



中文核心期刊 中国科技核心期刊

第三届国家期刊奖百种重点期刊 信息通信领域产学研合作特色期刊

ISSN 1009-6868

CN 34-1228/TN

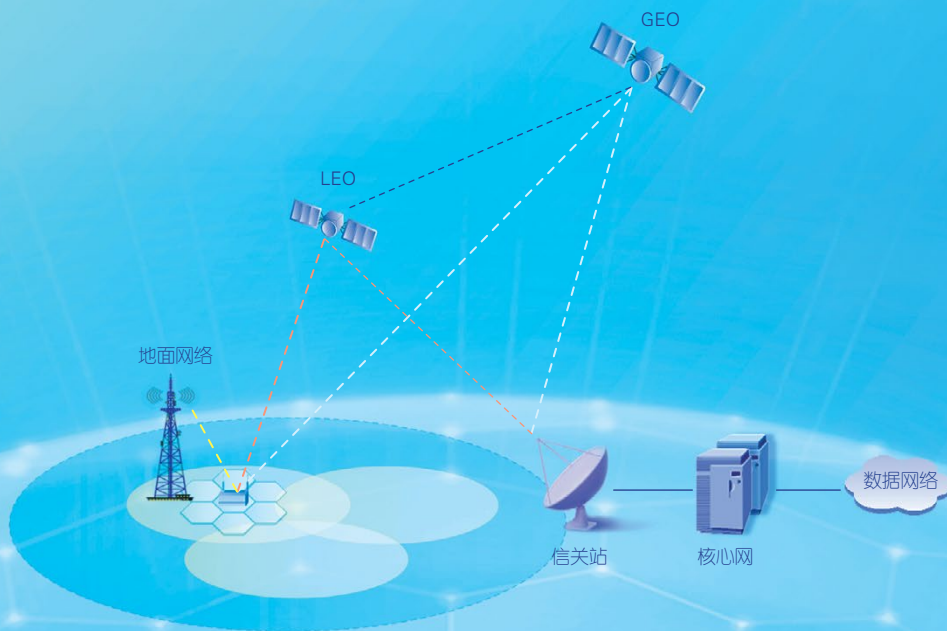
# 中兴通讯技术

## ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

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

第 30 卷 · 总第 177 期 · 2024 年 8 月 · 第 4 期

### 专题：6G 无线系统技术



(封面图片详解见 P46)

ISSN 1009-6868



# 《中兴通讯技术》第9届编辑委员会成员名单

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

**主任** 陆建华(中国科学院院士)

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

**编委** (按姓名拼音排序)

陈建平	上海交通大学教授	陶小峰	北京邮电大学教授
陈前斌	重庆邮电大学教授、副校长	王翔	中兴通讯股份有限公司高级副总裁
段晓东	中国移动研究院副院长	王文博	北京邮电大学教授、副校长
葛建华	西安电子科技大学教授	王文东	北京邮电大学教授
管海兵	上海交通大学教授	王喜瑜	中兴通讯股份有限公司执行副总裁
郭庆	哈尔滨工业大学教授	王耀南	中国工程院院士
洪伟	东南大学教授	王志勤	中国信息通信研究院副院长
黄宇红	中国移动研究院院长	卫国	中国科学技术大学教授
纪越峰	北京邮电大学教授	吴春明	浙江大学教授
江涛	华中科技大学教授	邬贺铨	中国工程院院士
蒋林涛	中国信息通信研究院科技委主任	向际鹰	中兴通讯股份有限公司首席科学家
金石	东南大学首席教授、副校长	肖甫	南京邮电大学教授、副校长
李尔平	浙江大学教授	解冲锋	中国电信研究院教授级高工
李红滨	北京大学教授	徐安士	北京大学教授
李厚强	中国科学技术大学教授	徐子阳	中兴通讯股份有限公司总裁
李建东	西安电子科技大学教授	续合元	中国信息通信研究院首席专家
李乐民	中国工程院院士	薛向阳	复旦大学教授
李融林	华南理工大学教授	薛一波	清华大学教授
李自学	中兴通讯股份有限公司董事长	杨义先	北京邮电大学教授
林晓东	中兴通讯股份有限公司副总裁	叶茂	电子科技大学教授
刘健	中兴通讯股份有限公司高级副总裁	易芝玲	中国移动研究院首席科学家
刘建伟	北京航空航天大学教授	张平	中国工程院院士
隆克平	北京科技大学教授	张卫	复旦大学教授
陆建华	中国科学院院士	张宏科	中国工程院院士
马建国	中原工学院学术副校长	张钦宇	哈尔滨工业大学(深圳)教授、副校长
毛军发	中国科学院院士	张云勇	中国联通云南分公司总经理
孟洛明	北京邮电大学教授	赵慧玲	工业和信息化部信息通信科技委常委
石光明	鹏城实验室副主任	郑纬民	中国工程院院士
孙知信	南京邮电大学教授	钟章队	北京交通大学教授
谈振辉	北京交通大学教授	周亮	南京邮电大学教授、副校长
唐宏	中国电信IP领域首席专家	朱近康	中国科学技术大学教授
唐雄燕	中国联通研究院副院长	祝宁华	中国科学院院士

# 目次

中兴通讯技术 (ZHONGXING TONGXUN JISHU)  
第 30 卷 总第 177 期 2024 年 8 月 第 4 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 ▶

### 6G无线系统技术

- 01 专题导读 ..... 王志勤, 黄宇红, 王东明
- 03 6G智简无线网络 ..... 黄宇红, 王启星, 李娜
- 10 柔性智简深度边缘节点 ..... 王晴天, 王栋, 李泽旭
- 14 面向6G的无蜂窝无线接入网技术 ..... 吴越, 王东明, 尤肖虎
- 26 AI在无线通信系统中的应用 ..... 魏兴光, 刘静, 陈嘉君, 谢鹏翔, 冯禹昂
- 32 6G物理层原生AI技术 ..... 田文强, 沈嘉, 肖寒, 刘文东, 郑旭飞
- 42 6G星地融合无线网络及关键技术 ..... 缪德山, 邓凌越, 孙建成, 徐晖
- 50 面向6G的星地融合网络频谱共享技术 ..... 瞿重希, 毛浩斌, 许懂, 张远钧, 肖振宇
- 57 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 ..... 李昕昊, 韩凯峰, 朱光旭

## 专家论坛 ▶

- 65 面向6G典型场景的无线系统研究 ..... 王志勤, 杜滢, 沈霞, 焦慧颖

## 企业视界 ▶

- 69 5G-Advanced 技术及应用 ..... 王伟, 张诗壮, 李晓帆, 芮华

## 技术广角 ▶

- 77 高阶自智网络关键技术及应用 ..... 孙方平, 钱铮铁

## 《中兴通讯技术》2024 年热点专题名称及策划人

### 1. 下一代多址技术

上海交通大学教授 艾渤  
上海交通大学教授 陈为

### 2. 网络大模型

中国电信 IP 领域首席专家 唐宏  
中兴通讯无线首席架构师 熊先奎

### 3. 6G 多天线技术

东南大学首席教授 金石  
上海交通大学教授 章嘉懿  
东南大学副研究员 韩瑜

### 4. 6G 无线系统技术

中国信息通信研究院副院长 王志勤  
中国移动研究院院长 黄宇红  
东南大学教授 王东明

### 5. 卫星通信技术

哈尔滨工业大学(深圳)教授 张钦宇

### 6. 数据通信新技术

中国电信研究院教授级高工 解冲锋  
中国联通研究院首席科学家 唐雄燕

# CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL  
Aug. 2024 Vol. 30 No. 4

Special Topic ►	<b>Wireless System Technologies for 6G</b>
	01 Editorial ..... WANG Zhiqin, HUANG Yuhong, WANG Dongming
	03 Intelligent and Lean 6G Network ..... HUANG Yuhong, WANG Qixing, LI Na
	10 Flexible Intelligent Network with Deep Edge Node ..... ..... WANG Qingtian, WANG Dong, LI Zexu
	14 Cell-Free Radio Access Network Technology for 6G ..... ..... WU Yue, WANG Dongming, YOU Xiaohu
	26 Applications of AI in Wireless Communication Systems ..... ..... WEI Xingguang, LIU Jing, CHEN Jiajun, XIE Pengxiang, FENG Yuang
	32 6G AI-Zation in Physical Layer ..... ..... TIAN Wenqiang, SHEN Jia, XIAO Han, LIU Wendong, ZHENG Xufei
	42 Terrestrial and Satellite Network Integration Based 6G System and Its Key Technologies ..... ..... MIAO Deshan, DENG Lingyue, SUN Jiancheng, XU Hui
	50 Spectrum Sharing Technology for Satellite-Terrestrial Integrated Networks Towards 6G ..... ..... QU Chongxi, MAO Haobin, XU Chong, ZHANG Yuanjun, XIAO Zhenyu
	57 A Real-World Data-Based Network Coverage Prediction and Optimization for Integrated Sensing and Communications ..... LI Xinhao, HAN Kaifeng, ZHU Guangxu
Expert Forum ►	65 6G Wireless System Research Towards Typical Scenarios ..... ..... WANG Zhiqin, DU Ying, SHEN Xia, JIAO Huiying
Enterprise View ►	69 5G-Advanced Technology and Applications ..... ..... WANG Wei, ZHANG Shizhuang, LI Xiaofan, RUI Hua
Research Paper ►	77 Key Technologies and Applications of High Level Autonomous Networks ..... ..... SUN Fangping, QIAN Zhengtie

期刊基本参数: CN 34-1228/TN\*1995\*b\*16\*82\*zh\*P\*¥20.00\*6500\*12\*2024-08

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。
------	--



# 6G 无线系统技术专题导读



## 专题策划人



王志勤



黄宇红



王东明

6G 正从关键技术研究逐步进入系统设计阶段。第3代合作伙伴计划（3GPP）将在2025年启动6G国际标准化，预计在2030年启动6G商用。未来2年将会是6G关键技术验证和系统方案总体研制的关键窗口期。为满足国际电信联盟（ITU）定义的6G六大典型场景和关键能力需求，需要实现关键技术的创新和产业基础的突破。6G无线系统技术将呈现出“融合化、智能化、高速化、泛在化”的发展趋势，提供智能多样灵活的无线功能，并支撑新的应用生态和发展需求。2023年底中国IMT-2030（6G）推进组发布《6G无线系统设计原则和典型特征》白皮书，提出包含资源层、功能层、服务层的6G无线系统概念视图，最终为用户提供超越连接的计算、数据、智能、感知等新型服务，并提出6G无线系统典型特征，如原生智能、灵活组网、至简协议、弹性可定制、通感融合等。

本期“热点专题”和“专家论坛”栏目以“6G无线系统技术”为主题，邀请该领域的专家学者撰写了9篇文章。这些文章介绍并分析了6G无线系统和关键技术的最新进展，并对存在的问题和具体的解决方案进行了深入讨论。

《6G智简无线网络》提出6G无线网络需在服务模式、技术能力、发展范式等方面进行突破创新，通过构建异构硬件云平台底座、通感算智融合内核、按需动态服务编排中枢，提升网络的灵活性、开放性、共享性，实现网络对千行百业的精准赋能；《柔性智简深度边缘节点》探索位于网络边缘侧的一种新的网络架构——深度边缘节点架构，该架构在网络边缘侧实现通信、算力、智能和数据的融合，并研究了支撑深度边缘节点的柔性智简和智能可编程技术；《面向6G的无蜂窝无线接入网技术》分析无蜂窝大规模多输入多输出（MIMO）技术对6G典型应用场景的支撑，提出一种新型的无蜂窝无线接入网实现架构，并分析该架构下实现的6G部分关键技术指标能力；《AI在无线通信系统中的应用》主要综述人工智能（AI）在无线通信系统中的应用，介绍AI在无线通信系统的总体框架，梳理AI在5G-A和6G系统中的应用，并展望AI在6G无线通信系统中的应用以及面临的挑战；《6G物理层原生AI技术》提出6G一体化、系统化地引入AI，形成基于AI的新传输方案与新空口设计，并具体分析了零开销叠加导频设计、信道与无线环境语义通信两项6G AI潜在技术方向；《6G星地融合无线网络及关键技术》阐释6G星地将在标准、设备、资源和业务等多个方面走向深度融合，提出星地融合的网络架构，

分析星地融合网络的关键技术，并展望未来的技术趋势；《面向6G的星地融合网络频谱共享技术》分析了星地融合网络频谱共享时存在的典型干扰类型，并对星地频谱共享场景中系统间干扰进行了仿真，介绍了星地频谱共享需要进一步研究的关键技术和面临的挑战；《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》提出了一种面向6G的通信感知一体化（ISAC）网络覆盖预测与优化框架，利用离线的现实网络数据与多波束信道建模的方法，实现任意天线参数下的ISAC网络性能预测，并且利用数学优化工具实现网络参数的精准寻优；《面向6G典型场景的无线系统研究》分析了6G无线系统需要重点研究的技术要素，指出6G系统设计将以沉浸宽带通信为基础，支持人工智能和通信融合、通信和通感一体化、泛在连接场景，并可与5G配合，全面支持物联网应用。

本期的作者来自知名企业、高校与科研机构，面向6G无线系统技术，从核心挑战、关键技术、网络架构等方面介绍了最新的研究成果。希望本期的内容能为读者提供有益的启示和参考，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

**王志勤**，中国信息通信研究院副院长，中国通信标准化协会副理事长、无线通信技术委员会主席，中国通信学会无线移动委员会主任委员，并担任中国IMT-2020（5G）推进组组长、IMT-2030（6G）推进组组长；在信息通信技术标准、信息化、产业与政策等方面有深入研究，推动中国3G、4G及5G创新；荣获全国三八红旗手、全国创新争先奖、全国五一劳动奖章等国家级荣誉称号，入选国家百千万人才工程，荣获国家科学技术进步奖特等奖，并多次获得国家科学技术进步奖一等奖、二等奖。

**黄宇红**，中国移动研究院院长、中国通信学会无线移动通信委员会副主任委员，入选2017年国家百千万人才工程，被授予“有突出贡献中青年专家”荣誉称号，获得2010年全国劳动模范称号，曾任国际移动通信标准组织3GPP SA副主席，现任国际产业联盟NGMN董事成员等；主导并参与承担了10个国家重大专项或重点研发计划项目，主导中国移动承担的原创技术策源地建设和新一代移动信息通信国家工程中心建设等任务；荣获省部级以上奖项27项，参与的“第四代移动通信系统（TD-LTE）关键技术与应用”项目获得国家科学技术进步奖特等奖。

**王东明**，东南大学特聘教授、博士生导师，工信部IMT-2030（6G）技术推进组专家组副组长；作为项目负责人，承担了国家科技重点研发计划项目重点专项“6G无线空口传输技术”；获2016年度国家科技进步奖特等奖和2014年江苏省科学技术奖一等奖；已发表学术论文200余篇，申请和授权中国与国际发明专利50余项。

# 6G 智简无线网络

## Intelligent and Lean 6G Network



黄宇红/HUANG Yuhong<sup>1,2</sup>, 王启星/WANG Qixing<sup>2</sup>,  
李娜/LI Na<sup>1,2</sup>

(1. 中关村泛联移动通信技术创新应用研究院, 中国 北京 100080;

2. 中国移动研究院, 中国 北京 100053)

(1. ZGC Institute of Ubiquitous-X Innovation and Applications, Beijing  
100080, China;

2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404002

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240719.1808.002.html>

网络出版日期: 2024-07-22

收稿日期: 2024-06-17

**摘要:** 5G的发展激发了更多的业务创新,同时也带来了更多维的业务需求。为了更高效支持不同场景的差异化、碎片化、定制化需求,6G无线网络需结合5G的经验,在服务模式、技术能力、发展范式等方面进行突破创新,通过构建异构硬件云平台底座、通感算智融合内核、按需动态服务编排中枢,提升网络的灵活性、开放性、共享性,实现网络对千行百业的精准赋能。

**关键词:** 6G; 按需服务; 通感算智融合

**Abstract:** The development of 5G has sparked more business innovations and brought about more multi-dimensional application needs. To efficiently support differentiated, fragmented, and customized demands in different scenarios, the 6G wireless network needs to make breakthroughs and innovations in service models, technical capabilities, and development paradigms by leveraging the experience of 5G. By building an underlying heterogeneous hardware cloud platform, an integrated kernel of communications, sensing, computing, and intelligence, alongside a hub for on-demand and dynamic service orchestration, the network's flexibility, openness, and sharing capabilities will be enhanced, enabling it to provide precise empowerment to various industries.

**Keywords:** 6G; on-demand fulfillment; integration of communications, sensing, computing, and intelligence

**引用格式:** 黄宇红, 王启星, 李娜. 6G智简无线网络 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 3-9. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404002

**Citation:** HUANG Y H, WANG Q X, LI N. Intelligent and lean 6G network [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 3-9. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404002

每一代移动通信技术的演进都为移动通信业务的发展提供了新的可能性,而业务需求的增长也推动了通信技术的不断创新和升级。在二者相互促进发展的过程中,移动通信网络也变得愈加复杂,尤其是在5G实现从个人互联网到产业互联网的探索之后。网络不仅要处理人与人的通信,还要处理人与物、物与物的通信,这就需要网络具备更高的智能性和灵活性。网络的规模、节点数量、连接拓扑、服务业务类型都在急剧增长,这对网络的设计、管理和维护提出了更高的要求。为了有效保障6G无线网络的运行效率与质量,面向“智简”进行网络设计尤为关键。

## 1 复杂网络成因分析

### 1.1 服务模式: 烟囱式

面对万物互联的发展愿景,5G网络定义了增强移动宽

带(eMBB)、超可靠低时延通信(URLLC)和海量机器类通信(mMTC)三大典型场景。但在实际落地应用时,行业客户对网络能力的要求往往超出了传统通信的范畴。不同行业客户需要不同维度的极致性能和超越通信的能力,包括高精度定位、大数据、计算和人工智能(AI)等,同时还要求灵活定制、敏捷部署、使用简便、成本可控等。

1) 灵活定制: 按需提供包括通信、感知、计算、AI以及安全在内的定制化解决方案,以满足不同行业、不同场景的个性化需求。

2) 敏捷部署: 在提供定制化能力的基础上,还要确保方案部署的敏捷性与高效性,匹配客户生产节奏,实现快速交付,确保时间效益的最大化。

3) 使用简便: 定制服务不仅需要操作简便,还需要拥有完善的服务保障,确保客户体验的无缝衔接。客户在使用过程中无须进行繁琐的操作,能够即时获取所需的能力服务,做到产品互联网化、销售全流程线上化、使用简

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2902100)

便化。

4) 成本可控: 由于信息化改造预算有限, 众多企业在考虑基础设施改造时, 均期望获得既经济又高效的能力, 例如在统一的基础设施上同时获得通信、感知、计算、AI 等能力。

为了适应差异化、碎片化、定制化、极致性能等行业应用需求, 5G 网络为不同用户单独打造“优专尊”的网络, 并通过移动边缘计算等技术为网络外挂/叠加计算、数据、安全、AI 等新能力, 但这些服务模式面临成本高、研发周期长、适应性差、效率低、管理复杂等挑战。

## 1.2 能力引入: 外挂式

AI 技术在 5G 网络中的应用促进了移动通信网络和垂直行业的智能化发展, 但 5G 网络智能化大多使用场景驱动的外挂 AI 模式, 存在效率较低、难以提供近实时高性能 AI 应用和服务的弊端, 无法满足未来网络高水平自治、行业用户智能普惠、用户极致业务体验等对智能的需求。具体来讲, 原因主要在于: 一方面业界尚未对网络 AI 服务质量保障指标和评估准则达成共识, 导致难以对网络服务能力进行科学和公平判断; 另一方面 AI 应用所需的算力、数据、模型和通信连接资源分属不同技术体系, 尚未建立更有效的跨技术域协同机制, 不能实现资源实时、高效协同。

在应用部署方面, 移动通信网络的网络自治场景众多且复杂, 大部分应用需要串接多个生产环节, 而环节间的相关性分析主要依赖运维人员人工完成。当前众多 AI 应用的研发模式依然为成本较高、效率较低的线下模式, 网络自治场景下所需智能的生成、部署、评估和迭代优化等各环节均主要依赖人工完成。对此, 6G 需要在网络架构和关键技术的支持下支持内生的 AI 设计, 以解决外挂叠加式 AI 因网络架构制约难以提供近实时高性能 AI 服务的难题。

