。与传统互联网或办公网的资产类别对比,5G网络中还包括了切片、虚拟网络功能(VNF)网元等多种资产信息。通过采集全面的5G网络资产信息,确定5G网络中关键资产逻辑关系,绘制清晰的网络拓扑关系图,实现5G网络资产的关联管理,及时了解5G网络中漏洞或威胁对资产的波及影响,如图5所示。

2) 安全数据采集策略

传统安全分析检测技术都是单一能力的,例如日志检测类产品、操作系统(OS)、安全检测类产品、网络检测类产品等等,这种割裂的技术方案不能直接、准确地获得安全分析结果,而是需要安全运维专家查看多个检测平台并综合分析结果。然而,5G专网网元分布在运营商大网外,网元自身受到大网网管的管理,可在网管侧实现内生单域安全运维管理能力,构建感知业务的安全检测与响应、安全策略编排的能力,对网元、网管自身遇到的攻击入侵、软件篡改、恶

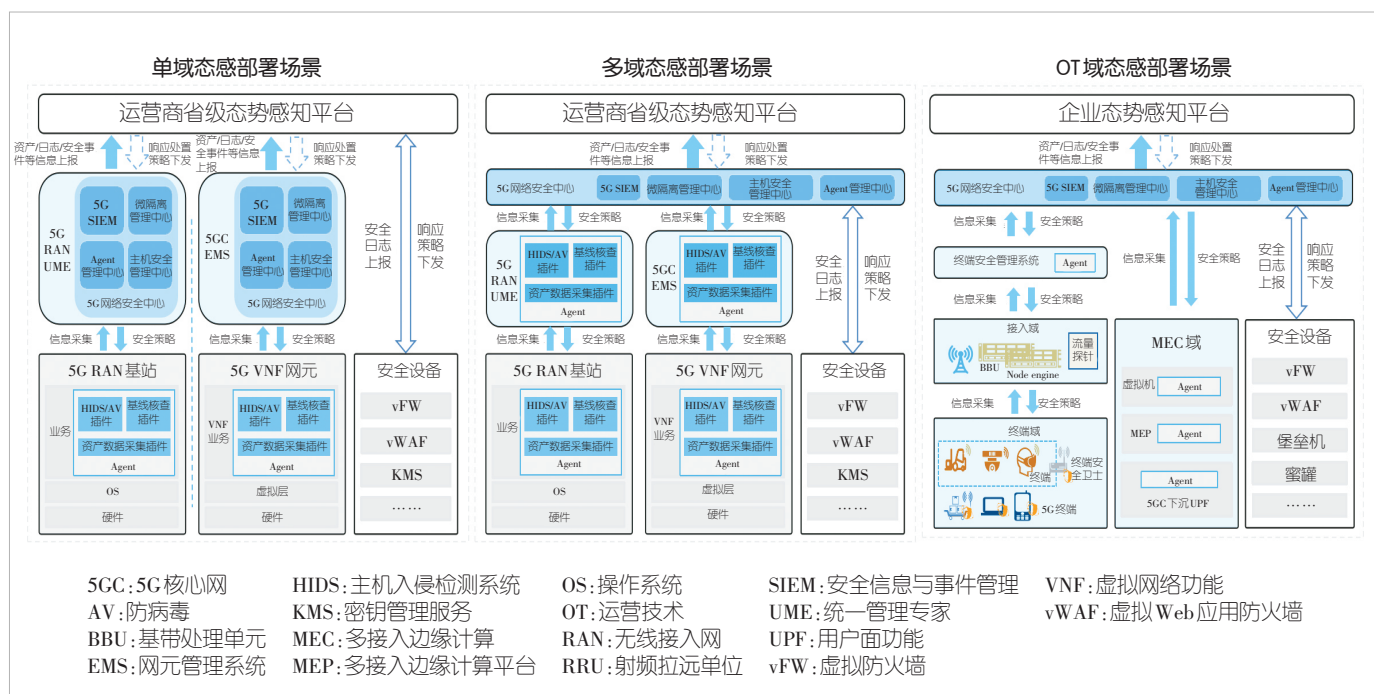


图4 5G专网安全数据采集应用场景

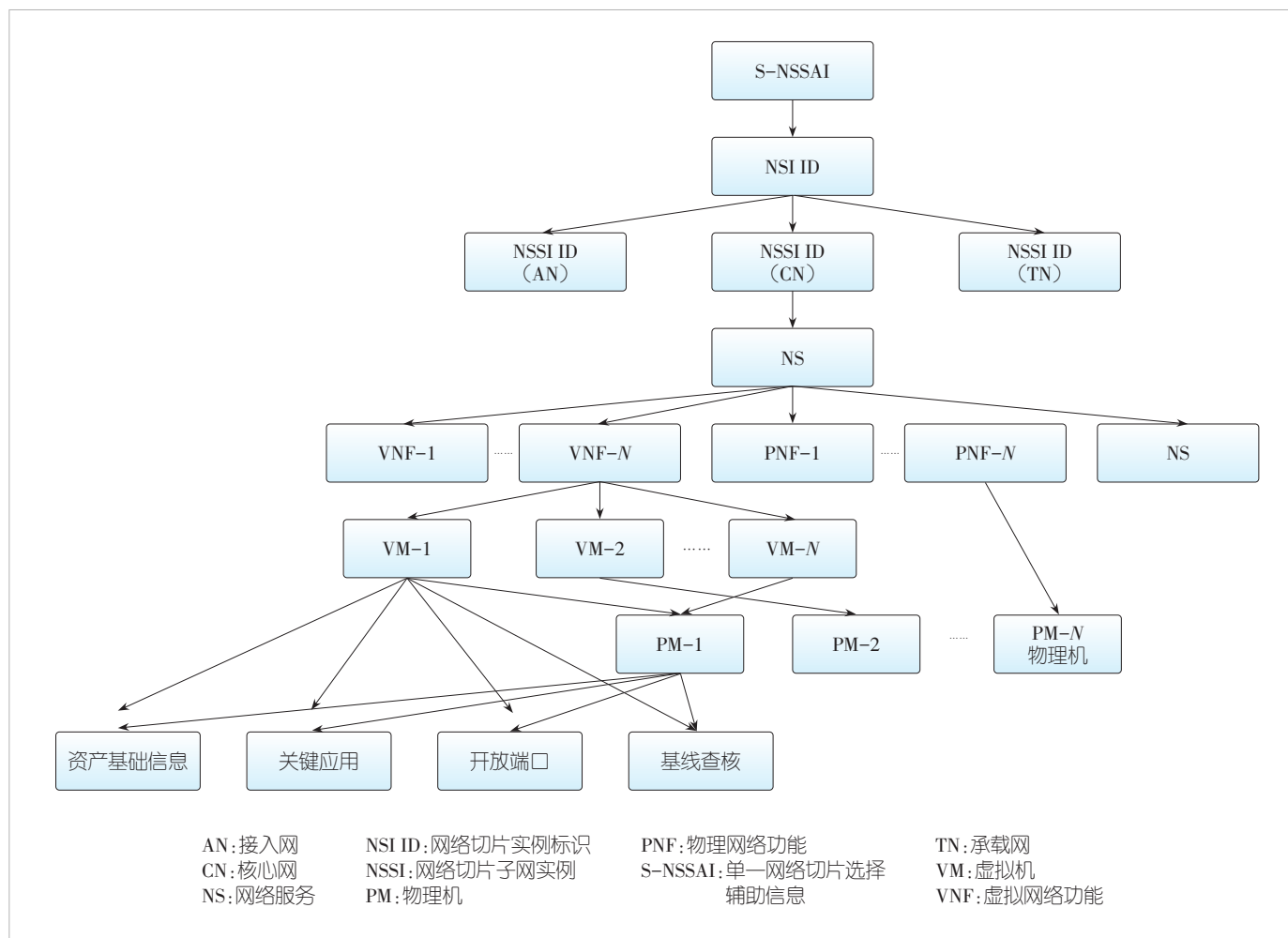


图5 5G网络中关键资产逻辑关系

意操作等安全事件，实现“分钟级”的快速感知，提高对业务和系统的安全配置合规管理能力。

5G网元作为5G网络关键业务设备，需要采集的安全数据主要包括以下两种：