## 1.3 网络设计: 管道式

5G 网络面向 eMBB、URLLC 和 mMTC 三大典型场景设计, 旨在实现从个人互联网到产业互联网的转变。但整体设计思路还是刚性管道式的, 以面向用户 (ToC) 设计的 eMBB 系统架构为基线, 通过引入多参数集、网络切片技术、局部性能优化、功能裁剪等方式适配面向企业 (ToB) 的差异化需求。但这种在固定系统版本上叠加功能以提升性能或裁剪功能以降低功耗的方式限制了技术创新, 无法针对目标垂直领域做彻底优化, 在很多行业应用上并未表现出较大优势, 反而增加了对网络和终端的软硬件能力要求及复杂度<sup>[1]</sup>。

## 2 6G 智简无线网络设计思路

如图 1 所示, 为了更有效支撑差异化、碎片化、定制



▲图1 6G智简无线网络设计思路



化业务应用需求,结合5G发展经验,我们认为6G无线网络需要围绕如何对外提供智简的服务、如何对内设计智简的网络、如何构建智简的生态做出如下变革:

### 2.1 新服务模式:按需服务,一体供给

服务模式要更灵活,需突破烟囱式专网设计,采用模块化的设计理念,使其能够灵活地部署与定制,以满足大量客户对于差异性服务的需求。通过端到端服务化设计,提供具有管理调度的平台中枢能力,实现服务、功能和资源的按需编排和组合,一体化提供通信、感知、计算、AI等服务。这种灵活性不仅使得平台能够迅速响应市场变化,还确保了用户需求的个性化满足,同时保持了较高的成本性价比。

### 2.2 新技术能力:通感算智,内生融合

新技术能力引入方式要更内生,便于开放共享。云原生技术、AI、数字孪生等更先进智能的技术,是提升网络运行效率和质量的重要手段,也是实现高效对外赋能的关键。在能力引入时要实现由外挂叠加向内生一体转变,设计内生于网络的通感算智系统,在网络内部支持AI工作流,并实现通信与计算的深度融合。在平台构建时要实现由烟囱式向IT平台式设计的转变,构建异构硬件云平台底座,通过灵活资源编排组合和弹性扩缩容动态对内提供网络通信所需算力,同时对外开放共享,满足多样业务对算力的需求。该基座技术通过统一的硬件架构,实现从网络连接、感知处理到人工智能渲染等多维度业务的支持,从而实现资源的集约共享,不仅可以提高经济性,也可以实现更为显著的节能降耗效果。

### 2.3 新发展范式:开放合作,共建共享

网络发展需更开放,通过构建共建共创而非传统封闭式的平台,加速技术创新与网络演进。开放性包括3个层面:一是开放的基础底座,基于云原生容器技术实现软硬件解耦,通过标准化应用程序编程接口(API)快速部署云化无线应用、云化IT应用、云化AI应用等;二是开放的服务能力,基于服务化架构实现网络自演进,各公司、开发者可贡献网络功能、能力、算法,网络提供不同业务需求的灵活编排组合能力;三是开放的合作范式,在网络运营商、服务提供商与网络设备提供商、开放能力提供商、行业客户等之间建立互联共赢的合作范式。

## 3 6G 智简无线网络关键技术

通感算智等更智能技术的引入是6G无线网络设计的关键<sup>[2-3]</sup>,按需服务、内生融合、开放共享是智简网络设计的核心思路。为了实现6G智简无线网络总体愿景,我们需要针对如下关键技术方向进行了设计。

### 3.1 按需服务网络

作为6G智简无线网络的中枢,按需服务网络赋能功能柔化,开启网络即服务能力,通过端到端服务化设计为通感算智一体融合的综合能力体系提供服务、功能和资源的按需编排和组合,实现个性化和定制化的按需服务<sup>[4-5]</sup>,推动从固定供给向灵活供给的业务范式转变。在设计按需服务网络的过程中,如何确定合理的服务粒度以及保障拆分后网络的性能是关键。

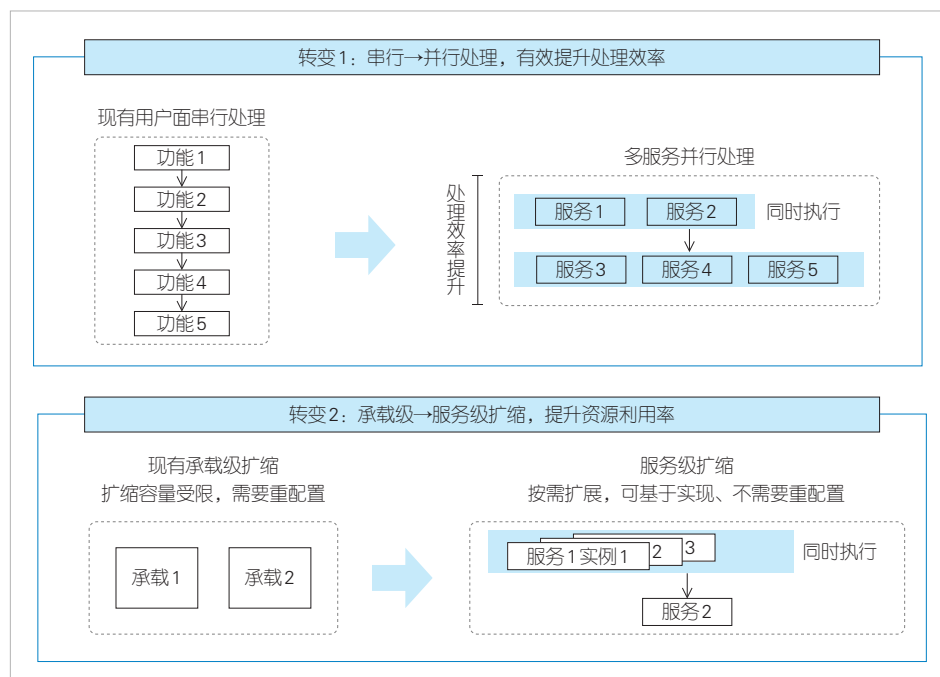
#### 3.1.1 服务拆分:按照业务能力分解

5G核心网控制面已实现服务化设计,并对用户面进行了探索。面向无线接入网(RAN),基站作为一个开发了数十年的“单体架构”应用,功能间紧密耦合、上下文相互依赖,不合理的功能拆分很可能导致形成分布式单体。因此,如何在破坏系统完整性的前提下,有效拆分紧耦合功能是RAN服务化需要重点考虑的问题。IT领域常用的两种服务分解模式是按领域驱动设计(DDD)的子域分解和按业务能力分解。这两种模式的整体思路都是:分析应用是做什么的,其每个业务能力都可以被认为是一个服务。RAN的服务定义亦可参照此方法,按照RAN可以对外提供的业务能力进行定义,并考虑“自包含”“可重用”“独立性”3个必要原则。

#### 3.1.2 性能保障:并行化机制

相比于核心网,RAN对性能要求更为严苛。功能的拆分、接口的开放化以及软硬件的解耦,必然会在一定程度上导致传统网络性能的损失,尤其是时延损失。对此,可以引入并行化机制降低对网络性能的影响。在流程上,端到端流程可以被进一步拆解,并支持多个子流程的并行执行。这一方面可以缩短信令流程、避免响应等待导致的端到端时延长问题,另一方面可以缓解服务调用栈太深导致的新功能引入门槛高、调用失败回退流程长等问题。在用户面上,可引入并行化处理,允许多个处理功能并行执行,如图2所示,由此可以有效提升数据的处理效率,结合服务级扩缩容,实现计算资源利用率最优化。





▲图2 多服务并行处理,服务级扩缩容

### 3.1.3 按需动态编排

整体上服务按需组合包括两种可行的方式：基于模版、动态组合。其中，第一种方式类似网络切片，基于业务需求提前确定模版，当业务数据流到达时调用相应的模版即可；第二种方式适用于新兴业务场景，业务数据流到达时按需选择相应服务。

## 3.2 通感融合

通信和感知融合是6G移动信息网络的重要技术特征，是实现信息服务全过程的重要环节。感知将成为6G网络中的原生能力，与通信能力互助共生，并为6G开辟新的应用前景，赋能一网多能新业态。

### 3.2.1 协作通感内生设计

独立感知模式下的通感融和网络存在自干扰，要求感知节点具备全双工能力。为实现通感融合，需要对有源天线单元（AAU）硬件架构进行一系列复杂改动，但这将产生较高的硬件改动成本。此外，受到业界可实现天线收发隔离度的限制，感知覆盖距离受限。如何实现低成本全域覆盖具有极大的挑战。如图3所示，通过协作通感内生设计可实现低成本通感。在该系统中，基站A向环境中发射感知波束，经过感知目标反射后形成回波被其他基站B接收。其中，协作波束管理和协作多源信息融合是协作通感内生设计的两个关键方面。

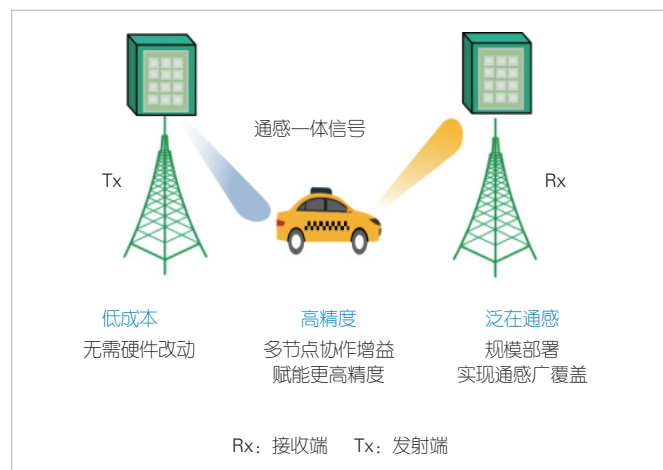
1) 协作波束管理：为实现目标精准估计，需要协作节点间匹配收发波束。波束管理时，需要设计灵活的波束扫描、切换机制，在保证感知性能的同时降低波束开销。考虑不同区域下感知目标的分布存在差异性，可设计非均匀的预编码码本，在通感重点区域与非重点区域配置不同波束扫描粒度。

2) 协作多源信息融合：多节点协作感知可以在不同位置接收回波信号，获得分集增益，实现高精度泛在通感。各接收节点首先对各自接收回波信号进行处理，获得时延、角度、信号强度等中间测量量，而后再将上述测量量及其多维组合发送给服务器进行数据融合，实现对目标位置的估计。随着接收节点数目的

增加，感知定位误差逐渐降低并收敛，可用于指导优化协作节点选择方案。

### 3.2.2 交替优化资源分配

通信和感知空口资源共享程度可分成高共享度、合适共享度、低共享度3个等级。在高共享度下，通感信号全域共享，感知精度和覆盖能力不足，网络效率高但网络质量不足；在低共享度下，通感资源完全分立，通信能力、感知能力优异，但网络效率低；在合适共享度下，通感资源通过适当的共用，可使网络效率与质量均达到较高要求。基于上述思想，如何优化通感优先级配置以规避感知与通



▲图3 协作通感系统模型

信资源冲突，如何设计合适共享度的通感空口传输方案与高效的多维资源分配方法，破解效率与能力之间的矛盾，是通感一体化面临的技术挑战。

考虑通信与感知空口资源正交性，首先对通感网络时域、频域、功率资源分配方式进行优化，在满足总功率约束，测速、测距、测角克拉美罗下界（CRLB）约束条件下，建立优化问题，保障感知性能要求，同时实现通信速率最大化。通过不等式转化，将原非凸优化问题转化为半正定规划凸问题，可通过传统凸优化算法实现求解<sup>[6]</sup>。

在上述通感资源分配的基础上继续执行感知算法，进一步实现对目标的低复杂度、高精度感知。通过正则多元分解方法（CPD）将速度、距离、角度待估参数进行张量分解，以最小化感知参数估计均方误差为优化目标建立优化问题，通过交替优化实现对目标感知参数的估计。仿真结果表明，所述通感资源分配及感知方案可以获得通信速率与感知性能的最优折中，所述交替优化感知算法相比传统算法可获得更高的感知性能。

### 3.2.3 多维干扰识别与智控

通感融合网络的干扰类型复杂，除传统通信系统干扰外，还包括上行通信用户与感知接收基站之间的干扰、基站间上下行交叉链路干扰等。特别地，独立感知网络还存在感知基站自干扰。此外，由于感知基站及用户调度，通感融合网络干扰具有时变特性。如何识别干扰类型并针对性地有效抑制，如何设计灵活的协作节点的选择及收发调度方案，如何设计全局普适的干扰识别与控制方法，是保证干扰管理效果的重要内容。

考虑点、簇、网多维协同设计，通过感知组网设计及多维干扰智控技术，可实现全局通感资源高效调度及网络质量提升。

1) 感知组网设计：基于现有六边形蜂窝网络架构，设计“环状”感知组网。小区内同站址三扇区的帧结构同时设置为下行/上行，周边6个小区的帧结构设置为与该小区相反。该方案可有效避免邻区基站及同站址邻扇区之间的上下行交叉链路干扰，感知资源开销约占10%。

2) 多维干扰智控技术：通过特征提取及AI智能分析，实现干扰特征提取及干扰源定位。通过以下多维干扰智控技术实现干扰抑制：在时域，可将收发节点成对配置帧结构、优化时隙调度、在保护间隔（GP）中感知；在频域，可为通信与感知划分不同的子带；在空域，可设计波束管理及自适应波束赋形方案，将收发波束精确对准目标，并压缩旁瓣；在码域，可为相邻基站设计正交序列及正交覆

盖码（OCC）；在功率域，可设计自适应发送功率分配及干扰删除方案。

## 3.3 通算智融合

通过构建通信、计算和智能相融合的6G网络内生能力，支持AI赋能网络和网络使能AI场景，为网络自身和第三方用户提供泛在普惠的智能服务。

### 3.3.1 AI使能高性能物理层和高层协议栈功能

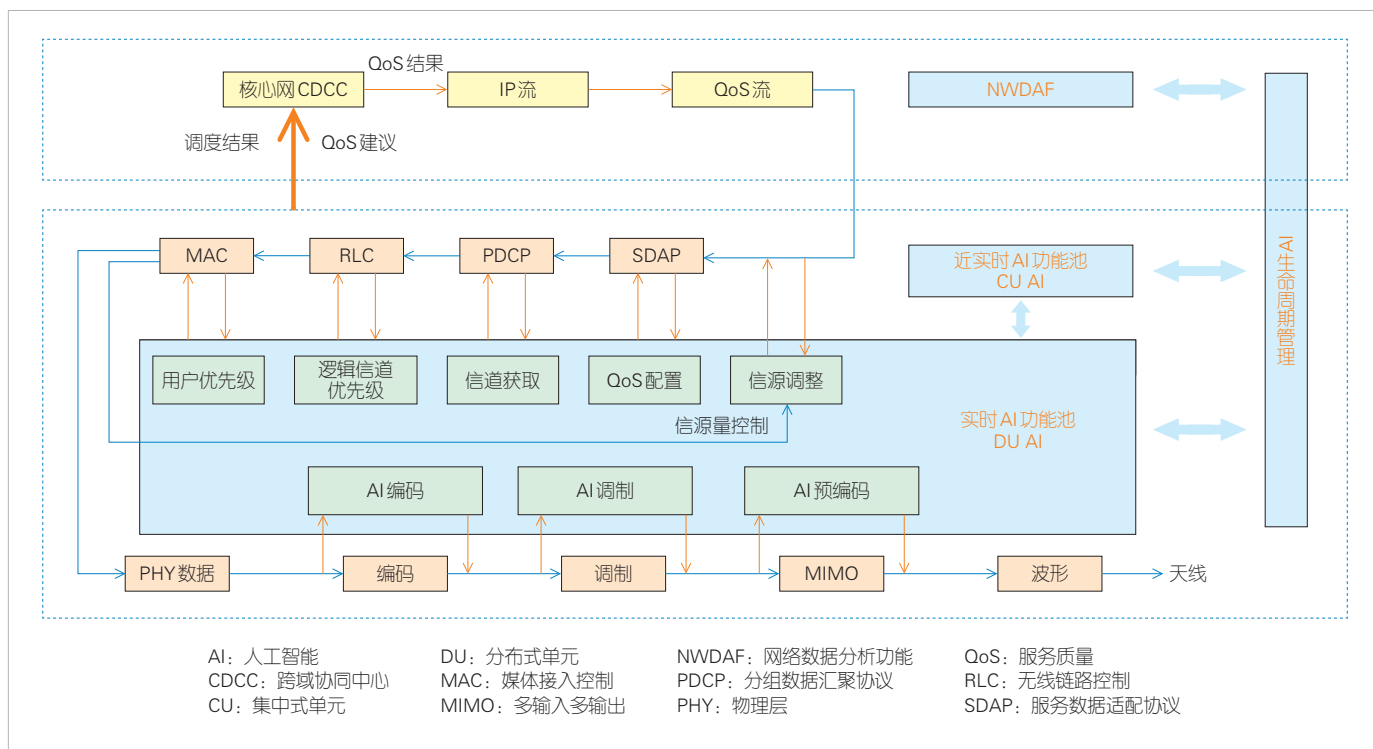
如何突破空口传输多模块和链路级神经网络设计，提升网络性能，降低复杂度，如何在复杂信道环境下保证空口AI和网络AI模型的泛化性、实时性和可靠性，是AI赋能网络需要解决的关键问题。图4是AI使能高性能物理层和高层协议栈功能的示意图，借助AI的手段，以低复杂度设计提升通信系统性能。具体地，通过AI与物理层和高层协议栈的融合设计，在网络内部实现实时AI推理，利用AI在复杂环境下优秀的特征提取和非线性拟合能力，实现通信链路单/多模块功能增强，以及全链路的低复杂度AI。例如，可通过AI使能多输入多输出（MIMO）信道估计、预测、压缩反馈，有效降低导频和反馈开销；基于神经网络实现信道获取、用户调度、MIMO预编码，显著降低算法复杂度。然而，AI赋能网络的设计多为单点、用例驱动式的，尚未形成全局性的优化，泛化性和实时可靠性亦不能得到较好保障，因此需要进一步探索生成式AI、大模型等AI前沿技术，实现AI赋能网络效率的提升。

### 3.3.2 端边云协作的通算智管控

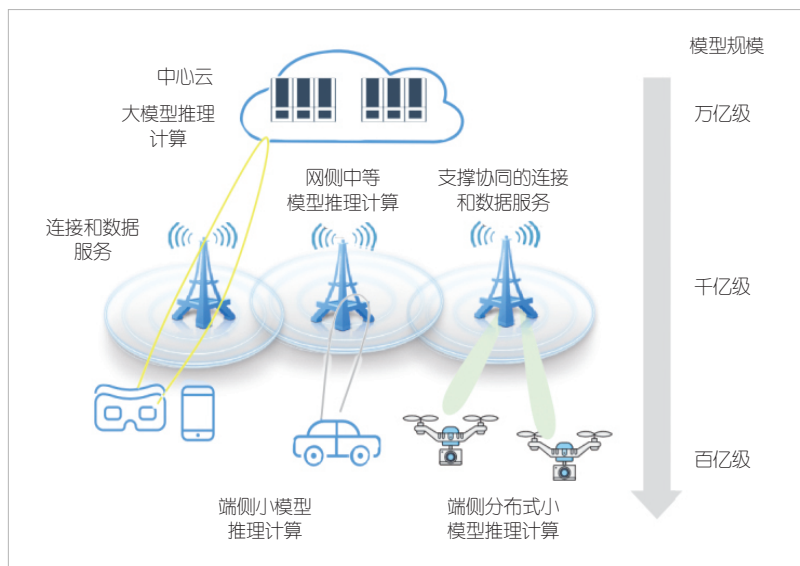
面向6G智能普惠愿景，现有“外挂式”云AI服务供应方案存在效率较低、难以提供近实时高性能AI应用和服务的弊端。考虑端网云差异化通信计算能力和复杂组网拓扑，如何高效利用网络通算数智资源，满足AI服务需求，并降低成本和能耗，是网络使能AI的关键。对此，6G需要根据不同类型终端的硬件条件和服务质量需求，利用网络端边云泛在的通算数智资源提供多种AI服务，例如，在边侧提供千亿级参数的AI模型，在中心云提供万亿级参数的AI模型，如图5所示。为了实现上述目标，网络架构和关键技术需要支持内生的AI设计，并通过端边云协作的AI服务编排调度和实时精准的通算智资源控制，以降低成本和能耗，按需高效提供高质量的AI服务。

## 3.4 异构硬件云平台

异构硬件云平台由通用计算的中央处理器（CPU）、智



▲图4 AI使能高性能物理层和高层协议栈功能



▲图5 端边云协作的通算智管控

能计算的图形处理器（GPU）以及专用处理芯片构成，通过云化异构硬件实现底层资源的动态共享和弹性扩缩容，满足多样化的计算需求。

### 3.4.1 超高实时响应

对高带宽低时延的要求使得资源的调度与抢占非常重要, 现有的非抢占式调度虽然能够实现毫秒级的任务中断

响应, 但已难以满足日益增长的网络需求。相比之下, 抢占式调度以其微秒级的任务中断响应能力, 可以为超大带宽网络转发提供强有力的支持, 成为解决这一挑战的关键所在。通过抢占式调度, 可有效平衡实时性、稳定性、吞吐性能, 实现最大中断响应时延优化至  $10\ \mu\text{s}$  内, 支持  $100\ \text{Gbit/s}$  容器网络吞吐。

### 3.4.2 高性能容器云

随着物联网、云计算等技术的广泛应用，碎片化、多样化的应用场景不断涌现，给基站软件容器化和集中化RAN架构带来了前所未有的挑战。如何实现对传感器、终端、算力卡、服务器等不同对象的云化统一管理，成为当前亟待解决的问题。此外，分布式架构、混合异

构云以及节点数目差异化的部署规模，也进一步加剧了云化异构硬件面临的挑战。针对这一挑战，可通过对传感器、终端、算力卡、服务器等不同对象的云化统一管理，实现多种资源功耗、占用率等信息多维度统一监控告警。

### 3.4.3 异构资源管理

不同行业用户对于高性能处理资源的需求呈现出显著

的差异性。传统的现场可编程门阵列（FPGA）等加速器资源绑定使用方式已难以满足这种多样化的需求。因此，需要考虑 GPU、数据处理器（DPU）、FPGA 等异构资源的感知、抽象、统一管理与调度，以及通感算智多应用的融合协同，实现资源按需分配。

#### 4 总结

未来更加差异化、碎片化的业务应用需求，通感算智安深度融合的技术趋势，以及 5G 商用带给我们的启示，推动着 6G 无线网络向智简方向发展。本文从智简设计的驱动力出发，提出了 6G 智简无线网络的设计思路及关键技术方案。下一步，我们将针对 6G 智简网络在硬件云化、能力融合、按需服务等方面存在的问题与挑战进一步深入研究，希望与业界一起共同推进。

#### 参考文献

- [1] OPPO. 6G: 极简多能, 构建移动的世界 [R]. 2023
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 6G 无线系统设计原则和典型特征 [R]. 2023
- [3] IMT-2030(6G)推进组. 6G 网络架构展望 [R]. 2023
- [4] LI N, LIU G Y, ZHANG H M, et al. Micro-service-based radio access network [J]. China communications, 2022, 19(3): 1-15. DOI: 10.23919/JCC.2022.03.001
- [5] LIU G Y, LI N, DENG J, et al. The SOLIDS 6G mobile network architecture: driving forces, features, and functional topology [J]. Engineering, 2022, 8: 42-59. DOI: 10.1016/j.eng.2021.07.013
- [6] ZHONG C, LOU M T, GU C R, et al. Performance optimization and parameters estimation for MIMO-OFDM dual-functional communication-radar systems [J]. Digital communications and networks, 2023. DOI: 10.1016/j.dcan.2023.12.006

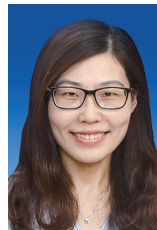
#### 作者简介



**黄宇红**, 中国移动研究院院长、中国通信学会无线移动通信委员会副主任委员, 入选 2017 年国家百千万人才工程, 被授予“有突出贡献中青年专家”荣誉称号, 获得 2010 年全国劳动模范称号, 曾任国际移动通信标准组织 3GPP SA 副主席, 现任国际产业联盟 NGMN 董事成员等; 主导并参与承担了 10 个国家重大专项或重点研发计划项目, 主导中国移动承担的原创技术策源地建设和新一代移动通信国家工程中心建设等任务; 荣获省部级以上奖项 27 项, 参与的“第四代移动通信系统(TD-LTE)关键技术与应用”项目获得国家科学技术进步奖特等奖。



**王启星**, 中国移动研究院未来研究院副院长; 长期从事 TD-LTE、5G/6G 接入网等领域的技术研究和标准化工作。



**李娜**, 中国移动研究院高级研究员, 高级工程师; 主要从事 5G/6G 接入网架构与协议的相关设计工作。



# 柔性智简深度边缘节点



## Flexible Intelligent Network with Deep Edge Node

王晴天/WANG Qingtian, 王栋/WANG Dong,  
李泽旭/LI Zexu

(中国电信研究院, 中国 北京 102209)  
(China Telecom Research Institute, Beijing 102209, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404003

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240719.1809.006.html>

网络出版日期: 2024-07-22

收稿日期: 2024-06-12

**摘要:** 人工智能与通信的融合驱动6G网络智能化, 而边缘侧作为网络最先接入业务的部分, 需要为新型业务提供低时延智能化服务。提出了一种深度边缘节点架构, 该架构在网络边缘侧能够实现通信、算力、智能和数据的融合。剖析了支撑深度边缘节点的柔性智简和智能可编程技术, 认为网络的柔性和智简可编程技术将是未来网络逐步实现按需定制和自优化的关键技术。

**关键词:** 深度边缘; 智简网络; 6G

**Abstract:** The integration of artificial intelligence and communication drives the intelligence of 6G networks, and the edge, as the close part of the network to access services, needs to provide low-latency intelligent services. A deep edge node architecture that realizes the integration of communication, computing, intelligence and data at the edge of the network. The flexible, intelligent and programmable technologies that support deep edge nodes are analyzed. It is considered that the flexibility and intelligent programming technology of networks will play a key role in gradually achieving on-demand customization and self-optimization in the future.

**Keywords:** deep edge node; intelligent network; 6G

**引用格式:** 王晴天, 王栋, 李泽旭. 柔性智简深度边缘节点[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 10–13. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404003

**Citation:** WANG Q T, WANG D, LI Z X. Flexible intelligent network with deep edge node [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 10–13. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404003

2022年国际电信联盟 (ITU) 第41次会议发布了《未来技术趋势研究报告》<sup>[1]</sup>, 其中人工智能 (AI) 与通信的融合属于第六代移动通信技术 (6G) 的重点技术方向。AI在6G通信中的应用将推动网络从被动响应向主动智能转变, 使网络能够更高效地满足多样化的应用需求, 提供更优质的服务。随着技术的不断进步, AI将在6G网络中发挥越来越重要的作用, 成为未来通信技术发展的核心驱动力。国际上如第3代合作伙伴计划 (3GPP) <sup>[2]</sup> 已经开展针对智能化场景的研究, 内容涵盖无线接入网和核心网。开放无线网络 (O-RAN) <sup>[3]</sup> 联盟提出无线接入网智能控制器 (RIC) 以及对应的接口E2、A1等。中国如IMT-2030 (6G) <sup>[4]</sup> 推进组等也积极开展内生智能相关研究, 涵盖了需求场景、网络架构和关键技术。

6G智简网络<sup>[5-7]</sup>的提出是对未来网络趋势的预测和技术演进路线的探索, 是AI与通信融合技术的重要实现。在智能化方面, 6G智简网络将广泛应用AI和机器学习 (ML) 技术, 以实现网络的自适应、自优化和自愈能力。AI和ML可以帮助网络实时分析海量数据, 预测用户行为和网络状态, 从而动态调整资源分配, 优化流量管理, 提高网络的整体性

能。例如, 通过AI驱动的网络编排管理和网络可编程, 6G智简网络可以自动识别并修复故障, 减少人为干预, 提高网络可靠性; 在简化方面, 6G智简网络将进一步推进网络云化和虚拟化技术的应用, 并将网络功能从硬件中解耦出来, 以软件形式运行在通用硬件平台上, 从而大幅度简化网络架构和运维流程。云化技术和软件定义的方式使网络控制平面与数据平面分离, 提供集中管理的灵活性, 同时通过虚拟化网络功能, 减少了对专用硬件的依赖, 降低了成本, 并提升了部署效率, 便于网络升级和维护。

6G新场景和新业务的提出, 对网络提出了按需定制和快速响应的要求, 同时AI与通信的融合亦需要在接收业务最近的无线接入网侧具备对应的算力、智能和数据处理的能力。因此, 6G网络边缘侧需要一种新的架构来支撑网络自优化和提供第三方业务需求的能力。本文提出一种柔性智简深度边缘架构, 来解决6G网络在边缘侧的新型需求。

### 1 深度边缘节点

深度边缘节点 (DEN) 是边缘计算在6G的延伸, 也是



解决垂直行业需求边缘侧的载体，旨在通过将计算和数据处理能力部署在靠近数据源的位置，以满足现代应用对低延迟、高带宽和实时处理的需求。随着工业物联网（IIoT）和AI技术的迅速发展，数据生成的速度和规模呈指数级增长，传统的云计算模式依然存在着带宽负荷重和延迟问题。因此，深度边缘节点成为6G解决这些问题的关键。

深度边缘节点的主要特点是其高计算能力和智能化处理能力。与传统的边缘节点不同，深度边缘节点不仅具备基本的数据收集和初步处理能力，还能够执行复杂的计算任务，如实时数据分析、机器学习模型的推理和训练等。这使得深度边缘节点能够在6G网络边缘完成大量的数据处理工作，以及网络自优化和对业务场景计算、智能、网络连接和数据需求的提供。

深度边缘节点的“深度”包含了两方面的含义：第一，“深度”代表节点物理上的临近性，节点的部署位置更加趋近用户和场景，在贴近用户的6G网络边缘实现业务的快速实时响应、处理；第二，“深度”蕴含了能力的更加丰富，深度边缘节点中涵盖了部分核心网下沉的网元或者轻量级核心网、云化接入能力、以异构资源池形态存在的算力底座，以及内生智能生成的网络大脑<sup>[8-9]</sup>。

如图1所示，深度边缘节点主要包括基础设施层、可编

程资源池、智能控制功能和服务提供功能，以及针对数据采集和对网络内外提供数据服务的数据平面、提供智能服务的智能平面<sup>[10]</sup>。

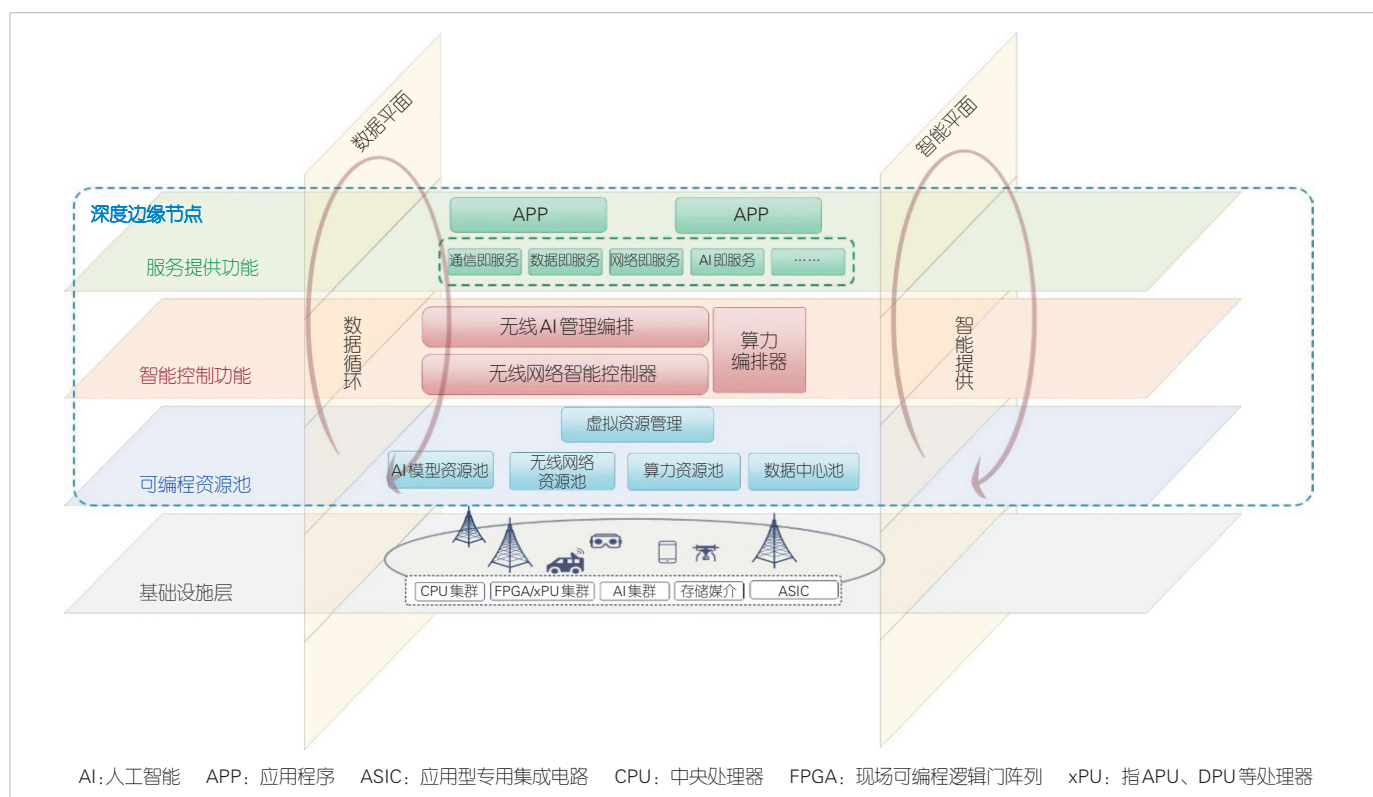
## 1.1 边缘融合

深度边缘节点的构建，可以将通信、计算、智能等资源构建成服务推向更贴近用户的边缘，通过深度边缘节点和网络的自适应协作，在边缘融合网络中推动无线通信和计算资源的深度融合。深度边缘节点亦将实现高度分布式人工智能的愿景，将6G网络智能化从核心节点转移到边缘融合网络中，从而减少时延、成本，降低安全风险，进而提高相关业务的效率。

在AI与通信融合的场景下，深度边缘节点是在边缘侧实现AI和通信融合的锚点，无线接入网（RAN）侧全云化/部分云化、智能可编程和服务化等技术均是支持AI与通信融合，以及内生AI落地的使能技术。

## 1.2 柔性智简

“柔性”指的是6G网络体系能够灵活适应和快速响应新场景的需求及技术的更迭。这种灵活性体现在多个方面，包括初始网络架构的设计、网络中异构资源的动态分配和服务的灵活提供。柔性网络可以根据差异化应用场景和多变用户



▲图1 深度边缘节点

需求进行快速调整，确保网络提供高效和可靠的服务。柔性在深度边缘节点中主要体现为：

#### 1) 架构的可扩展性

柔性边缘网络能够根据业务需求的变化和网络当前承载业务的类别进行资源的扩展或缩减。例如，随着 AI 业务数量的增加，网络能够动态扩展带宽和承载数据传输，增加计算资源，支持多样化 AI 模型的引入。

#### 2) 资源的动态调度编排

柔性网络除能够实时响应运营侧业务需求配置外，亦可根据实时需求动态分配网络中算力、带宽空口等网络资源，以及 AI 对应的数据和模型。利用当前云化、虚拟化等技术，并在相关网络优化 AI 模型的支持下，柔性网络能够灵活调整网络资源配置，优化网络性能。

#### 3) 网络服务的快速部署

柔性网络支持快速部署和新服务调整。如有新的服务需求，网络可以实现服务的快速上线、迁移、更新和删除等操作。

#### 4) 网络自愈能力

柔性网络具备强大的自愈能力，可以利用知识图谱等技术手段快速定位、修复故障，保证网络鲁棒性。

#### 5) 网络参数自优化

6G 新业务场景的加入，如数字孪生、工业互联网等，对网络的计算、存储和带宽等资源都提出新的需求，不同场景也涉及网络资源的分配问题。网络可以根据差异性业务场景的需求，动态、细颗粒度地调整参数和配置，保证多业务场景同时合理运行。

## 2 智能可编程

### 2.1 智能可编程概念

可编程的概念最初在固网中提出并得到一定推广。固网可编程的理念是实现数据包的灵活处理，突出与协议的无关性，通过 P4 语言灵活设计数据包处理的流水线，高效完成数据包转发。无线网络协议的复杂性以及信令对时间要求的及时性，导致网络很难实现对无线数据包的灵活处理，因此无线网络中可编程的概念与固网有一定的差异。在针对业务场景的可定制化和面向企业（ToB）等垂直领域时，智能可编程主要突出网络设计的灵活性。智能主要体现在：通过可编程接口能够实时获取数据，利用可编程框架能够实现 AI 模型的灵活嵌入和修改。

可编程概念与可编排有一定的区分度，主要差异有两点：

1) 作用对象不同：可编程网络指的是通过编程接口或某种编程语言来实现网络设备和网络功能的灵活配置、控制

和数据提取的能力；可编排网络强调的是在网络中实现灵活的服务编排和自动化，它涉及将网络功能以及服务按照特定的策略或逻辑组合、配置和管理，以满足特定的业务需求。

2) 作用范围不同：可编程关注于对网络数据平面进行编程，实现诸如媒体接入控制层（MAC）层调度、负载均衡等功能的灵活配置和定制化；可编排网络的关注点在于使用编排技术和工具，如自动化编排系统等，根据网络运营商或应用需求自动化地部署、配置和管理网络服务。

智能可编程可应用在 AI 与通信场景中，智能内生的实现需要设计对应的接口为 AI 算法提供实时的数据完成推理，然后将推理后的结果转换成网络配置参数，实时完成网络配置，即参数可编程。接着，AI 的训练依赖强大的数据支撑，需要定时提取相关数据，构建特征数据集，供 AI 模型的前期训练使用，也可以通过一定处理方式后将数据开放给第三方，即数据可编程。构建特征数据集的接口因为对实时性要求并不苛刻，因此当前从网管侧提取数据的模式可沿用。AI 算法在网络中的增、删、改也需要一套完整的框架和流程实现，在现阶段可以在满足安全性的情况下，在网络边缘侧和网管侧存储常用的 AI 模型，借助类似镜像仓库的方式实现 AI 算法的嵌入、删减和更新，即行为可编程，通过修改 AI 算法实现网络参数配置的更改，完成期望的网络行为。

因此，智能可编程技术是一种潜在的能实现 6G 网络中 AI 与通信融合的技术，能有效支撑 6G 无线系统按需适配、智慧内生和联合优化。

### 2.2 智能可编程功能

智能可编程技术是助力 6G 智能内生发展的一种潜在技术，通过相关接口能够灵活地实现 RAN 侧数据功能的获取和交互；针对收集到的数据进行处理和挖掘，找寻客观规律，有助于网络行为能力的提升；使能有关框架，导入和更新智能化模型，满足差异化场景的需求。

智能可编程通过相关接口能够灵活地实现无线网络侧数据的获取和存储；针对收集到的数据利用智能化方法进行处理和挖掘，找寻网络客观规律，有助于网络行为能力的提升；亦可借助有关实现手段，导入和更新智能化模型，满足差异化场景的需求。

智能可编程有如下优点：

1) 灵活性和可定制性：可根据特定的需求和场景，完成网络灵活配置和定制；

2) 动态适应性：通过可编程技术网络能够更好地适应环境和需求的变化，通过实时采集到的数据，检测网络的环境，利用智能化模型，动态调整参数和分配资源，以适应网

络、用户以及场景等的变化。

3) 快速部署和升级: 可编程技术能够借助特定的接口和框架, 实现网络的快速部署和升级, 缩短部署时间, 并能够快速部署新功能和服

4) 开放和创新: 智能可编程技术鼓励接口和协议的开放, 以促进创新和生态系统的发展。开放的编程接口和协议能够鼓励异厂商设备和应用的集成和互操作, 助力新技术的落地和创新的出现。