(1) 按IT类安全资产上报的5G安全数据，具体包括：云化部署的网元、网管系统、通信技术（CT）云主机等。其中，云化部署的网元和系统一般包含虚拟机，为了清楚标注网元或系统和虚拟机的关系，故单独归类。因此，IT类安全资产按照部署形式，可分为云化部署的网元和系统，以及CT云主机两类，分别采用不同的格式上报5G安全数据。

(2) 按非IT类安全资产上报的5G安全数据，具体包括：非云化网元、非云化网管系统和网络设备。

3) 日志采集与解析策略

5G网络运营安全管理系统需要支持各种日志的采集与解析，包括从主机、网元采集的系统日志，从数据库、中间

件、Web应用采集的应用日志，从5G RAN、承载网、核心网等管理维护系统采集的告警日志、操作日志等，从防火墙、IPS、入侵检测系统（IDS）、Web应用防火墙（WAF）、堡垒机、蜜罐等安全设备采集的会话审计日志、主机操作日志、门户登录日志、流量元数据、信令元数据、告警数据和日志数据等。

4) 数据预处理策略

针对5G网络运营安全管理系统采集的不同厂家，不同类型的5G网元、5G网管、网络安全设备、安全系统等数据通过数据预处理，可以将数据的类型、内容、格式进行规范化，实现安全数据共享。

该策略的设计思路如下：

(1) 数据采集预处理：即从各个数据源将数据采集汇聚并加以归一化、标准化等预处理。

(2) 数据清洗和标准化：支持对采集的日志数据进行清

洗和标准化。