智能可编程当前在无线网络中还处于发展阶段, 诸如性能等还有待进一步验证。智能可编程的引入会带来额外的网络开销。同时, 智能可编程涉及异厂商的设备和组件, 不同设备和平台的兼容性可能会带来集成和管理方面的挑战。为了实现智能可编程, 无线网络侧需要逐步打开封闭的协议栈, 达到协议栈功能化、接口标准化和通用化的目标。同时, 无线网络侧也需要在硬件层面上支持相关的功能和接口, 实现编程工具和控制单元的交互。在智慧内生理念不断演进的背景下, 智能可编程将会助力无线网络朝着更加开放、更加智能的路线加速前进。

### 2.3 智能可编程作用域

智能网络可编程的主要目标为: 通过一种通用的框架和接口把内生智能需要的已经训练通过的AI模型, 灵活嵌入到RAN中的某一层实现对应的功能。例如, 当在MAC层中有调度需求时, 在现有MAC层调度策略输入和输出参数确定的情况下, 训练AI模型, 然后在MAC层中实现AI模型的推理功能, 即可在改变RAN架构的最低限度下实现内生智能的嵌入、升级、增加和删除等操作。同时, 针对如RAN切片和能耗优化等场景, 可以参考O-RAN中近实时RIC架构, 通过E2接口采集RAN中数据, 用于数据收集和AI模型训练, 并可通过E2接口实现AI模型推理后参数在RAN中的配置。近实时RIC利用xAPP的模式嵌入AI模型, 并设计有完整的AI调度流程, 可以高效实现多场景AI模型的灵活嵌入, 构建柔性可编程网络。因此, 智简可编程设计时并非需要改变当前的网络架构, 只需要开放部分网络数据和功能, 利用统一的平台实现数据的实时灵活抓取, 即可实现网络配置的及时下发, 以及AI模型的按需设计和部署。

## 3 结束语

当前6G无线网络的研究还处于关键技术筛选阶段, 面对新业务的需求以及网络形态的演进, 边缘侧的演进是6G网络的重要组成。深度边缘节点的提出, 满足了AI与通信的融合需求, 同时低时延智能服务的提供为6G新业务的支

撑提供了基础。在网络迈向云化和智能化的方向中, 网络的柔性和智简可编程技术将会是后续网络逐步实现按需定制和自优化的关键技术。因此, 尽早开展相关技术的研究和储备是推动6G领先的关键。

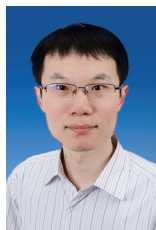
### 参考文献

- [1] ITU. Framework and overall objectives of the future development of imt for 2030 and beyond [EB/OL]. [2024-06-15]. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-d/oth/07/31/D07310000090015PDFE.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/oth/07/31/D07310000090015PDFE.pdf)
- [2] 3GPP. Homepage [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.3gpp.org>
- [3] O-RAN. Homepage [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.o-ran.org>
- [4] IMT-2030(6G). Homepage [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.imt2030.org.cn>
- [5] 张平, 许长桥, 李康睿, 等. 面向全息通信的6G智简网络架构 [J]. 无线电通信技术, 2024, 50(3): 407-412
- [6] 杨峰义, 刘洋, 王晴天, 等. 6G智简可编程网络 [J]. 信息通信技术, 2022, 16(3): 19-24
- [7] 彭木根, 孙耀华, 王文博. 智简6G无线接入网: 架构、技术和展望 [J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(3): 1-10. DOI: 10.13190/j.jbupt.2020-079
- [8] 刘洋, 李泽旭, 刘海涛. 6G边缘云网融合关键技术研究 [J]. 信息通信技术 & 政策, 2022(9): 60-63. DOI: 10.12267/j. issn. 2096-5931.2022.09.007
- [9] 中国电信, 紫金山实验室. 基于云网融合的6G关键技术白皮书 [R]. <https://test.gfnds.com/uploads/20220823/f52bfef2ff3f8739d79a9c876f18e924.pdf>
- [10] WANG Q T, LIU Y, WANG Y C, et al. Deep Edge Node enables AI native toward 6G [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). IEEE, 2023: 1-6. DOI: 10.1109/BMSB58369.2023.10211613

### 作者简介



王晴天, 中国电信研究院高级工程师、O-RAN联盟nGRG联席主席; 主要研究领域为6G智简可编程网络; 已发表论文10余篇。



王栋, 中国电信研究院6G研究中心网络架构与业务团队总监, 高级工程师, LFN ONAP TSC副主席; 研究方向包括6G网络架构、网络智能化关键技术; 已发表论文10余篇。



李泽旭, 中国电信研究院工程师, O-RAN联盟nGRG研究02组联席领导人; 主要研究领域为6G智能协同技术; 已发表论文10余篇。



# 面向6G的无蜂窝无线接入网技术



## Cell-Free Radio Access Network Technology for 6G

吴越/WU Yue<sup>1</sup>, 王东明/WANG Dongming<sup>1,2</sup>,  
尤肖虎/YOU Xiaohu<sup>1,2</sup>

(1. 紫金山实验室, 中国 南京 211111;

2. 东南大学移动通信国家重点实验室, 中国 南京 210096)

(1. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China;

2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240719.1809.004.html>

网络出版日期: 2024-07-22

收稿日期: 2024-06-10

**摘要:** 无蜂窝无线接入网 (CF-RAN) 作为一种新型的网络架构, 对6G的典型应用场景和关键技术指标均有重要的支撑作用。首先, 介绍了多天线技术以及网络架构的演进, 包括无蜂窝大规模多输入多输出 (CF-mMIMO) 技术以及基于该技术的无蜂窝无线接入网架构。接下来, 探讨了无蜂窝大规模MIMO技术对6G典型的应用场景的支撑, 包括基于无蜂窝系统的沉浸式通信、超大规模连接、超可靠低延迟通信、感知和通信融合、泛在连接场景, 以及基于人工智能和通信融合对无蜂窝系统的支撑, 并提出一些解决思路 and 新的研究方向。最后, 介绍了一种新型的无蜂窝无线接入网实现架构, 以及该架构对6G部分关键技术指标的支撑。

**关键词:** 无蜂窝大规模MIMO; 无蜂窝无线接入网; 6G

**Abstract:** Cell-free radio access network (CF-RAN), as a novel network architecture, plays a significant supportive role for the typical application scenarios and key technical indicators of 6G. Firstly, the evolution of multi-antenna technology as well as network architecture is introduced, including cell-free massive MIMO (CF-mMIMO) technology and the CF-RAN architecture based on this technology. Next, the support of CF-mMIMO technology for typical application scenarios of 6G, including cell-free system based immersive communication, massive communication, hyper reliable and low-latency communication, integrated sensing and communication, ubiquitous connectivity, as well as the support of cell-free system based on integrated artificial intelligence and communication, is introduced, and some solution ideas and new research directions are proposed. Finally, a novel architecture for CF-RAN and the support of this architecture for some of the key technical indicators of 6G are introduced.

**Keywords:** cell-free massive MIMO; cell-free radio access network; 6G

**引用格式:** 吴越, 王东明, 尤肖虎. 面向6G的无蜂窝无线接入网技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 14-25. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404004

**Citation:** WU Y, WANG D M, YOU X H. Cell-free radio access network technology for 6G [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 14-25. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404004

2023年6月, 国际电信联盟发布了《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》。该建议书汇聚了全球6G愿景共识, 描绘了6G目标与趋势, 提出了6G的典型场景及能力指标体系。

建议书明确6G将在5G三大场景基础上增强和扩展, 包含沉浸式通信、超大规模连接、极高可靠低时延、人工智能与通信的融合、感知与通信的融合、泛在连接六大场景。此外, 建议书还定义了15个能力指标。与5G相比, IMT-2030能力指标分为两类, 即针对IMT-2020增强的功能和支持IMT-2030扩展使用场景的新功能。每种功能在不同的使用

场景中可能具有不同的相关性和适用性。其中, 有9项功能源自现有的5G系统, 即针对IMT-2020增强的功能, 具体包括: 峰值速率、用户体验速率、频谱效率、区域流量密度、连接数密度、移动性、时延、可靠性、安全隐私韧性性能9个指标; 支持IMT-2030扩展使用场景的新功能, 具体包括: 覆盖、感知相关指标、AI相关指标、可持续性性能指标、互操作、定位6个指标。ITU建议的6G关键能力相比5G均有大幅提升, 这给6G组网带来巨大的挑战。

移动通信从1G到5G, 网络架构和系统实现架构也逐渐在演化, 支撑了从话音、数据到泛在连接的无线通信业务。在蜂窝移动通信系统发展的过程中, 从4G的研究阶段开始, 如何打破蜂窝架构, 进而持续提升移动通信系统的覆盖和容量, 一直是学术界的研究热点。无蜂窝无线接入网 (CF-

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFB1807200)

RAN) 以其独特的分布式接入点布局, 打破了传统蜂窝网络的小区界限, 提供了一种全新的网络覆盖和客户服务模式。这种架构通过消除小区间的硬性分割, 允许用户在不同接入点间无缝切换, 从而显著提高了网络的容量和覆盖质量。CF-RAN的物理层以分布式协作信号处理为理论基础, 形成了可扩展的无蜂窝大规模多输入多输出(CF-mMIMO) 多天线传输, 实现了基带处理的云化。当前业界认为, 3GPP R18和R19版本中加入的分布式MIMO解决方案为6G中的大规模分布式MIMO技术奠定了基础<sup>[1]</sup>, 进而也为演进到CF-mMIMO铺平了道路。

CF-RAN的极致性能使其可以较为全面地支撑6G的关键技术指标, 具体表现在:

1) CF-RAN与超高频谱效率。CF-RAN是6G提升频谱效率的核心技术, 通过大规模节点协作, 可以显著提升空分数据流的复用能力以及空分用户配对的成功率。

2) CF-RAN与超高峰值速率。结合高频段的大带宽特性, CF-RAN可以在提高系统频谱效率的基础上提高系统总吞吐量。

3) CF-RAN与用户体验速率、区域流量密度、连接数密度。CF-RAN支持密集部署的大规模节点同时同频服务大规模的空分用户, 因此, 用户体验速率、区域流量密度和连接数密度均可以显著提升。面向低功耗大连接的物联网场景, 充分挖掘CF-RAN极致的上行协作能力, 可以显著提升连接数, 并降低终端功耗。

4) CF-RAN与移动性。在支持高速移动场景时, 例如高铁通信和对空覆盖(ATG), CF-RAN可以有效避免传统小区覆盖时的频繁切换问题, 结合相邻节点的协作, 可以有效提升高速移动场景的性能。

5) CF-RAN与低时延高可靠通信。正如文献[2]指出的, 利用空-时互换理论, CF-RAN可以充分利用空间资源, 换取通信时间, 降低系统的时延, 充分挖掘多节点协作传输的分集性能, 可以提升系统的可靠性。总体上, CF-RAN可以通过设计时空二维编码<sup>[3]</sup>, 获得时延-可靠性-容量的折中, 实现超低时延和超高可靠传输。

6) CF-RAN与覆盖。牺牲CF-mMIMO的复用增益, 采用上行分集接收和下行相干传输可以有效拓展覆盖能力, 因此CF-RAN可有效支撑非地面网络。

7) CF-RAN与感知和定位。建立在多节点协作基础上的CF-RAN可以通过协作定位和协作感知有效提高算法精度。

8) CF-RAN与人工智能(AI)。AI在无线接入网的资源配置和网络维护与管理中有重要的作用。因此, AI用于CF-

RAN, 可以实现智能的空时频资源分配、用户与节点的关联等, 进一步提升CF-RAN的性能。

9) CF-RAN与可持续性性能指标。CF-RAN可以在现有部署的基础上, 通过协作大幅提升系统的性能。由于高能效是CF-RAN的基本优势之一, 因此CF-RAN架构非常符合未来移动通信系统的可持续性发展要求。

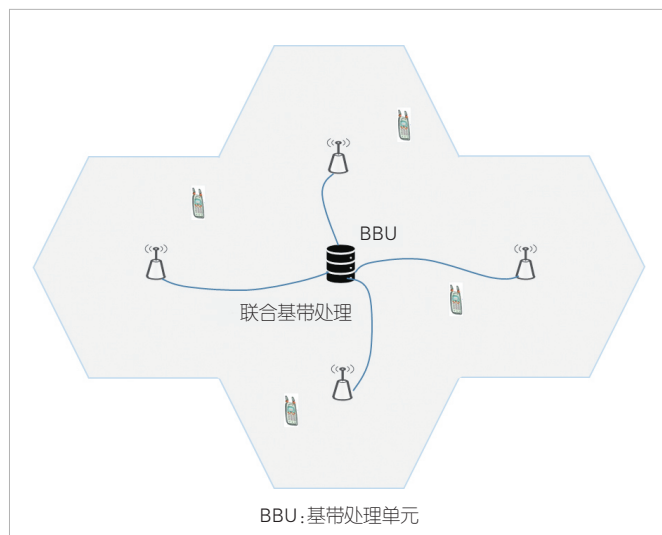
10) CF-RAN与互操作。CF-RAN可采用开放无线接入网(O-RAN)的架构, 引入新的开放接口, 因此具有良好的包容性和透明度。

## 1 多天线技术和网络架构的演进

### 1.1 多天线技术的演进

根据香农信息论, 增加并行信道的数量可以线性提高信道容量。多天线MIMO技术通过增加空间域并行信道的数量, 显著提升了无线通信系统的容量。因此, 多天线MIMO技术被视为提升移动通信系统技术指标(如频谱效率、峰值速率、可靠性等)的核心技术。

从3G到5G, 多天线技术也历经了点到点MIMO、点到多点的多用户MIMO(MU-MIMO), 以及多点到多点的多用户分布式MIMO。如图1所示, 将多个天线单元分散部署并将各天线的基带信号集中式处理, 可以形成分布式MIMO<sup>[4]</sup>。这种分布式MIMO同样能够在相同时频资源上为多个用户服务, 从而形成多点到多点的分布式MU-MIMO通信。相比于集中式MU-MIMO, 除了可以获得复用增益之外, 分布式MU-MIMO具有诸多特有的优点<sup>[4-5]</sup>: 1) 由于天线单元接近用户, 路径损耗较小, 提高了系统的能量效率; 2) 分布式



▲图1 分布式多输入多输出(MIMO)系统



MIMO还可以获得宏分集增益；3）分布式MU-MIMO可以化干扰为有用信号，在区域内提供较为一致的覆盖性能，并且已有的研究表明，相同天线数和发送功率下，分布式MU-MIMO的区域平均容量和中断容量均显著高于集中式MU-MIMO。

分布式MIMO引入蜂窝组网时形成了4G协作多点传输（CoMP）和5G多收发节点（Multi-TRP）的概念。虽然CoMP在4G进行了标准化研究，但是最终业界主要研究了小区间干扰协调、协作调度、协作波束赋形等技术，解决小区边界处同频复用的干扰问题。分布式MIMO带来的整体性能提升需要采用联合传输（JT）获得，包括上行联合接收机和下行相干联合传输（CJT）。对于上行联合接收，当多个TRP的基带信号汇聚到BBU时，联合接收机主要问题是多用户检测的复杂性。下行JT分为CJT和非相干联合传输（NCJT）。对于NCJT，网络侧缺少TRP之间的相位相干信息，难以在发送端消除多用户之间的干扰，因此，此类方法更适合单用户JT。由于分布式MU-MIMO系统存在节点间的时频同步问题，直到5G的R19才开始研究Multi-TRP间相位相干信息的获取问题<sup>[6]</sup>，使联合下行多用户预编码具备了可行性。

将分布式MU-MIMO技术拓展，增大协作节点的规模，形成大规模分布式MIMO，可以进一步提升系统性能。理论研究表明，随着节点部署密度和协作节点规模的增大，大规模分布式MIMO同样具有类似集中式mMIMO的信道“硬化”效果。当协作节点规模趋于无穷大，用户之间的信道具有统计正交性，此时，即使采用最大比发送（MRT）/最大比合并（MRC）仍可获得最优的性能<sup>[7]</sup>。

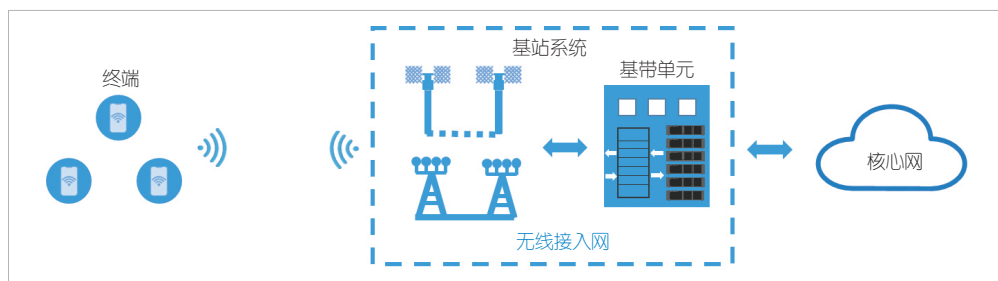
大规模分布式MU-MIMO的一种实现架构是全集中式，即所有参与协作的TRP采用前传网络（FH）连接到BBU，在BBU实现集中式协作传输。但是，当采用集中式处理时，考虑到前传网络的成本以及BBU的处理能力，这种方式不具备协作规模的扩展。文献[8]介绍了一种低复杂度的可扩展的大规模分布式MU-MIMO架构，其中TRP实现了全分布式的预编码/接收机。该分布式信号处理具有如下优点：1）由于多

用户检测和预编码以及信道参数获取均在TRP本地实现，其复杂性较低；2）采用前传网络后，集中式合并/分发易于云化和池化实现，系统整体的处理能力也易于可扩展；3）实际实现时，一个用户仅需要关联一定规模的TRP，一个TRP关联的用户数也有限，因此，即使系统中TRP和用户均趋于无穷，系统整体仍是可实现的，即系统具备可扩展。总的来说，采用可扩展的分布式协作信号处理方法，实现了全网的协作传输，具备打破传统蜂窝架构的能力，因此，学术界称之为CF-mMIMO<sup>[9]</sup>。可扩展的CF-mMIMO也为持续提升新一代移动通信系统的性能提供了基础理论和技术支撑。

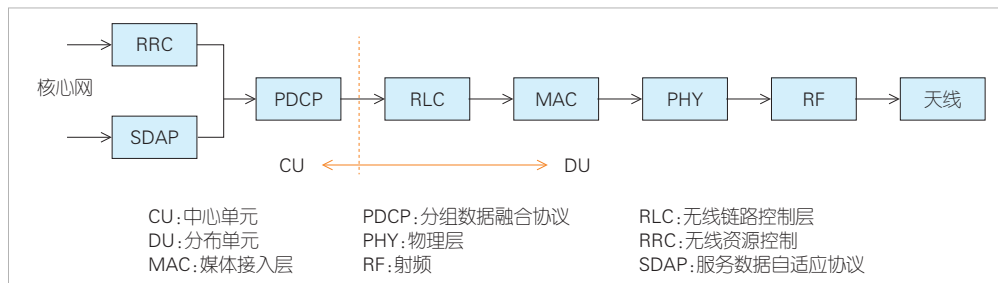
## 1.2 蜂窝移动通信系统与网络架构的演进

如图2所示，移动通信系统经过1G到5G的演进，基本上形成了用户终端（UE）和移动通信网络系统两大部分。其中，后者又包括无线接入网（RAN）和核心网两部分。

从网络架构的角度，当前5G新空口（NR）为了进一步提高灵活性，采用了3级架构，即分布单元（DU）-中心单元（CU）-核心网<sup>[10]</sup>。DU主要包括实时性较强的物理层、媒体接入层（MAC）和无线链路控制层（RLC）。CU包括实时性要求较低的处理，如分组数据融合协议（PDCP）、服务数据自适应协议（SDAP）和无线资源控制（RRC）。DU和CU是逻辑上的划分，它们共同构成了无线接入网系统，通过基站（BS，3GPP称为gNodeB）实现。图3给出了5G无线接入网的关键功能单元<sup>[10]</sup>。在5G系统中，每个CU可以连接1个或多个DU。CU和DU之间存在多种逻辑功能分割方案，可以适配不同的通信场景和不同的通信需求。