(3) 日志清洗: 能够对数据存在的错误、不完整、无效等问题进行清洗。支持配置日志过滤规则实现对日志的过滤清洗。过滤规则可存在多种方式: 关键字或关键字组合、条件运算、正则匹配、表达式计算等。

(4) 日志标准化: 支持对采集的各类异构日志进行统一格式化处理, 并保存原始数据。支持分隔符、键值对、JavaScript 对象表示法 (JSON) 等多种格式日志解析, 并可通过正则表达式对格式不规则日志进行解析。支持根据每类日志的标准定义字段规则, 对日志解析提取到的字段进行标准化。

5) 数据上报策略

5G 网络运营安全管理系统应能将 5G 网络资产信息、安全事件、日志等信息上报给上级态势感知平台, 上报方式包括:

(1) 安全文件传输协议 (Sftp) 方式: 系统将资产信息按 JSON 格式存为文件, 提供 Sftp 服务供上层系统调用。资产文件定期更新, 可反映最新资产状态。

(2) 具有表述性状态转移特性的 (RESTful) 接口方式: 支持实时查询当前资产信息, 包括资产类型、属性、状态等。除了资产信息, 还能够查询资产漏洞和威胁信息等。

(3) Syslog 接口方式: 除了提供查询接口外, 系统应能提供信息主动上报功能, 在安全事件发生时, 以 syslog 形式上报事件信息, 信息内容包括事件名称、类型、互联网协议 (IP) 地址等。

3 5G 网络运营安全管理系统实践

广州南方电网 5G 专网是典型的 5G 下沉专网, 是“5G+数字电网”垂直行业应用标杆。根据前文的策略研究, 我们选择在广州南方电网 5G 专网进行 5G 网络运营安全管理系统试点实践。其中, 5G 网络运营安全管理系统包括无线基站、5G 核心网网元 (下沉 L 型 UPF)、5G RAN 统一管理专家 (UME) 网管、5GC 网元管理系统 (EMS) 网管、5G 网络安全中心, 以及统一采集平台和省态势感知平台。

广州南方电网试点项目采用多域部署方式, 如图 6 所示, 新建一套 5G 网络

安全中心, 通过对接 5G RAN UME 和 5GC EMS 网管, 采集资产数据、基线核查结果与安全事件; 北向对接统一采集平台与省态势感知平台, 进行数据上报与响应处置策略下发, 实现试点 5G 专网安全状态可感知。

根据内生安全理念, 中国移动与中兴通讯等厂商合作, 规划设计并落实 5G 网络运营安全管理系统, 推出了 5G 网络安全中心, 通过在网管与网元中内置安全代理 (Agent), 实现资产管理、基线核查、主机入侵检测、防病毒检测、安全分析、态势呈现等内生安全功能^[6], 如图 7 所示。

5G 网络运营安全管理系统如图 8 所示, 其中 5G 网络安全中心具体包括:

- 1) 安全态势感知中心: 实现资产管理、安全信息采集、威胁分析、态势呈现, 进一步融入响应处置功能。
- 2) 主机安全管理中心: 实现资产数据采集、主机入侵检测、防病毒检测、基线核查等安全插件策略管理。
- 3) Agent 管理中心: 实现安全中心策略下发、Agent 版本更新与插件管理等功能。
- 4) 安全代理: 接收并执行 Agent 管理中心下发指令, 实现数据采集/告警上报等功能。