▲图2 5G移动通信系统的构成



▲图3 5G无线接入网关键功能

### 1.3 新型的无线接入网系统实现架构

无线接入网架构的创新是移动通信网络系统的研究热点。在移动通信系统演进的过程中,涌现出诸多新型的无线接入网实现架构,包括区块链无线接入网(B-RAN)<sup>[11]</sup>、云无线接入网(C-RAN)<sup>[12-13]</sup>、分布式RAN(D-RAN)、开放式无线接入网(O-RAN)<sup>[14]</sup>、近域无线接入网(P-RAN)<sup>[15]</sup>、CF-RAN<sup>[16]</sup>,以及在2024年世界移动通信大会成立的人工智能RAN(AI-RAN)等。当前,D-RAN采用BBU和射频拉远单元(RRU)的架构被广泛接受,但是由于BBU之间缺乏协作,系统性能和灵活性受到限制。C-RAN和O-RAN也是目前被广泛接受的RAN实现架构。

云化和虚拟化是无线接入网的发展趋势。CF-mMIMO的分布式协作信号处理是实现基带云化的关键途径,但是如何系统化实现“去蜂窝”还需要接入网架构的支撑。文献[16]提出了一种新型的全频谱无蜂窝无线接入网(CF-RAN),如图4所示。通过引入边缘分布式单元(EDU)汇聚多个TRP信号并完成分布式基带信号处理。以上行接收为例,检测出多个用户数据流后,EDU将其发送给以用户为中心的分布式单元(UCDU)。一个用户可以关联多个EDU,但是只能关联一个UCDU。在UCDU,可以将不同EDU发送过来的相同用户的数据流进行合并。对于下行传输,用户数据经UCDU分发至与之关联的EDU,在EDU实现本地的多用户预编码。由于EDU具备处理与频段相关的物理层信号的能力,而UCDU则仅需要关注高阶物理层(High-PHY),如调制解调和编解码等,因此该架构易于支撑高低频融合。

在CF-RAN的层2,可以使用准实时的无线智能控制器实现用户与TRP的关联,以及无线资源分配和多用户调度与配对等。为了实现无蜂窝系统的移动性,还需要一些非实时的集中化处理,这一部分协议栈可以在CU中实现。高级物理层以及层2和层3协议栈的实现,形成了虚化中心处理单元(vCPU)。

全频谱CF-RAN是在传统CoMP/Multi-TRP/分布式MIMO/分布式天线/C-RAN等技术基础上的进一步演进,可支撑6G关键能力指标的量级提升。下

面,我们将介绍CF-RAN的物理层CF-mMIMO传输关键技术、CF-mMIMO对6G关键能力的支撑及当前的研究进展,并给出一种CF-RAN的去蜂窝化协议栈设计。

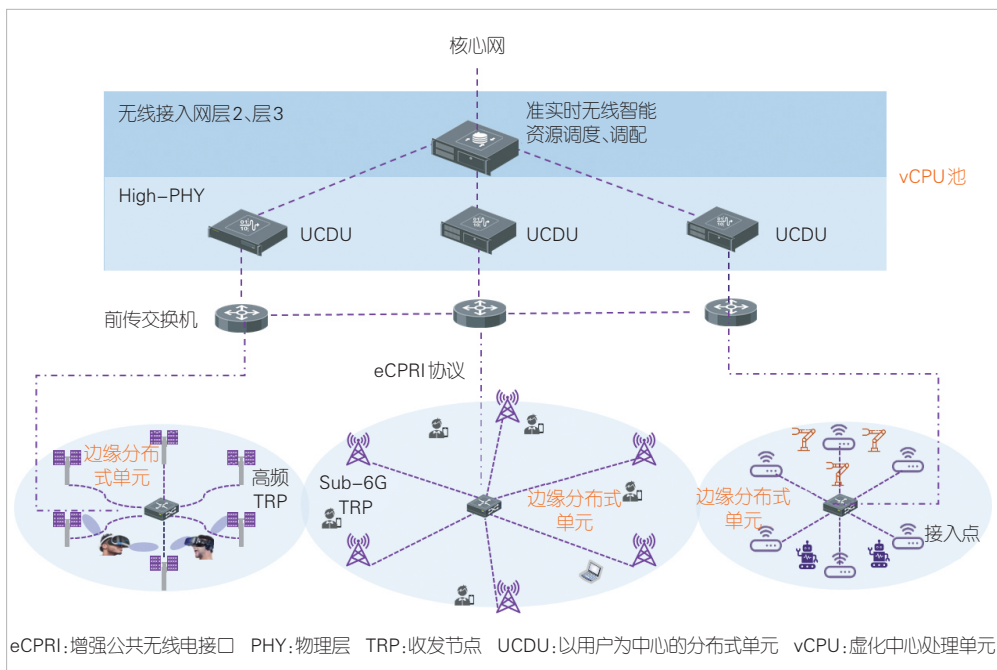
## 2 CF-mMIMO 传输关键技术

CF-mMIMO是提升频谱效率及峰值速率的关键技术。但是CF-mMIMO由于引入大规模分布式节点的协作传输,同样面临一些技术瓶颈,包括为了实现下行CJT面临的多节点之间的时频同步和互易性校准问题、下行CJT对相噪和互易性校准误差的鲁棒传输问题,以及上行分布式协作接收的复杂度与性能的权衡问题。

### 2.1 CF-mMIMO 节点间时频同步与互易性校准技术

在CF-RAN系统中,下行信道状态信息(CSI)的获取至关重要,也是多节点CJT技术的瓶颈。当系统工作在TDD模式下时,下行CSI常常根据上下行信道的互易性获得,即在相干时间内,空口的上下行信道是相同的。但是实际情况中,信道互易性会受到以下两种因素的影响:1)收发通道硬件电路的不同,导致空中信道与收发通道增益相乘之后的复合信道不再互易,这种影响可以通过互易性校准解决;2)网络侧节点间时频不同步,导致信道不互易,这需要通过网络侧的时频同步解决。

不同节点之间的时间差与系统的参考时间的获取方法有关。通常,如果节点均自由选择时间参考,节点之间是异步



▲图4 全频谱无蜂窝无线接入网示意图

的，必须有相应的同步机制以实现同步。例如文献[17]所考虑的Wi-Fi场景，节点之间采用空口同步机制，使得多个节点的时间对齐。如果每个节点独立地从GPS/Beidou中恢复时间，那么节点之间仍可能存在数十纳秒甚至上百纳秒的误差。由于各个节点独立恢复时间，时间的抖动也是需要考虑的一个问题。

节点之间的时钟同步同样影响CJT的实现。如果两个节点之间存在本振频偏，即使用户静止，用户到多个节点之间的信道由于频偏而随时间变化。节点的本振信号生成可以通过共本振时钟、共参考时钟、独立的本振3种方式实现。在实现CJT时，需要考虑节点之间时钟同步。

需要注意的是，互易性校准的过程本身也可以获得节点之间的时频同步。对于分布式部署，上下行互易性校准可以在网络侧通过自校准实现，即节点之间互发校准信号，估计节点的收发通道的互易性校准系数。为了实现大规模节点的相干协作传输，所有节点需要共相位参考，因此要求全网节点的校准。当节点规模较大时，需要研究如何以较低的实现复杂度，快速地实现全网校准。文献[18]采用遗传算法对RRU进行分组，尽可能地将邻近的RRU分别划分在不同的组中，以获得更好的校准性能。根据5G NR的动态时隙配置，文献[18]提出了一种特殊时隙配置的方法，从而实现RRU之间互相发送校准参考信号（CARS）。如图5所示，当RRU分组1特殊时隙的第5和第6个符号处于发送CARS时，RRU分组2处于保护周期（GP）和接收状态。同样地，当RRU分组2的第7和第8个符号处于发送CARS时，RRU分组1处于接收状态。两组RRU之间通过互相收发导频，从而估计出组间双向信道，最后再根据组间双向信道求解校准系数。一种总体最小二乘（TLS）法可以用来求解校准系数，但由于TLS算法涉及特征值分解，其复杂度是两组所有RRU天线数量之和的三次方量级。文献[18]提出一种基于Argos<sup>[19]</sup>的低复杂度算法，能将校准系数的求解复杂度降低一个

量级。

节点之间的时频同步和上下行互易性校准还可以通过UE反馈实现。在5G R19的标准化过程中，产业界提出了UE辅助的校准。文献[6]提出了一种UE反馈的校准方法，其核心思想是基站利用未校准的上行信道对专用的下行CSI-RS进行预编码，终端根据该参考信号的信道估计得到校准系数。

总的来说，基站侧自校准可以获得较好的性能且无须标准化，在不考虑互操作的情况下，仅需要设备商各自实现。UE反馈校准则需要较多的标准化工作，受到节点间时频同步硬件实现的影响以及反馈开销，均需要详细的讨论。为了获得更好的相干传输性能，如何跟踪节点之间相位漂移同样需要进一步的研究。

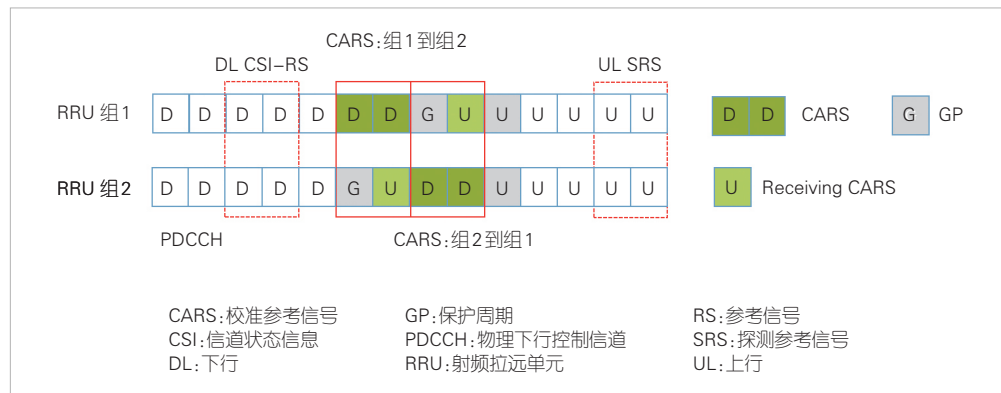
## 2.2 CF-mMIMO的鲁棒预编码技术

在CF-mMIMO系统的下行预编码中，相位噪声会对系统性能产生不可忽略的影响。相位噪声是一种乘性噪声，它的成因主要包括两个方面，即互易性校准误差和本振相位漂移。虽然采用互易性校准可以消除收发射频失配的影响<sup>[19-21]</sup>，但是互易性校准的误差不可避免，且该误差通常建模为乘性噪声<sup>[22]</sup>。此外，在CF-mMIMO中进行完美的时钟同步是困难的。即使信道是静态的，由于上行探测到下行预编码的延迟，且实际系统中多个节点之间不共本振的情况存在，振荡器的相位漂移现象是不可避免的<sup>[23]</sup>。由于相位漂移是一个无法测量的随机变量，因此相位噪声的问题在实际CF-mMIMO的下行预编码传输中是一个关键问题。

在CF-mMIMO或其他分布式天线系统中，通常认为每个AP或基站拥有不同的独立相位噪声<sup>[24-25]</sup>，最常见的建模方式是其相位满足一定范围的均匀分布或高斯分布。基于上述统计特性，可以对传统的集中式预编码方法进行增强，从而形成集中式鲁棒预编码方案。例如，基于信漏噪比（SLNR）<sup>[26]</sup>的低复杂度的次优

鲁棒预编码，以及基于加权最小均方误差的（WMMSE）的鲁棒预编码方法<sup>[27-28]</sup>。

在CF-RAN架构下，信道状态信息仅保存在EDU上，因此有必要研究分布式预编码方案。由于每个EDU仅能知道本地CSI的估计值，其他EDU上的CSI只能获得统计量等有限的知识，这相当于每个EDU只



▲图5 自校准参考信号配置



能获得对全局CSI的一个观测。此时,可以通过建立一个部分观测马尔可夫决策问题,决定每个节点采取的最优行动。文献[29]从预编码使得等效信道单位阵化的角度出发,设计了基于团队决策理论的分布式/多点协作预编码方案。然而,考虑到相位噪声的存在,还有必要进一步研究对相位噪声鲁棒的分布式预编码方法。文献[30]基于团队决策理论推导一种级联鲁棒分布式预编码。该预编码由三级预编码组成,其中第一层由EDU本地计算得到,第二层由EDU协作得到,最后一层则是通过CPU间的协作在CPU上计算得到。该方法可以看作是基于SLNR的鲁棒预编码的分布式实现,性能仍有优化的空间,需要研究人员提出更加行之有效的方案。

### 2.3 CF-mMIMO的分布式协作接收技术

CF-mMIMO的集中式接收机是将所有AP上的接收值都后传到CPU,由CPU进行集中处理。此外,CPU还需要一切接收均衡所需要的信息。然而,集中式接收机所面临的后传代价以及计算代价,会随着AP数量及每个AP的天线数量的提升从而变得不可接受。对于完全分布式接收,主要的问题则在于整体用户速率不高,尤其是信道状态良好的用户体验仍然不高。

文献[31-33]提出了一种两层接收机模型,即在AP和CPU两级进行了两次均衡合并,充分利用了分布式计算资源来提高上行的频谱效率。在AP端,每个AP仍然利用估计的本地信道状态信息自行均衡。均衡方法可以是局部(部分)最小均方误差(L(P)-MMSE),即AP在本地进行MMSE均衡。在CPU端则采用加权向量进行大尺度衰落解码(LSFD)合并<sup>[31-33]</sup>。

在CF-mMIMO的部署中,有一种采用射频条带的后传链路结构实现方式,它用一条射频条带串联起所有的AP。这种部署方式可以大大节约后传链路网络的铺设代价。文献[34]和[35]在该结构的基础上发展的序列式接收,分别提出谢尔曼-莫里森-伍德伯里(SMW)接收机<sup>[34]</sup>和序列MMSE接收机<sup>[35]</sup>。它们的工作方式都是按照射频条带的链接顺序,每个AP利用本地信息和前一个AP传送的信息,均衡信号后,将均衡后的信号以及新的辅助信息传送给下一个AP。通过所有AP的接力,在CPU端的接收信号可以达到很好的乃至与集中式最优方法相同的性能。

LSFD、SMW和序列MMSE等方法可以实现分布式接收机,但是这些方法还不能实现理想的性能。LSFD方法与完全分布式相比有了显著提升,但是与集中式接收机相比还存在明显的性能鸿沟,而两种序列接收机都需要反馈一个相当于用户符号估计 $K$ 倍的辅助信息( $K$ 为用户数量)。这种后

传的代价在序列式的处理中很可能造成系统时延不满足实际需求。因此,有必要进一步研究分布式接收技术。文献[36]提出了一种基于新型无蜂窝网络结构的分布式接收机。该方法的性能接近集中式接收机,且EDU到CPU的后传代价可以只是静态信息,从而较好地平衡性能和系统代价。

以上所讨论的均是线性接收机,在未来的研究中,非线性的分布式接收机的研究也值得考虑。此外,对于上行功率控制,目前主要考虑的是固定平均用户功率方案。如何在CF-mMIMO中实现分布式功率控制也是一个有意义的研究方向。

### 3 CF-mMIMO技术支撑超大规模连接

大规模机器通信(mMTC)是6G关键应用场景之一。在网络中支持海量MTC设备(MTCD)的超大规模随机接入场景下,如何有效地估计信道、检测活跃用户和对应的数据消息逐渐成为了热点研究课题。这是因为,在超大规模接入场景中,系统的可接入的用户设备量极大,此时由于可用信道资源是有限的,以往基于正交资源分配的方案将造成极大的信令开销,限制设备的接入效率。因此,基于免授权的非正交多址(NOMA)被认为是未来mMTC场景的关键技术方案之一。CF-mMIMO以其分布式的天线与计算单元部署和可扩展特性,可实现低功耗超大规模连接。除此之外,各AP之间相互协作,可进一步提升系统的估计与检测能力。结合以上特性,以CF-mMIMO为支撑的超大规模连接具有广阔的应用前景。

当前已有学者对CF-mMIMO海量连接展开了研究。文献[37]将用户活跃性检测方法建模成一类最大似然检测问题,通过较低计算复杂度的坐标下降算法对用户的信道大尺度系数进行估计,当估计值超过给定阈值的时候,检测该用户为活跃状态;否则检测为非活跃状态。结论表明,CF-mMIMO网络能够支持更低功耗的mMTC设备,并且能够提供更为广域的覆盖范围。文献[38-39]研究了应用在CF-mMIMO的海量随机接入方案,可以解决活跃用户检测和信道估计问题。利用信道矩阵的结构稀疏特性,研究人员提出了一种基于结构稀疏的广义近似消息传递算法(SS-GAMP),可以实现可靠的联合活跃用户检测和信道估计。在SS-GAMP的基础上,还提出了一类基于串行干扰消除的联合活跃检测与信道估计策略。仿真结果表明,相比于已有的方法,所提的方案能够得到显著的性能优势。

尽管如此,当前CF-mMIMO系统下的超大规模连接方案仍存在一些挑战需要解决。首先,目前研究的相关内容主要假设各AP与所有用户关联,在用户设备数量特别大的情况下会带来较高的处理时延,同时也对分布式信号处理单元



的计算能力提出了较高的要求。如何实现设备的无限可扩展性,同时降低系统处理复杂度,是一个需要解决的难题。其次,高速移动的海量接入场景,例如车联网、无人机低空通信等在CF-mMIMO系统中的应用方案还缺乏相应的研究。这涉及AP服务关联和动态预测,以及海量设备所带来的超大维度信号检测与估计的难题,还需要后续开展更进一步的研究。除此之外,CF-mMIMO系统中常见的分布式天线接收时钟异步问题,会限制超大规模连接在实际系统中的性能表现。因此,如何解决异步问题,最小化产生的影响,需要研究人员提出更加行之有效的方案。

#### 4 CF-mMIMO 技术支撑超可靠低延迟通信

传统的蜂窝式mMIMO作为5G的关键技术,满足一定条件下,通过增加天线数可以提供更大的分集增益,提高系统的传输速率和频谱效率。CF-mMIMO结构中消除了小区的概念,解决了小区间干扰和边缘服务不稳定的问题。接入点分散在不同位置上,距离用户更近。共享信道信息进行协作传输,不仅解决了高频信号易被遮挡的问题,还可以进一步提高频谱效率和链路的可靠性。文献[40]通过分析有限块长度下CF-mMIMO系统的传输错误(TE)概率和时间溢出(TO)概率来评估通信的可靠性和延迟。结果表明,通过速率选择、设备分组和空分复用,可以有效平衡系统的延迟和可靠性。

根据空时互换理论,牺牲大规模天线的空分复用增益,可以换取时延的降低和可靠性的提升。文献[3]研究了空时互换的编码技术,通过时-空二维编码,降低系统的时延,提升系统的可靠性。文献[41]对比了有限块长度下,时-空二维编码和时域编码的信道容量和色散。仿真结果表明,时-空二维编码可以通过增加空间自由度(DoF)有效减轻由短块长度引起的性能损失。然而,对于时域编码,每条空间链路独立编码,在任何空间DoF下,短块长度导致的性能损失将更为严重。这些结果表明,与时域编码相比,时-空二维编码能够更好地利用CF-mMIMO系统的空间维度优势,成为超可靠低延迟通信潜在的技术途径。

#### 5 CF-mMIMO 技术支撑感知和通信融合

通信感知一体化(ISAC)通过在同一系统中共享硬件、频谱和信号等物理资源,可以以较低的成本在传递信息的同时,感知目标物体的方位、距离和速度等状态信息,并获得融合增益和协作增益。在CF-RAN架构下,分布式部署的多个节点可以通过协作方式进一步丰富测量以增强感知和定位的精度,从而提高服务的可用性和准确性。