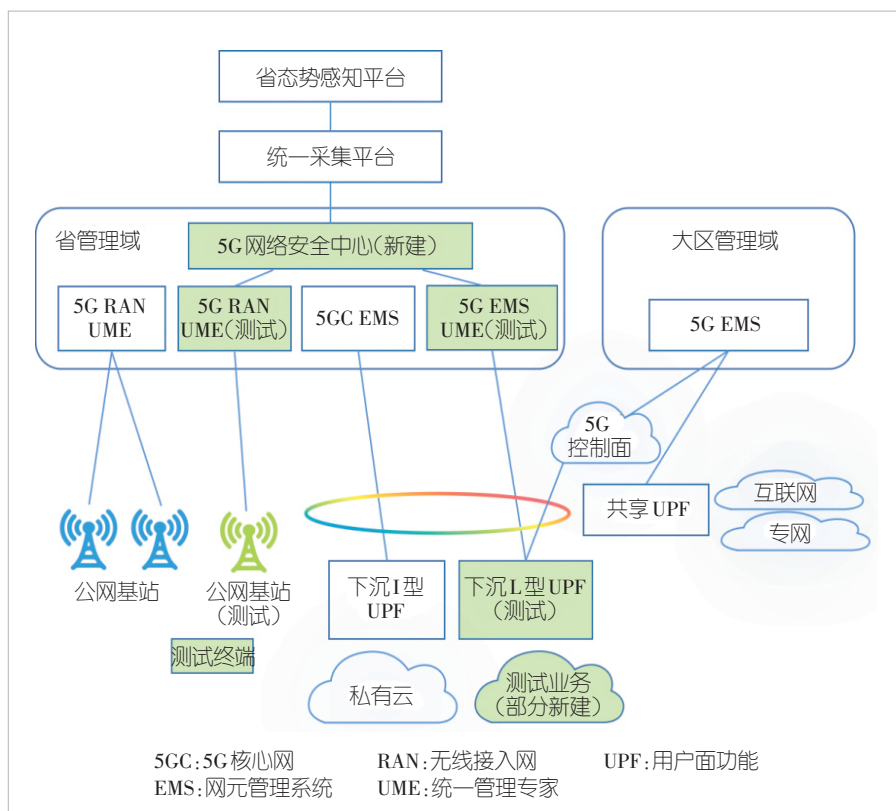


图6 广州南方电网试点项目

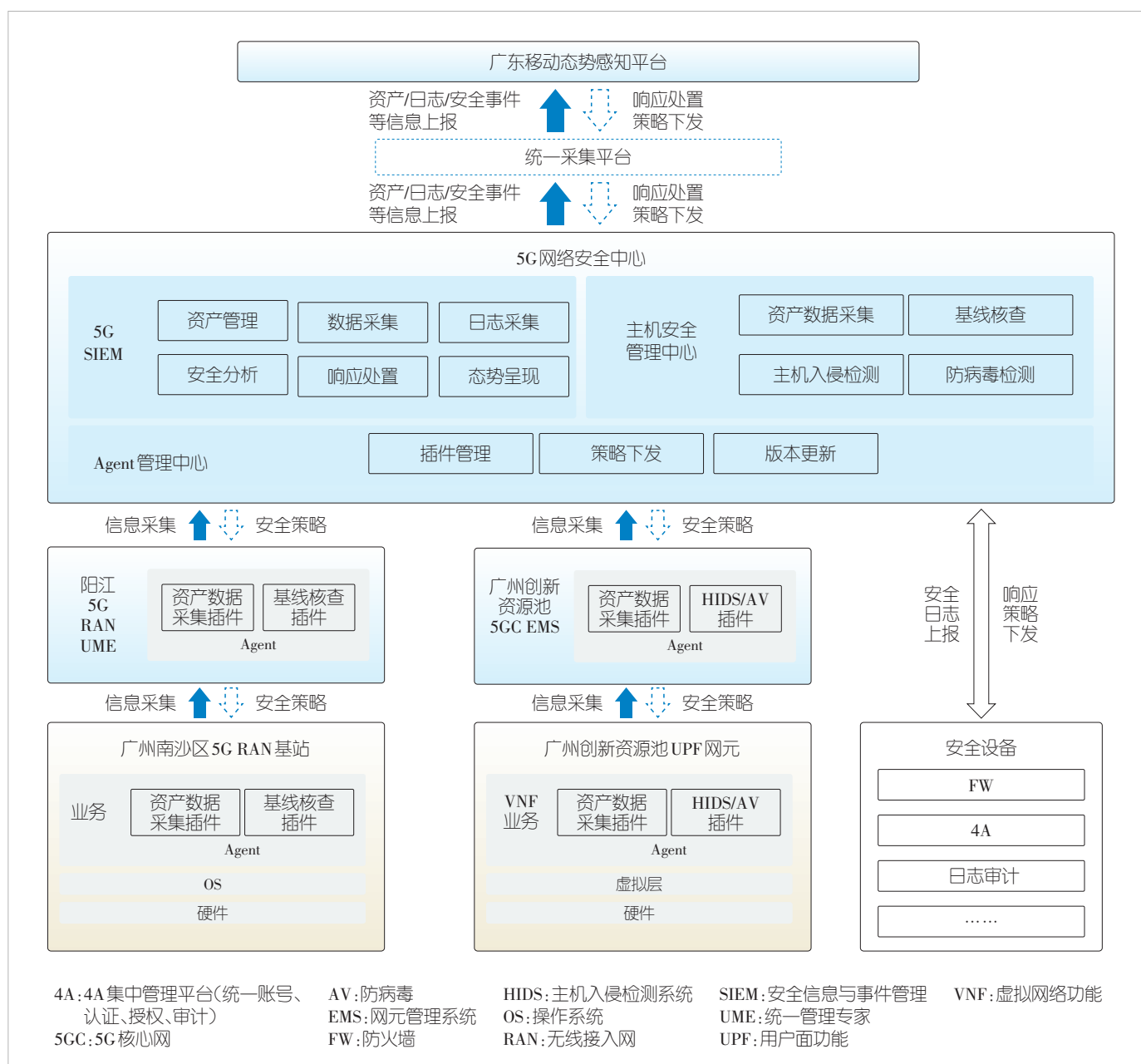


图7 5G网络运营安全管理系统试点项目落地部署架构

5) 主机入侵检测系统(HIDS)/防病毒(AV)插件: 在应用层执行安全中心指令, 实现主机入侵检测或防病毒检测功能。

本次试点通过在IP承载网侧配置路由与防火墙策略, 实现5G网络安全中心与阳江无线UME网管、广州创新资源池核心网EMS网管的数据交互。在广州南方电网5G专网场景中开展对5G基站、下沉UPF网元、网管的安全数据采集、基线核查、入侵检测、防病毒检测、安全态势呈现与数据上

报的功能验证, 试点所涉及的94条测试用例全部验证通过, 顺利完成5G网络运营安全管理系统的建设工作。

5G网络运营安全管理系统的成功落地实践, 明确了广州南方电网5G专网场景的安全责任边界, 解决了5G网络安全数据采集问题, 通过全面采集与分析5G网络安全数据, 及时发现网络攻击, 提升5G网络主动安全防御能力以及安全运维效率, 为5G专网运营提供一套智能闭环处置的安全运营管理体系, 保障5G行业应用和5G网络基础设施安全。



图8 5G网络运营安全管理系统界面

同时，为推动5G网络安全运营的普及与落地带来以下积极影响^[7-8]：

1) 促进5G行业应用的安全普及。该系统不仅保障了广州南方电网5G专网的安全运营，更为其他行业树立了安全管理的典范，增强了社会各界对5G网络安全性的信心，促进更多行业敢于并愿意采用5G技术，加速了5G技术在智能制造、智慧城市、智慧医疗等领域的广泛应用和普及。

2) 提升公共安全与应急响应能力。5G网络的高速率、低延迟特性使得其在公共安全领域具有巨大潜力。该系统的成功实践，为应对突发事件、自然灾害等紧急情况提供了更加快速、可靠的信息传输与决策支持能力，有助于提升5G专网乃至整个社会的应急响应速度和效率，增强公共安全意识。

3) 促进网络安全技术创新与产业发展。该系统的研发与实施，不仅解决了当前5G网络安全运营管理领域的一些关键技术难题，还带动了网络安全技术创新与产品研发的活跃度。未来更多类似项目的开展和成功经验的积累，将有力推动网络安全产业的快速发展，形成更加完善的网络安全产业链与生态体系^[9-10]。

综上所述，广州南方电网5G网络运营安全管理系统的成功落地实践，不仅提升了企业自身的网络安全防护能力与运营效率，更在社会层面产生了广泛而深远的影响，为5G

技术的普及应用、公共安全的提升以及数字社会的构建贡献了重要力量。

4 结束语

本文通过对5G网络运营安全管理策略的深入研究，设计并落实5G网络运营安全管理系统，依据内生安全理念，提出了5G网络安全中心，打造5G网络运营安全管理体系，增强5G网络安全防护水平，建设满足监管要求的安全可靠5G网络，实现网络安全与5G业务的深度融合。通过孵化5G网络运营安全解决方案，携手生态企业，协同研发相关产品，可陆续在能源、交通、工业、医疗、教育等行业复制推广，助力5G应用的健康发展，奠定企业数字化转型所必需的5G网络基础设施能力。

未来，5G网络运营安全管理系统及其相应模式将成为5G专网产品推广应用过程中必不可少的组成部分，增强各行业客户基于5G进行产业升级的安全信心，为5G面向行业应用的迅速普及带来积极的推动作用。

参考文献

- [1] 苗守野. 关于5G网络内生安全的思考 [J]. 信息通信技术, 2023, 17(4): 56-62
- [2] 王瀚洲, 刘建伟. 网络内生安全研究现状与关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(6): 2-11. DOI: 10.12142/ZTETJ.202206002