文献[42]提出了一种协作式的ISAC框架,利用携带信息的正交频分复用(OFDM)信号,在无蜂窝MIMO系统下实现目标物体的定位,网络中包含了多个发送AP和多个目标物体。通过CPU共享系统信息,通信信号被重复用作感知参考信号。首先,接收AP根据目标物体反射的感知参考信号,提取出时延信息,进而测量目标物体引起的散射路径范围。然后,根据测量结果估算目标物体的位置。

文献[43]研究了无蜂窝MIMO系统中ISAC波束的设计问题,分别完成了通信优先准则下的感知波束设计、感知优先准则下的通信波束设计以及“最大-最小”公平性准则下的联合通信和感知波束设计。仿真结果表明,这种联合通信和感知波束设计可以在通信和感知性能上均取得较好的效果。

除了可以进一步增强感知和定位的精度,CF-RAN和ISAC结合还可以为构建更安全、更私密的无线网络环境提供了新的可能性。文献[44]研究了无蜂窝MIMO系统中ISAC安全空间信号的设计。其中,多个AP在给UE提供通信服务的同时,还需完成对窃听者的感知。为了提高系统对窃听者的鲁棒性,文献[44]在ISAC波形中包含了人工噪声(AN)以此降低窃听信道的质量。仿真结果表明,在无蜂窝MIMO系统架构下,可以通过调整AN的角域方向性有效地保证合法用户的通信安全。

网络化协作感知是无蜂窝无线接入网的优势,但是无蜂窝系统的协作感知也面临一些挑战。通常无蜂窝系统节点的天线数有限,单节点感知精度较差,多节点信号域的融合感知以及分布式感知融合均需要进一步研究。另外,感知如何辅助提升无蜂窝系统通信的性能也需要进一步研究。

#### 6 CF-mMIMO 技术支撑泛在连接

得益于灵活的可扩展能力,CF-RAN架构被认为是支持广域覆盖和空地一体泛在接入的有效技术途径。对于分布式部署的CF-mMIMO系统,由于不同AP到不同UE的距离不同,对应的传播时延不同,从而导致网络无法做到所有AP对每个UE的发送信号在同一时刻到达。例如,接收机会跟先到达的发送信号进行同步,后到达的异步信号则会产生时延扩展差异(DSD)。考虑OFDM系统,对于室分系统等小范围场景,异步信号产生的符号间干扰(ISI)可以通过循环前缀(CP)削弱。在去除CP以及完成逆快速傅立叶变换(IFFT)之后,DSD会导致接收信号在解调过程中产生随子载波索引变化的相位旋转因子,这将对系统性能产生负面影响。文献[45]在5G NR协议框架下研究了2~4个资源块(RB)对应的宽带预编码算法,该方法可以有效对抗DSD导致的系统性能下降。

对于非地面网络（NTN）通信，例如面向卫星通信以及低空通信等大范围覆盖场景，多个AP到不同UE的时延差大于CP，此时将会产生异步干扰问题。除了DSD带来的接收信号相位旋转问题，异步干扰还会带来ISI、载波间干扰（ICI）以及多用户干扰（MUI）。文献[46]分析了CF-mMIMO系统中异步接收对上行可达速率的影响，结果表明相比于MRC接收机，性能更好的MMSE接收机对异步干扰更加敏感。文献[47]分析了大规模分布式MIMO系统中异步接收对下行用户速率的影响，结果表明大多数用户的下行单用户速率可能会降低约50%。因此，在系统设计过程中，非常有必要考虑异步干扰这一因素的影响。一种解决异步干扰的有效方法是将CF-mMIMO与mMIMO进行结合，利用mMIMO节点的空分能力和窄波束特性，采用波束调度以及主动同步<sup>[48-49]</sup>，实现下行同步传输，并结合异步干扰抵消技术，提升上行传输的性能。未来，随着星间通信能力的提升，在星上实现分布式协作信号处理，可以解决地面终端发射功率不足的问题，因此也是实现手机直连卫星的一个关键技术途径。

## 7 基于人工智能和通信的融合的CF-RAN技术

现代通信网络日益复杂，需要管理大量的用户设备，满足多样化的服务需求。CF-RAN架构的引入进一步增加了网络设计的复杂性。AI技术，特别是深度学习和强化学习，已经在多个领域显示出强大的数据处理和模式识别能力。应用AI技术提高网络的自适应性、自动化水平和决策效率，可以在无线接入网的资源配置和网络维护与管理中发挥出重要的作用。

当前，AI在网络优化、无线资源管理以及网络数字孪生中的应用已受到广泛的关注<sup>[50-51]</sup>。开放式无线接入网（O-RAN）提出了无线智能控制器（RIC）的概念，取代自组织网络（SON）和无线资源管理（RRM）的大部分功能，让RIC实现真正的无线资源控制。RIC不要求设备商开放RAN系统内部结构，只要求开

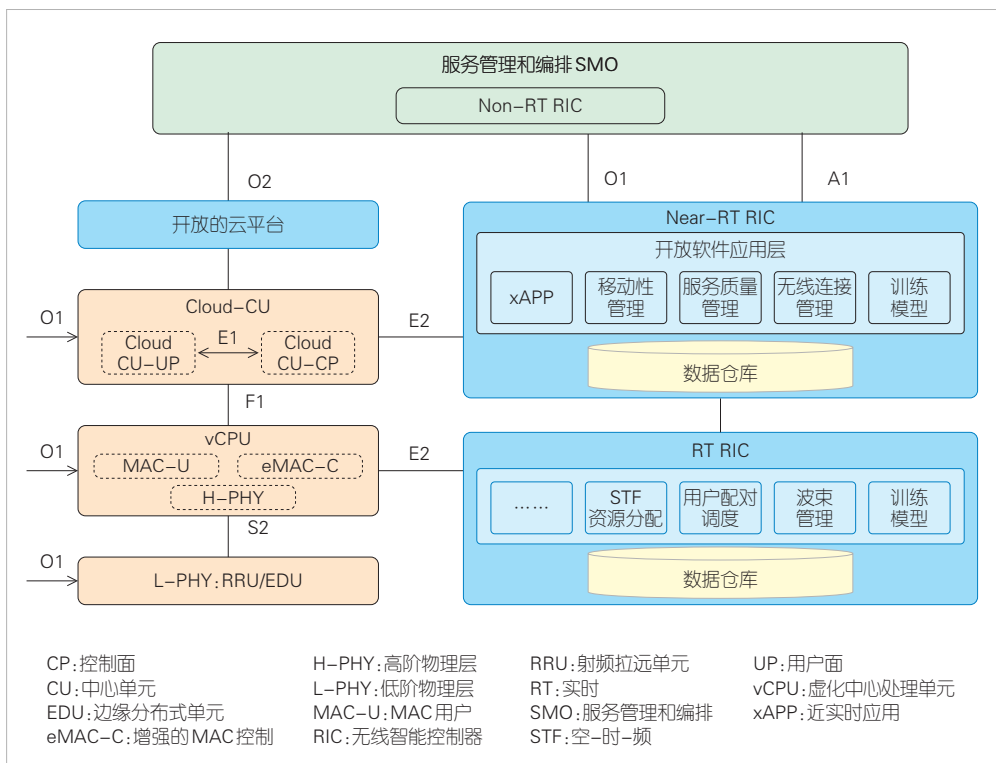
放接口，资源调度权限留给RAN设备商，从而保护设备商的利益并避免对现有RAN系统太多修改。根据开放的数据接口，可以将第三方的xAPP加入到RIC，从而带来极高的灵活性。这样的设计使得一些创新的想法可以得到快速验证，缩短新功能部署周期。

如图6所示，文献[51]在CF-RAN架构下提出了分级智能优化的架构，包括非实时智能控制（Non-RT RIC）、近实时部分（Near-RT RIC）和实时智能控制（RT-RIC）。通过新增的A1和E2接口，CF-RAN形成数据仓库，支撑分级智能的离线和在线训练。

从图6中可知，CF-RAN架构的管理包括了服务管理和编排（SMO）和Non-RT RIC功能，可实现秒级/百毫秒级的网络智能管理和运维，例如网络故障检测、RRU优化部署与管理、RAN分析、网络节能等，通常需要高维度海量数据支撑。SMO通过O1和O2接口实现Cloud-CU、vCPU、EDU/RRU、Non-RT RIC等的管理。

Near-RT RIC可以实现网络区域级的智能，包括网络负载均衡、干扰管理、移动性管理、多关联的管理、QoS管理等。这种区域级的智能，通常要求时延在数十毫秒级，但是实时性要求相对较低。

RT-RIC可以实现UCDU中的智能控制，包括空-时-频（STF）资源分配、用户配对和调度、波束管理等实时性要



▲图6 无蜂窝无线接入网(CF-RAN)的RIC实现架构

求较高的功能。RT-RIC需要层1和层2的数据支撑。

## 8 CF-RAN 上层协议栈设计

### 8.1 新型CF-RAN的vCPU实现架构

图7所示给出了CF-RAN的实现架构。EDU与一个或多个RRU连接，EDU与RRU之间的连接关系是静态的。当EDU与一个RRU连接时，EDU的功能可内置于RRU中，即为传统的全分布式实现的CF-mMIMO。当RRU和EDU分离实现时，两者之间的接口可以采用传统的Option 8公共无线电接口（CPRI）接口或者O-RAN的Option 7-2a的增强公共无线电接口（eCPRI）接口。RRU实现各频段信号的收发，EDU实现低阶物理层（L-PHY），包括空-时-频解耦合。由于EDU和UCDU采用可扩展的分布式协作信号处理，可以实现物理层的云化和池化。

为了实现用户的移动性和大范围组网，需要实现高层控制的云化，相应地，还需要研究RAN的层2（L2）和层3（L3）的可扩展实现。另外，以用户为中心的CF-RAN对可扩展的MAC层多用户资源调度也提出了新的挑战。充分利

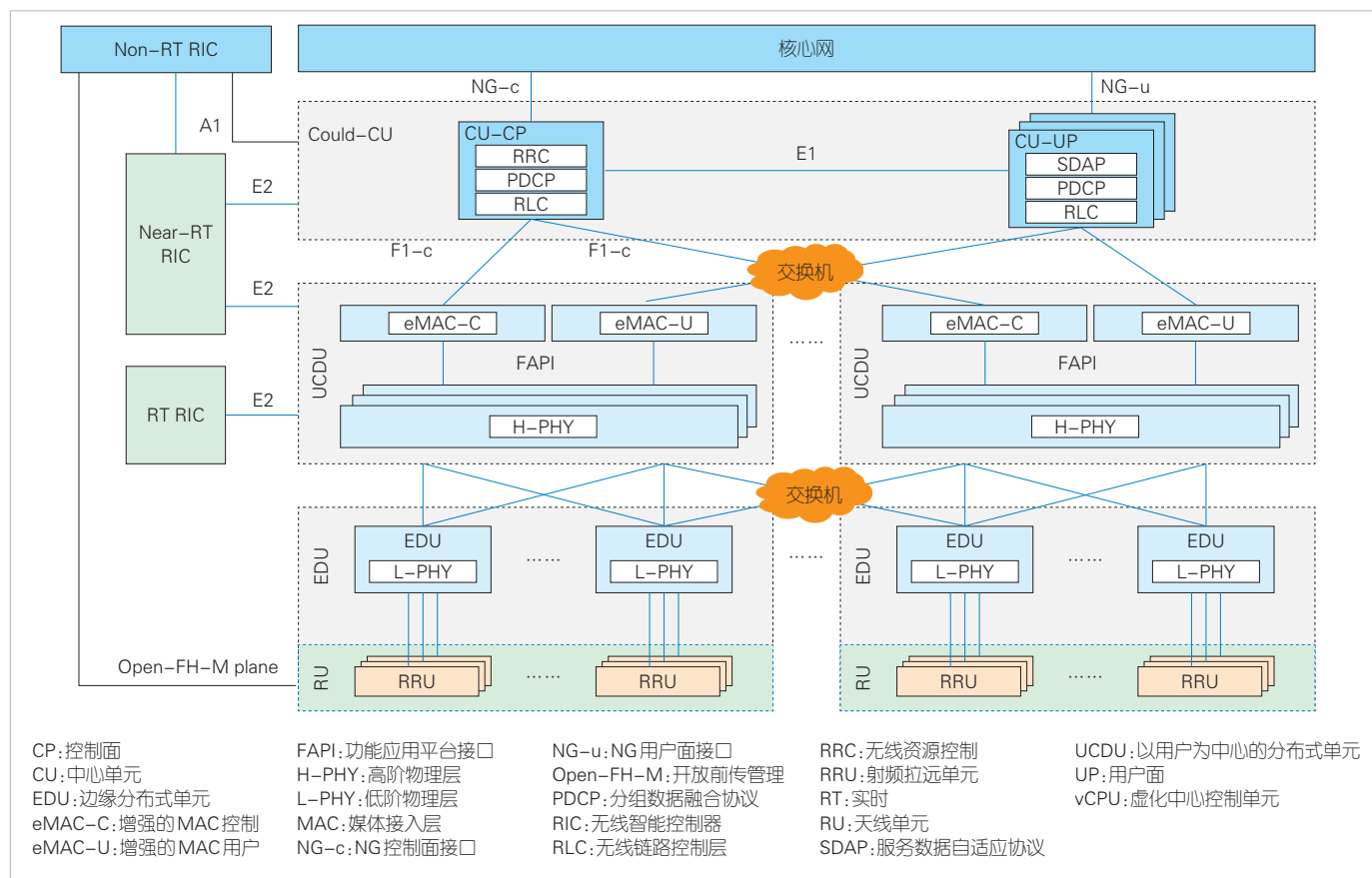
用终端与多节点的统计信道信息，结合AI技术，可以有效解决这些问题。

如图7所示，结合RIC技术，我们提出了以用户为中心的CF-RAN的vCPU实现及上层协议栈设计架构。vCPU与EDU之间采用eCPRI协议，可以采用普通的交换机连接。vCPU包括多个UCDU和Cloud CU两部分。

UCDU包括高阶物理层（H-PHY）和MAC层。H-PHY实现与EDU的接口，实现分布式协作基带处理。H-PHY与MAC层之间采用功能应用平台接口（FAPI）接口。UCDU的协议栈实现也分为控制面和用户面。MAC层的实现包括增强的MAC控制（eMAC-C）面和用户（MAC-U）面。eMAC-C实现以用户为中心的关联、配对、调度及资源分配。

CU和UCDU之间采用F1接口。为了实现可扩展的实现以及CU的云化，CU也分为用户面（CU-UP）和控制面（CU-CP）。CU-CP包括RLC、PDCP和RRC，CU-UP包括RLC、PDCP和SDAP。

采用AI可以显著提升RAN的无线资源的管理以及网络部署和优化的性能，也可以实现更好的运营。我们采用普适分级智能（PML）的RIC架构<sup>[51]</sup>，包括实时RIC（RT-RIC）、



▲图7 无蜂窝无线接入网(CF-RAN)的vCPU实现及协议栈设计



近实时 RIC (Near RT-RIC)<sup>[52]</sup> 和非实时 RIC (Non RT-RIC)。RT-RIC 和 Near RT-RIC 通过 E2 接口与 UCDU 和 Cloud-CU 进行交互<sup>[53]</sup>。Non-RT-RIC 通过 A1 接口与 Cloud-CU 进行交互。Non-RT-RIC 与 RRU 之间通过管理面消息进行配置和管理<sup>[54]</sup>。

## 8.2 CF-RAN 与移动性: 用户无感 UCDU 关联

在 CF-RAN 系统中, 当用户发生移动时, 为支持无蜂窝协作传输, 需要在 UCDU 之间完成实时的 RRU 动态关联。每个 UCDU 都配置与之关联的 RRU 集合  $\Omega_{RRU}^{UCDU}$ 。如图 7 所示, EDU 与 UCDU 之间可采用交换机连接, 不同 UCDU 的  $\Omega_{RRU}^{UCDU}$  有重叠。

在 Cloud-CU, RRC 模块根据 SRS 的接收信号, 测量出用户到各 RRU 的信噪比及到达时间, 可感知到服务用户的位置的变化, 进而更新 RRC 模块维持用户关联的 RRU 集合  $\Omega_{RRU}^{RRC}$ 。一种简单的方法是, 当主服务的 eMAC-C 实体所在的 UCDU 连接的 RRU 在  $\Omega_{RRU}^{RRC}$  集合中的数量小于该集合中其他 UCDU 所连接的 RRU, 并保持一定的时间后, Cloud-CU 的 RRC 模块通知源 eMAC-C 停止该用户的上下行调度, 转而由目标 eMAC-C 继续调度该用户。另一种方法是, Cloud-CU 根据 eMAC-C 上报的与用户实际收发数据业务的 RRU 集合  $\Omega_{RRU}^{MAC}$ , 当主服务的 eMAC-C 实体所在的 UCDU 连接的 RRU 在该集合中的数量小于该集合中其他 UCDU 所连接的 RRU, 并保持一定的时间后, Cloud-CU 的 RRC 模块通知源 eMAC-C 停止该用户的上下行调度, 转而由目标 eMAC-C 继续调度该用户。

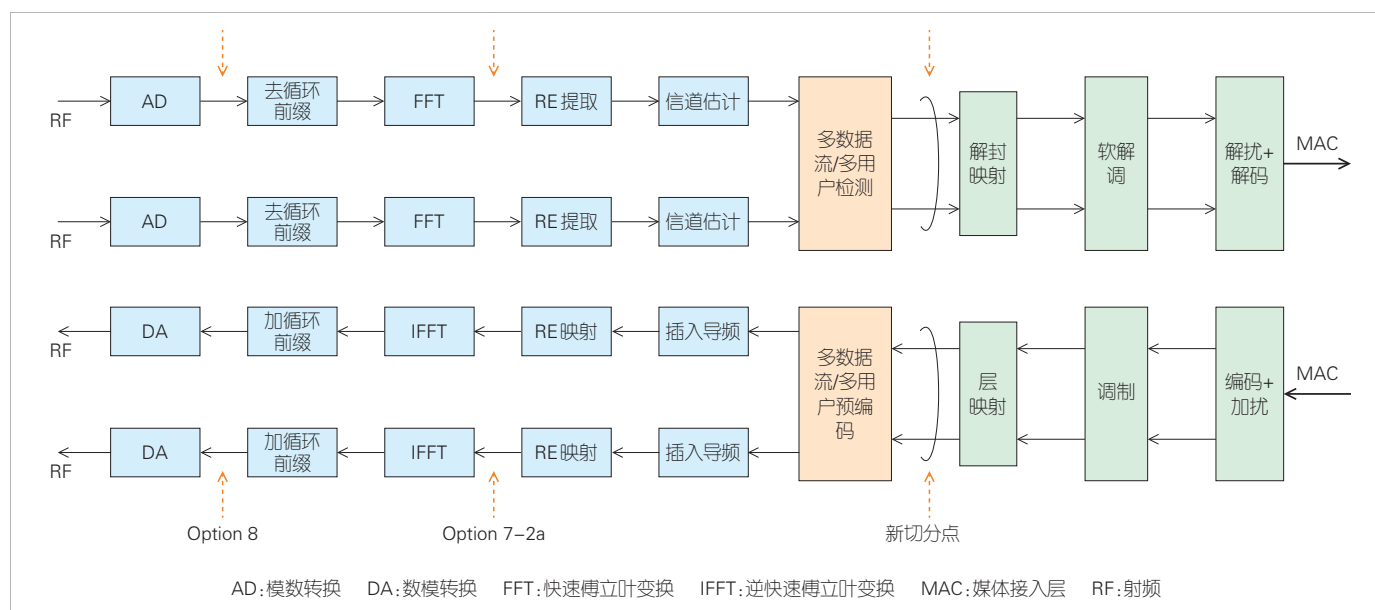
可扩展的无蜂窝大规模 MIMO 系统中, 大规模节点可以

被视为一个小区, 因此协议栈需要将这些节点视为空域资源, 由 MAC 层调度实现用户与节点的动态关联。但是在大规模覆盖时, 仍需要单个小区的基站支持多个 eMAC-C 模块。因此, Cloud-CU 需要在上层实现对各个 UCDU 所服务的用户进行管理。当前 5G NR 及演进标准制定了比较完善的波束域接入、切换和恢复等机制, 这些机制与无蜂窝系统大规模节点协作有相通之处。由此可见, 在协议栈设计方面, 也可以借鉴相关方法。