- [3] 何国锋, 段赟, 刘东鑫, 等. 面向未来网络的高可信内生安全体系研究 [J]. 网络安全与数据治理, 2023, 42(4): 45–50. DOI: 10.19358/j.issn.2097-1788.2023.04.008
- [4] 马铮, 闫新成, 周继华, 等. 网络5.0内生安全可信体系 [J]. 信息通信技术与政策, 2023, 49(12): 40–47. DOI: 10.12267/j.issn.2096-5931.2023.12.005
- [5] 曾梦岐, 石凯. 基于动态信任的内生安全架构 [J]. 通信技术, 2022, 55(8): 1036–1043.
- [6] 韩永刚. 基于内生安全框架的面向数字化转型的网络安全防御体系 [J]. 中兴通讯技术, 2022, 28(6): 29–35+56. DOI: 10.12142/ZTETJ.202206006
- [7] 袁超颖, 白景鹏, 袁淑美, 等. 新一代电信云网内生安全架构研究 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(3): 3–8. DOI: 10.12142/ZTETJ.202503002
- [8] 栗栗, 闫茹, 马宇威. 6G网络内生安全体系运行机制研究 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(3): 44–49. DOI: 10.12142/ZTETJ.202503008
- [9] 马红兵, 姚戈, 张曼君, 等. 6G网络安全架构展望 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(3): 56–61. DOI: 10.12142/ZTETJ.202503010
- [10] 陆海涛, 周强, 代九龙, 等. 面向6G的天地一体化网络安全技术 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(6): 75–83. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506011

作者简介



任若冰, 中国移动通信集团广东有限公司高级工程师; 主要研究方向为5G应用安全、网络安全管理支撑系统等; 参与多个省部级重大专项。



费明, 中国移动通信集团广东有限公司工程师; 主要研究方向为网络运维、5G行业应用等。



贾国祖, 中国移动通信集团广东有限公司高级工程师; 主要研究方向为物联网与5G专网等; 发表论文5篇, 申请专利10项, 拥有软件著作权4项。



许晨敏, 北京兴云数科技术有限公司工程师; 主要研究方向为AGV、5G网络安全、内生安全等; 发表论文2篇, 申请专利1项。



郝振武, 中兴通讯股份有限公司规划总工; 主要研究方向为5G网络安全、工业互联网安全、内生安全等。

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
高 镇	北京理工大学	吴泳澎	上海交通大学
官 科	北京交通大学	武庆庆	上海交通大学
韩 充	上海交通大学	夏文超	南京邮电大学
韩凯峰	中国信息通信研究院	向路平	南京大学
何 姿	南京理工大学	徐梦炜	北京邮电大学
侯天为	北京交通大学	徐天衡	中国科学院上海高等研究院
胡 杰	电子科技大学	杨川川	北京大学
黄 晨	紫金山实验室	叶迎晖	西安邮电大学
霍佳皓	北京科技大学	尹海帆	华中科技大学
李 昂	西安交通大学	游昌盛	南方科技大学
李 礼	中国科学技术大学	于季弘	北京理工大学
刘 凡	东南大学	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	赵毅哲	电子科技大学
梅渭东	电子科技大学	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
潘存华	东南大学	周 伊	西南交通大学
祁 亮	上海交通大学	朱秉诚	东南大学
秦晓琦	北京邮电大学	朱光旭	深圳市大数据研究院
秦志金	清华大学	朱政宇	郑州大学
史 瑶	哈尔滨工业大学 (深圳)		

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

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、
史伟强、屠要峰、王会涛、熊先奎、许 进、
闫新成、赵亚军、朱晓光

双月刊 1995 年创刊
第 32 卷 总第 188 期
2026 年 4 月 第 2 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：陶善勇
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：安徽添锦印刷科技有限公司
出版日期：2026 年 4 月 30 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