## 8.3 CF-RAN 与互操作性: 新型物理层切分方式

由于采用分布式协作传输, CF-RAN 物理层的信号处理下沉到 RRU 或 EDU, 因此, 需要设计新型的前传接口。图 8 给出了 O-RAN 常用的切分接口和新型的切分接口<sup>[54]</sup>。O-RAN 的 Option 7-2a 定义在 FFT/IFFT。

无蜂窝系统的基带处理需要将上行多用户检测和下行多用户预编码下沉到 RRU 或 EDU。因此, 可以将低阶的物理层在 RRU/EDU 实现, 而高阶物理层在云化的 UCDU 实现。如图 8 所示, EDU 与 UCDU 之间的功能切分在数据流层面<sup>[6]</sup>。数据流可以是在相同时频资源上传输的空间域数据流, 也可以是采用正交时频资源分配的用户数据流。对于上行接收链路, 数据流是指检测器输出的多个用户的数据流或单个用户的多个数据流; 对于下行发送链路, 数据流是指基站待发送的在相同时频资源上多个用户/或单个用户的数据流。在 O-RAN 的 Option 7-2a 的 eCPRI 基础上进一步增强, 可以实现新型的前传。



▲图8 开放无线接入网(O-RAN)常用的切分接口和新型的切分接口

## 9 结束语

CF-RAN是一种新型的网络架构,打破了传统蜂窝网络小区的概念,通过分布式协作的方式为用户设备提供无缝的覆盖,减少了信号盲区,提升了用户体验。利用上行分布式接收和下行相干联合传输技术,无蜂窝大规模MIMO可以有效提升系统的频谱效率,并结合通感融合、AI等技术成为支撑6G典型应用场景和关键技术指标的有效技术途径。但需要看到,CF-RAN及CF-mMIMO仍有一些理论和技术瓶颈问题需要进一步研究,并通过试验验证其可实现性。

### 参考文献

- [1] 3GPP. The next wave of 5G - 3GPP release 19 [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.ericsson.com/en/blog/2023/12/3gpp-release-19>
- [2] YOU X H. 6G extreme connectivity via exploring spatiotemporal exchangeability [J]. Science China information sciences, 2023, 66(3): 130306. DOI: 10.1007/s11432-022-3598-4
- [3] YOU X H, ZHANG C, SHENG B, et al. Spatiotemporal 2-D channel coding for very low latency reliable MIMO transmission [C]// Proceedings of IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2022: 473-479. DOI: 10.1109/GCWkshps56602.2022.10008621
- [4] WANG D M, WANG J Z, YOU X H, et al. Spectral efficiency of distributed MIMO systems [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2013, 31(10): 2112-2127. DOI: 10.1109/JSAC.2013.131012
- [5] YOU X H, WANG D M, WANG J Z. Distributed MIMO and cell-free mobile communication [M]. Singapore: Springer, 2021
- [6] Qualcomm. CSI enhancements for up to 128 ports and UE-assisted CJT with non-ideal TRP synchronization [R]. 2024
- [7] NGO H Q, ASHIKHMIN A, YANG H, et al. Cell-free massive MIMO versus small cells [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2017, 16(3): 1834-1850. DOI: 10.1109/TWC.2017.2655515
- [8] 王东明. 面向6G的无蜂窝大规模MIMO无线传输技术 [J]. 移动通信, 2021, 45(4): 9-15
- [9] NAYEBI E, ASHIKHMIN A, MARZETTA T L, et al. Cell-free massive MIMO systems [C]//Proceedings of 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. IEEE, 2015: 695-699. DOI: 10.1109/ACSSC.2015.7421222
- [10] NGMN Alliance. 5G RAN CU-DU network architecture, transport options and dimensioning [R]. 2019
- [11] LING X T, WANG J H, BOUCHOUCHA T, et al. Blockchain radio access network (B-RAN): towards decentralized secure radio access paradigm [J]. IEEE access, 2019, 7: 9714-9723. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2890557
- [12] China Mobile Research Institute. C-RAN: the road towards green RAN[R]. 2010
- [13] PAN C H, ELKASHLAN M, WANG J Z, et al. User-centric C-RAN architecture for ultra-dense 5G networks: challenges and methodologies [J]. IEEE communications magazine, 2018, 56(6): 14-20. DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700483
- [14] O-RAN Fronthaul Working Group. Control, user and synchronization plane specification [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.o-ran.org/specifications>, 2020.
- [15] BI Q. The proximity radio access network for 5G and 6G [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(1): 67-73. DOI: 10.1109/MCOM.001.21494
- [16] WANG D M, YOU X H, HUANG Y M, et al. Full-spectrum cell-free RAN for 6G systems: system design and experimental results [J]. Science China information sciences, 2023, 66(3): 130305. DOI: 10.1007/s11432-022-3664-x
- [17] HAMED E, RAHUL H, ABDELGHANY M A, et al. Real-time distributed MIMO systems [C]//Proceedings of the 2016 ACM SIGCOMM Conference. ACM, 2016: 412 - 425.. DOI: 10.1145/2934872.2934905
- [18] CAO Y, WANG P, ZHENG K, et al. Experimental performance evaluation of cell-free massive MIMO systems using COTS RRU with OTA reciprocity calibration and phase synchronization [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(6): 1620-1634. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3276057
- [19] SHEPARD C, YU H, ANAND N, et al. Argos: practical many-antenna base stations [C]//Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2012: 53-64.. DOI: 10.1145/2348543.2348553
- [20] XU S, CAO Y, LI C G, et al. Spanning tree method for over-the-air channel calibration in 6G cell-free massive MIMO [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2023, 22(8): 5567-5582. DOI: 10.1109/TWC.2023.3235355
- [21] PAPADOPOULOS H, BURSALIOGLU O Y, CAIRE G. Avalanche: fast RF calibration of massive arrays [C]//Proceedings of IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP). IEEE, 2014: 607-611. DOI: 10.1109/GlobalSIP.2014.7032189
- [22] CAO Y, LIANG X H, WANG X N, et al. Performance of cell-free massive MIMO under imperfect channel state information and reciprocity calibration [J]. IEEE systems journal, 2023, 17(3): 4383-4394. DOI: 10.1109/JSYST.2023.3269145
- [23] FANG Y, QIU L, LIANG X W, et al. Cell-free massive MIMO systems with oscillator phase noise: performance analysis and power control [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(10): 10048-10064. DOI: 10.1109/TVT.2021.3100862
- [24] YOU L, LIU A, WANG W J, et al. Outage constrained robust multigroup multicast beamforming for multi-beam satellite communication systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2019, 8(2): 352-355. DOI: 10.1109/LWC.2018.2872710
- [25] YAN Y, AN K, ZHANG B N, et al. Outage-constrained robust multigroup multicast beamforming for satellite-based Internet of Things coexisting with terrestrial networks [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(10): 8159-8172. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3042831
- [26] SADEK M, TARIGHAT A, SAYED A H. A leakage-based precoding scheme for downlink multi-user MIMO channels [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2007, 6(5): 1711-1721. DOI: 10.1109/TWC.2007.360373
- [27] HAN S Q, YANG C Y, WANG G, et al. Coordinated multi-point transmission strategies for TDD systems with non-ideal channel reciprocity [J]. IEEE transactions on communications, 2013, 61(10): 4256-4270. DOI: 10.1109/TCOMM.2013.090313.120667
- [28] SHI Q J, RAZAVIYAYN M, LUO Z Q, et al. An iteratively weighted MMSE approach to distributed sum-utility maximization for a MIMO interfering broadcast channel [J]. IEEE transactions on signal processing, 2011, 59(9): 4331-4340. DOI: 10.1109/TSP.2011.2147784
- [29] MIRETTI L, BJÖRNSON E, GESBERT D. Team MMSE precoding with applications to cell-free massive MIMO [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(8): 6242-6255. DOI: 10.1109/TWC.2022.3147895
- [30] HONG Z Y, XU S, LI T, et al. Robust cascaded team MMSE precoding for cell-free distributed downlink under hierarchical fronthaul [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, PP(99): 1. DOI: 10.1109/TWC.2024.3416296
- [31] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L. Making cell-free massive MIMO competitive with MMSE processing and centralized implementation [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2020, 19(1): 77-

90. DOI: 10.1109/TWC.2019.2941478
- [32] BJÖRNSON E, SANGUINETTI L. Scalable cell-free massive MIMO systems [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(7): 4247–4261. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2987311
- [33] ZHANG J Y, ZHANG J, BJÖRNSON E, et al. Local partial zero-forcing combining for cell-free massive MIMO systems [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(12): 8459–8473. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3110214
- [34] VAN ROMPAEY R, MOONEN M. Scalable and distributed MMSE algorithms for uplink receive combining in cell-free massive MIMO systems [C]//Proceedings of ICASSP 2021 – 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2021: 4445–4449. DOI: 10.1109/ICASSP39728.2021.9414456
- [35] SHAIK Z H, BJÖRNSON E, LARSSON E G. MMSE-optimal sequential processing for cell-free massive MIMO with radio stripes [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(11): 7775–7789. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3100619
- [36] HONG Z Y, LI T, LI C G, et al. Group-joint MMSE complementary based distributed uplink for cell-free massive MIMO [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, PP(99): 1. DOI: 10.1109/TWC.2024.3403541
- [37] GANESAN U K, BJÖRNSON E, LARSSON E G. An algorithm for grant-free random access in cell-free massive MIMO [C]//Proceedings of IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2020: 1–5. DOI: 10.1109/SPAWC48557.2020.9154288
- [38] KE M L, GAO Z, WU Y P, et al. Massive access in cell-free massive MIMO-based Internet of Things: cloud computing and edge computing paradigms [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2021, 39(3): 756–772. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3018807
- [39] KE M L, GAO Z, WU Y P, et al. Compressive sensing-based adaptive active user detection and channel estimation: massive access meets massive MIMO [J]. IEEE transactions on signal processing, 2020, 68: 764–779. DOI: 10.1109/TSP.2020.2967175
- [40] ZHANG Z Y, YOU X H, WANG D M, et al. Performance of multidevice downlink cell-free system under finite blocklength for uRLLC with hard deadlines [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(7): 2090–2106. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3280962
- [41] YE F, YOU X H, LI J M, et al. Explicit performance bound of finite blocklength coded MIMO: time-domain versus spatiotemporal channel coding [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://arxiv.org/abs/2406.13922>
- [42] ZHANG Z K, REN H, PAN C H, et al. Target localization and performance trade-offs in cooperative ISAC systems: a scheme based on 5G NR OFDM signals [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://arxiv.org/abs/2403.02028>
- [43] DEMIRHAN U, ALKHATEEB A. Cell-free ISAC MIMO systems: joint sensing and communication beamforming [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://arxiv.org/abs/2301.11328>
- [44] RIVETTI S, BJÖRNSON E, SKOGLUND M. Secure spatial signal design for ISAC in a cell-free MIMO network [C]//Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2024: 1–6. DOI: 10.1109/WCNC57260.2024.10570706
- [45] GUO Y X, FAN Z Q, LU A, et al. Downlink transmission and channel estimation for cell-free massive MIMO-OFDM with DSDs [J]. EURASIP journal on advances in signal processing, 2022, 2022(1): 17. DOI: 10.1186/s13634-022-00847-6
- [46] YAN H S, LU I T. Asynchronous reception effects on distributed massive MIMO-OFDM system [J]. IEEE transactions on communications, 2019, 67(7): 4782–4794. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2908401
- [47] LI G Y, WU S C, YOU C S, et al. Cell-free massive MIMO-OFDM: asynchronous reception and performance analysis [J]. IEEE Internet of Things journal, 2024, 11(7): 11894–11906. DOI: 10.1109/JIOT.2023.3333532
- [48] YOU L, GAO X Q, LI G Y, et al. BDMA for millimeter-wave/terahertz massive MIMO transmission with per-beam synchronization [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35(7): 1550–1563. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2699100
- [49] YOU L, CHEN X, SONG X H, et al. Network massive MIMO transmission over millimeter-wave and terahertz bands: mobility enhancement and blockage mitigation [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(12): 2946–2960. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3005493
- [50] TAO Z, GUO Y, HE G, et al. Deep learning-based modeling of 5G core control plane for 5G network digital twin [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://arxiv:2302.06980v1>
- [51] 6GANA. From cloud AI to network AI: a view from 6GANA [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.6g-ana.com>
- [52] YOU X H, HUANG Y M, LIU S H, et al. Toward 6G T<sub>K</sub>μ extreme connectivity: architecture, key technologies and experiments [J]. IEEE wireless communications, 2023, 30(3): 86–95. DOI: 10.1109/MWC.004.2200482
- [53] O-RAN Working Group 3. Near-real-time RAN intelligent controller near-RT RIC architecture [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.O-RAN.org/specifications>
- [54] O-RAN Working Group 3. Near-real-time RAN intelligent controller, E2 application protocol (E2AP) [EB/OL]. [2024-06-15]. <https://www.O-RAN.org/specifications>

## 作者简介



吴越, 紫金山实验室在站博士后; 主要研究领域为未来移动通信系统和无线传输技术研究; 已发表论文5篇, 申请专利10项。



王东明, 东南大学特聘教授、博士生导师, 工信部 IMT-2030 (6G) 技术推进组专家组副组长; 作为项目负责人, 承担了国家科技重点研发计划项目重点专项“6G无线空口传输技术”; 获2016年度国家科技进步奖特等奖和2014年江苏省科学技术奖一等奖; 已发表学术论文200余篇, 申请和授权中国与国际发明专利50余项。



尤肖虎, 中国科学院院士、东南大学教授、紫金山实验室首席科学家; 目前主要研究方向为无线与移动通信系统、现代数字信号处理等; 作为项目负责人, 曾承担30余项国家“863”、科技攻关、国家自然科学基金等项目。



# AI在无线通信系统中的应用



## Applications of AI in Wireless Communication Systems

魏兴光/WEI Xingguang<sup>1,2</sup>, 刘静/LIU Jing<sup>1,2</sup>,  
陈嘉君/CHEN Jiajun<sup>1,2</sup>, 谢鹏翔/XIE Pengxiang<sup>1,2</sup>,  
冯禹昂/FENG Yuang<sup>1,2</sup>

(1. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518055;

2. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)

(1. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518055, China;

2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240719.1818.010.html>

网络出版日期: 2024-07-22

收稿日期: 2024-06-20

**摘要:** 通智融合作为6G的一个重要应用场景,旨在通过人工智能(AI)与6G通信系统的深度结合,实现双向赋能。全面综述了AI在无线通信系统中的应用,介绍了AI在无线通信系统的总体框架,展望了AI在6G无线通信系统中的应用及面临的挑战。认为AI技术将在6G时代与传统算法共存,未来引入统一的AI框架显得尤为重要。

**关键词:** 人工智能; CSI增强; 波束管理; 定位增强; 移动性管理; 网络节能; 负载均衡

**Abstract:** As an important application scenario for 6G, the integration of artificial intelligence (AI) and communication aims to achieve mutual empowerment through the deep integration of AI and 6G communication systems. The applications of AI in wireless communication systems are reviewed. An overview of the general framework of AI in wireless communication systems is provided. The applications and challenges of AI in 6G systems are envisioned. It is believed that AI technology will coexist with traditional algorithms in the 6G era, and it is particularly important to introduce a unified AI framework in the future.

**Keywords:** AI; CSI enhancement; beam management; positioning enhancement; mobility management; network energy saving; load balance

**引用格式:** 魏兴光, 刘静, 陈嘉君, 等. AI在无线通信系统中的应用 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 26-31. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404005

**Citation:** WEI X G, LIU J, CHEN J J, et al. Applications of AI in wireless communication systems [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 26-31. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404005

随着算法的突破、计算能力的增强和互联网数据的支持,人工智能(AI)在21世纪第2个10年取得显著进展,备受全球瞩目。与此同时,无线通信系统以其强大的连接能力,不仅实现了人与人的沟通,更推动了万物互联新时代的到来。在这一过程中,无线通信系统产生了海量数据,共同构建了一个庞大的数字世界,为人工智能的进一步发展提供了强大动力<sup>[1-2]</sup>。作为《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》中提出的6G六大典型应用场景之一,通智融合旨在通过人工智能与6G通信系统的深度结合,实现双向赋能<sup>[3]</sup>:一方面,AI技术能够为6G通信系统提供智能决策和优化能力,提升通信效率和服务质量;另一方面,6G通信系统能为AI提供强大的基础通信和算力支持,推动智能化社会的快速发展<sup>[4-5]</sup>。

为深入挖掘人工智能在无线通信系统中的潜力,国际标准化组织第3代合作伙伴计划(3GPP)在5G-A阶段已经积极开展了对通智融合的深入探索与标准化工作,涵盖了AI

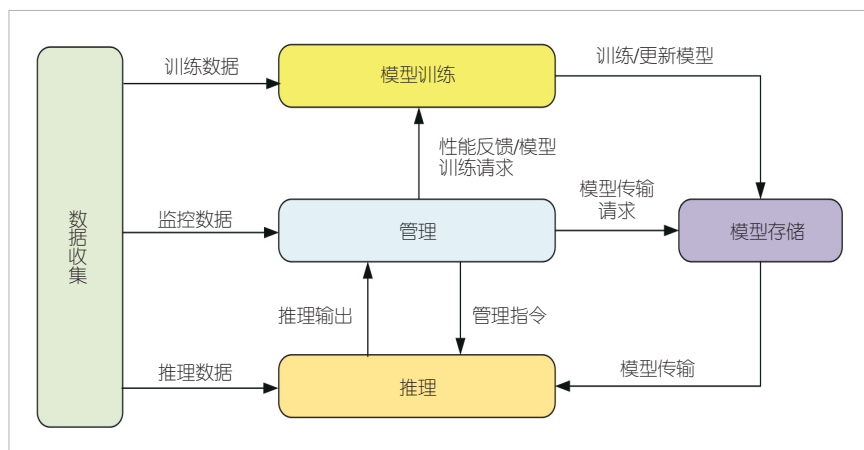
在物理层、接入网、核心网和网管的应用<sup>[6-9]</sup>。随着AI技术的不断发展,业界对通智融合应用场景的探索正呈现出如火如荼的态势,各种创新应用层出不穷。

### 1 AI在无线通信系统的总体框架

AI在通信系统的总体框架如图1所示,这一框架涵盖了数据收集、模型训练、管理、推理以及模型存储等核心功能模块,它们共同构成了模型的生命周期管理体系。AI在通信系统中的应用以这个总体框架为基础进行研究和标准化<sup>[6]</sup>。在这一体系中,数据作为驱动AI技术的核心要素,串联起各个功能模块。

1) 数据收集模块负责收集模型训练、管理和推理所需的各种数据,数据数量和质量直接决定着AI模型推理性能的优劣,因此确保数据的准确性和完整性至关重要。

2) 模型训练作为模型生命周期的基础环节,利用收集到的数据对AI模型进行精准训练和优化。根据实际应用需



▲图1 AI在通信系统的总体框架

求，模型训练可灵活采用在线训练或离线训练的方式。

3) 管理模块根据监控数据及模型推理输出等信息进行决策判断，并发出相应的管理指令。这些指令包括但不限于模型的性能监控、激活与去激活、切换、传输及再训练等，以确保模型始终运行在最佳状态。

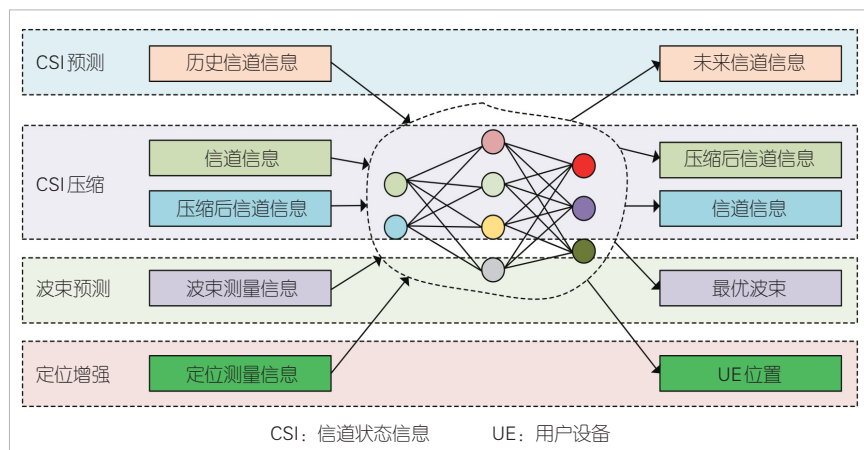
4) 推理模块则负责将推理数据输入至已训练的模型中，以获取相应的推理输出。

5) 模型存储模块则负责将训练好的模型进行安全存储，以便在需要时随时调用。当模型存储实体与模型推理实体分离时，还需进行模型传输。

## 2 AI在无线通信系统中的应用

### 2.1 AI在物理层的应用

3GPP Rel-18研究了信道状态信息（CSI）预测、CSI压缩、波束预测和定位增强等AI在物理层的应用，如图2所示。其中，波束预测和定位增强在Rel-19中已被标准化，



▲图2 AI在物理层的应用

而CSI预测和CSI压缩需要在Rel-19中进一步研究<sup>[6]</sup>。可以预见，AI在6G物理层的应用将更加丰富。

#### 2.1.1 基于AI的CSI增强

AI在物理层CSI增强的应用主要包括CSI压缩和CSI预测两种。CSI压缩须采用双边模型，即在用户设备（UE）端部署CSI生成模型，而在基站端则部署相应的CSI重构模型。这两个模型协同工作，共同完成CSI的压缩、反馈和重构任务，使得基站能够获取更精确的CSI数据，进而优化多用户配对和调度等操作。双边模型的

协作训练及配对流程对于保证系统性能至关重要。目前，相关标准组织正在研究通过模型传输、数据集传输等方式，实现双边模型的协同工作。

根据3GPP Rel-18的仿真数据分析<sup>[6]</sup>，基于AI的CSI压缩反馈方法相较于传统Rel-16的e-Type II码本反馈方式在平均用户吞吐量（UPT）增益有限。具体而言，在最大秩为1和2的中低负载场景中，AI反馈方法相较于传统码本反馈方式展现出不到5%的平均UPT增益；而在高负载且低反馈开销的场景中，其增益则可达10%。在最大秩为4的条件下，根据少数公司的仿真结果，在低负载高反馈开销的场景下，其增益则可达14.89%。总的来说，在不同负载情况及反馈开销下，AI反馈方法实现了5.1%~14.89%的平均UPT增益。

与CSI压缩不同，CSI预测则采用UE侧的单边模型应用。UE将历史的信道测量结果输入到AI模型中，以预测未来时刻的CSI，从而有效解决CSI时效性问题。在UE侧进行CSI预测时，AI模型可以选择UE测量的原始信道作为输入，或者采用经过预处理的特征矢量。此外，3GPP制定了两种基线算法，即基于历史信道保持的基线1和采用非AI预测方法（如自回归算法）的基线2。根据Rel-18的仿真结果，基于AI的预测算法的平均UPT（中位数）与基线1相比，可实现5%~17.2%的增益，但与基线2相比增益不到5%。这是因为非AI的预测方法在信道变化不快的情况下也能较好地预测未来时刻的信道情况。

不少公司认为，基于AI的CSI增强性能增益有限，所以3GPP在Rel-19前期会

进一步对这两个应用进行研究和评估。

### 2.1.2 基于AI的波束管理

基于AI的波束管理方法主要包含空域波束预测与时域波束预测两大核心应用场景。对于空域波束预测，AI模型将部分波束测量数据作为输入，经过处理后输出各候选波束作为最优波束的概率预测或波束质量评估，例如参考信号接收功率（RSRP）。而时域波束预测通常建立在终端运动模式的简化假设之上，如恒定速度、直线轨迹等，通过利用历史时刻的波束测量结果作为AI模型的输入，直接预测未来时刻的最优波束信息。无论是空域还是时域波束预测模型，均可部署于基站侧或UE侧，并在数据收集、模型推理及性能监控等方面对通信协议产生潜在影响。

3GPP的评估显示<sup>[6]</sup>，相较于传统的基于穷尽扫描的波束管理方法，基于AI的空域波束预测方法以6%~25%的波束训练开销，实现了高达85%~99%的终端平均吞吐量性能。基于AI的时域波束预测方法通过引入时间维度的预测，在将波束训练开销降低20%~80%的同时，确保了较高的波束预测准确性。并且，随着预测时间长度的增加，AI方法所展现的波束预测性能增益愈发显著。然而，受限于模型的泛化性能，基于AI的空域和时域波束预测方法在应对波束码本、天线阵列维度以及终端移动速度等参数变化时，可能会面临较大的挑战。因此，仍需通过模型微调、混合数据集训练或模型切换等手段，持续优化和提升波束预测的性能。

### 2.1.3 基于AI的定位增强

如表1所示，AI在物理层定位的应用包括5种不同的用例，涵盖了3种模型部署位置（UE侧、基站侧和网络侧）、2种模型类别（直接AI定位和AI辅助定位），以及3种定位模式（基于UE的模式、UE辅助/基于网络的模式和基站辅助模式）。这些应用利用不同UE/基站的原始信道测量信息，例如信道冲激响应（CIR）、功率时延谱（PDP）或时延谱（DP），通过AI确定用户设备的位置。不同用例中的模型类别根据AI模型的输出进行了区分。直接AI定位的输出为用户设备的位置，而AI辅助定位的输出可以是现有的测量或

新的中间测量，例如直射径/非直射径（LOS/NLOS）指示、时间和/或角度测量值等。网络侧可根据AI辅助定位的输出值计算UE的位置。

技术报告<sup>[6]</sup>的评估结果显示，在InF-DH场景中，AI定位方法在90%情况下均可实现小于1 m的水平定位精度。其中，以CIR作为模型输入时定位精度最高，而以PDP作为模型输入的定位误差是CIR的1.17~1.63倍，以DP作为模型输入的定位误差是CIR的1.33~2.01倍。此外，除定位精度外，模型的计算复杂度、泛化性等也是衡量AI模型的重要指标。评估结果显示，不同的杂波参数、网络同步误差、UE/基站的接收及发送时间误差、信道估计误差等因素均会影响AI模型的泛化性。

### 2.1.4 AI在物理层的其他应用

除了上述用例外，AI在6G物理层还可以进一步考虑以下用例：

- 基于AI的信道建模：通过AI技术实现物理信道的高精度建模，有效降低系统的反馈开销，提升系统的频谱效率；
- 基于AI的小区搜索和随机接入增强：随着通信频点的提高，各小区波束数量越来越大，小区搜索和随机接入时延以及功耗备受厂商关注，未来可以考虑AI模型用于降低小区搜索和随机接入的时延和能耗；
- 基于AI的接收机算法：使用AI技术对现有的接收机算法进行优化或增强，例如多输入多输出（MIMO）接收算法、解调译码算法等；
- 基于AI的干扰控制：通过对小区内干扰和小区间干扰进行智能化识别管理，实现系统性能的提升。

目前主要的用例都处于仿真和研究阶段，具体实测性能有待进一步观察。

## 2.2 AI在接入网的应用

随着双连接架构、网络切片等技术的引入，网络系统愈发复杂。传统的人机结合优化方法不仅易出错，而且成本高昂。为此，业界引入了AI技术，通过智能分析网络数据，实现网络性能的优化，同时确保用户体验。目前，3GPP RAN2已经开始基于AI的空口移动性增强研究，3GPP RAN3已标准化了基于AI的负荷均衡、网络节能和移动性优化解决方案，为运营商提供了更智能、更高效的优化手段<sup>[7-8]</sup>。

### 2.2.1 基于AI的移动性增强

3GPP RAN2和RAN3都对基于AI的移动性增强进行了

▼表1 AI在定位中的用例

用例编号	定位模式	模型部署位置	模型类别
1	基于UE的模式	UE侧模型	直接AI定位
2a	UE辅助/基于网络的模式	UE侧模型	AI辅助定位
2b	UE辅助/基于网络的模式	网络侧模型	直接AI定位
3a	基站辅助模式	基站侧模型	AI辅助定位
3b	基站辅助模式	网络侧模型	直接AI定位

AI：人工智能 UE：用户设备



研究。RAN2主要研究基于AI的空口移动性增强，侧重点在于空口测量及异常事件评估预测<sup>[7]</sup>；而RAN3主要研究基站侧基于终端历史信息的切换轨迹预测。两者相辅相成，为降低终端功耗和提升切换性能打下基础<sup>[8]</sup>。

基于AI的空口移动性增强主要包含无线资源管理(RRM)测量预测、测量事件预测与异常事件预测三大方向。目前，该研究在3GPP仍处于起步阶段，研究结果预计会在2025年第3季度进行呈现。

- 基于AI的RRM测量预测包括对服务小区和相邻小区的测量预测，与基于AI的波束管理相比，除空域和时域预测两大应用场景外，还进一步增加了频域预测。空域RRM测量和时域RRM预测分别与基于AI的空域波束预测和时域预测类似。而所谓频域RRM测量预测，是指通过频点A小区的RRM测量结果来预测频点B小区的RRM测量结果。与空域和时域预测不同，频域RRM测量预测的好处是可以避免异频测量gap对用户上下行数据产生影响，提升用户峰值速率。无论是空域、时域还是频域RRM测量预测模型，均可部署于基站侧或终端侧。

- 基于AI的RRM测量事件预测，在推测未来时刻服务小区和邻区的RRM测量结果基础上，进一步推测测量事件的发生时刻，以辅助网络侧进行切换决策优化。在终端侧模型中，测量事件预测可以有效降低终端频繁上报RRM测量预测结果的空口信令损耗。

- 基于AI的异常事件预测，主要包含无线链路失败(RLF)预测和切换失败预测，其预测的目的是为了提早发现下行链路可能出现的异常，触发网络侧及时进行配置调整或提前进行跨区切换。异常事件预测模型主要部署在终端侧。

RAN3主要研究和标准化基于AI技术来优化下面两个移动性管理问题，旨在通过最小化呼叫掉线、RLF、不必要的切换和乒乓效应，来保证移动性期间的服务连续性：

- 减少切换意外情况的发生概率，如过早切换、过晚切换、切换至错误小区等；
- 传统的UE轨迹信息无法预测，预测UE的位置是移动性优化的关键部分。这是因为许多与移动性相关的RRM行为（例如选择切换目标基站）都可以从预测的UE位置/轨迹中获益。

### 2.2.2 基于AI的网络节能

为了满足日益增长的移动用户数量和关键性能需求，数百万个基站正在被部署以支撑5G网络。然而，这种快速扩展带来了能耗和二氧化碳排放量的剧增，以及运营成本的上

涨。基站节能因此成为运营商关注的重点。一种有效的节能方法是智能地激活和去激活基站小区，从而优化无线网络的能耗。当流量低于预设阈值时，可以选择关闭基站，并将服务用户无缝迁移至其他基站。但传统的做法在基站负荷分析不足时可能导致错误决策，影响网络性能。因为关闭基站后，剩余基站需要承担更多流量，反而可能增加能耗。产生该问题的原因主要包括以下两方面：

- 不准确的负荷预测，仅基于当前流量，未考虑未来变化；
- 系统性能与能效之间的权衡难题，难以同时优化。

为解决这些问题，可以利用AI技术优化节能决策，基于RAN网络数据预测能效和负载。通过动态调整节能策略，如关闭时间、卸载操作等，在保证系统性能的同时，实现更有效的能源利用，降低整体能耗<sup>[8]</sup>。

### 2.2.3 基于AI的负荷均衡

随着网络中流量的迅速增长和多频段的广泛应用，如何平衡分配流量成为一项挑战。为此，负载均衡策略应运而生。该策略旨在实现基站间及基站区域间的负载均衡，或者通过转移部分流量、卸载用户等方式，从拥堵的基站或基站区域改善网络性能。然而，目前仍依赖于当前或过去状态的负载均衡决策存在局限性。网络流量负载和资源状态变化极为迅速，特别是在高移动性和大量连接场景中，这可能导致基站间的频繁切换、基站过载以及用户服务质量的下降。因此，在负载均衡过程中，确保整体网络和服务性能的稳定性变得异常困难。

幸运的是，AI技术为提升负载均衡性能提供了有力支持。通过收集网络各层及邻区的历史数据，基站侧的模型能够预测自身及邻区基站的未来负荷状态，并据此制定合适的负载均衡策略。这不仅能够提升用户体验质量，还能有效增强系统容量，为网络性能的持续优化奠定坚实基础<sup>[8]</sup>。

### 2.2.4 AI在接入网的其他应用

智能化6G无线通信系统可以分为两种类型：“AI for Network”和“Network for AI”。“AI for Network”即人工智能赋能网络，是指利用人工智能技术来提升和优化无线网络的性能和管理。“Network for AI”，即网络赋能人工智能，是指通过无线网络来支持和增强人工智能应用的运行和性能。“Network for AI”的重点在于提供高带宽、低延迟和高可靠性的网络基础设施，以支持复杂的AI应用，如实时数据分析、边缘计算，分布式学习和智能终端设备的互联互通。通过优化网络架构和传输技术，旨在为AI应用提供强大的网

络支持,从而实现更高效、更智能的应用服务。未来的6G无线通信网络需要满足联邦学习架构和分布式学习架构需求,保障AI相关数据与模型传输的可靠性及低延迟。

### 2.3 AI在核心网的应用

在核心网所有的网元中,网络数据分析功能(NWDAF)作为唯一具备数据分析、模型训练和推理能力的网元,经过Rel-16、Rel-17和Rel-18后不断变得完善。3GPP SA2已经完成对其数据采集、模型训练、模型共享、模型推理,以及核心网内部横向联邦学习等各项功能的定义。

TS 23.288<sup>[9]</sup>协议进一步定义了10余种NWDAF的应用场景,比较热门的场景包括用户体验、网元负载、UE移动性等。在用户体验场景中,NWDAF能够从应用功能(AF)、会话管理功能(SMF)和网管(OAM)等多个网元获取目标用户相关的各类数据,进行模型训练/推理和数据分析,输出用户切片服务体验、用户应用/协议数据单元(PDU)会话服务体验等。在网元负载场景中,NWDAF可以向OAM提供网元在过去或未来任意时间的负载的分析/预测以及资源利用情况(比如CPU/内存/磁盘的资源利用)的分析/预测等。在UE移动性场景中,NWDAF能够从位置管理功能(LMF)和接入和移动管理功能(AMF)中收集历史或当前UE的位置信息进行数据分析和模型训练,并输出UE过往位置信息的相关统计和对未来UE位置的时间序列预测。值得一提的是,在Rel-19中,LMF具备了AI定位模型训练和推理的能力,是首个除NWDAF外具有AI能力的网元。

在即将到来的6G标准中,AI跨域协同和网元AI内生是两个热门的方向。跨域协同是指OAM、RAN、UE和核心网协同进行测试数据收集和模型训练,训练完成后进行跨域模型传递和部署。AI内生是指除了NWDAF和LMF外更多的网元内部具有AI能力,即不用向NWDAF请求AI相关分析,部分AI任务可以自己内部完成。

### 2.4 AI在网管的应用

管理数据分析(MDA)与AI技术相结合,被认为是OAM系统中的一项重要功能,可协助实现智能化的网络和服务管理。管理数据分析服务(MDAS)是由MDA暴露的服务,可被各种消费者使用,如MnFs(即MnS生产者/消费者)、网元(如NWDAF)、自组网(SON)功能、网络和服务优化工具/功能、即服务等级规范(SLS)保障功能等。MDA提供了处理和分析与网络、服务事件及状态相关数据的能力,包括性能测量(PM)、关键绩效指标(KPI)、QoE报告、告警数据、配置数据、网络分析数据和来自AF的服

务体验数据等。MDA能基于上述输入输出提供分析结果,如统计、预测、根因分析,也能为运维管理提供采取必要措施的建议。总体而言,MDA能够识别影响网络和服务性能的问题与风险,帮助预测网络和服务的需求,以实现高效的资源调配,从而实现网络和服务的快速部署。

目前,3GPP TS 28.104<sup>[10]</sup>在Rel-18定义了多类MDA用例,包括覆盖相关的分析、资源相关的分析、SLS分析、管理数据预测和统计、MDA辅助的故障管理等。故障管理是网络运维管理的典型场景,MDA辅助的故障管理支持故障预测、业务故障恢复和控制面拥塞分析,其中控制面拥塞分析是新引入的场景。MDA利用收集到的PM、故障管理、网络拓扑数据和网络功能虚拟化管理和编排(NFV MANO)提供的虚拟资源信息进行控制面拥塞分析,并提供包含目标5GC NF(如AMF、SMF)拥塞分析报告或预测报告。报告中还提供优化目标5GC NF以解决拥塞问题的建议措施。

AI与6G技术的融合发展将支持网络向进一步高阶自智演进,赋能意图驱动和闭环保障等自智网络的关键特性。意图驱动是指,通过深入理解用户的意图,网络根据用户的需求和偏好,提供定制化的解决方案。用户只需关心实现的目标,而不必关心实现的方式。闭环保障是在网络中实现实时监测、评估、分析和决策的机制,引入智能化手段减少人为介入,最大限度地保障网络性能。通过自动化和智能化手段,帮助运营商简化业务部署,推动网络具备自配置、自优化、自愈和自演进能力。目前主要的用例限定于特定场景,还处于研究与验证阶段。如何提升模型的场景泛化能力从而推动大规模应用仍在研究中。

## 3 AI应用于无线通信系统的展望和挑战

随着AI技术的不断快速发展,业界对通智融合应用场景的探索在不断推进,创新应用层出不穷。3GPP即将在Rel-20开启6G的研究,届时通智融合的应用场景将更加丰富,例如,基于AI的信道建模、基于AI的小区搜索和随机接入增强、基于AI的参考信号与数据信号的重叠发送、基于AI的网络流量和用户行为实时分析等。6G网络有望通过广泛使用泛化的AI技术,将AI深度嵌入网络的各个层面,实现统一的自智网络方案架构,驱动网络向自主、自治、自智的最终目标演进<sup>[11-12]</sup>。但是,AI在无线通信系统中的应用也面临不少挑战:

- 目前AI在无线通信系统中的应用还聚焦在研究和标准化阶段,缺乏大规模的商用,有待进一步的市场检验;
- 部分基于AI的应用并未带来富有吸引力的增益,例如基于AI的CSI增强;

• AI模型的泛化性问题,泛化性强的模型复杂度过大,而泛化性弱的模型又不能保证性能的稳定性等。

综上可知, AI技术作为传统通信算法的增强,无法在6G中完全替代传统通信算法,但是会在6G与传统算法共存。此外,随着通智融合应用在6G中的逐渐丰富,为了便于统一管理和协调算力及其他智能资源,各层之间应用的统一AI框架显得尤为重要。

## 4 结束语

通智融合作为6G的一个重要应用场景,旨在通过人工智能与6G通信系统的深度结合,实现双向赋能。本文首先概述AI在无线通信系统的总体框架,随后梳理AI在5G-A和6G系统的应用,最后展望AI在6G无线系统中的应用以及挑战,例如缺乏大规模的商用、有待市场检验、部分应用增益有限、存在泛化性问题等。相比于5G-A,6G有望进一步扩大AI的应用场景和范围,但AI技术作为传统通信算法的增强,会在6G与传统算法共存。此外,为了便于统一管理和协调算力及其他智能资源,统一的AI框架显得尤为重要。

## 致谢

感谢中兴通讯股份有限公司李伦、刘文丰、王聪、董霏、鲁照华工程师对本论文做出的贡献!

## 参考文献

- [1] 中国移动. 算力网络白皮书 [R]. 2021
- [2] 杜宗鹏, 李志强, 陆璐. 算力网络四面三级算力度量技术体系 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(4): 8-13
- [3] ITU. Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond [EB/OL]. [2024-06-10]. <https://www.itu.int/md/R19-SG05-C-0131>
- [4] 方敏, 段向阳, 胡留军. 6G技术挑战、创新与展望 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(3): 61-70. DOI: 10.12142/ZTETJ.202003012
- [5] 李文璟, 喻鹏, 张平. 6G智能内生网络架构及关键技术分析 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(5): 2-8. DOI:10.12142/ZTETJ.202305002
- [6] 3GPP. Study on artificial intelligence (AI)/machine learning (ML) for NR air interface (Release 18): TR 38.843 [S]. 2022
- [7] 3GPP. Revised SID on AIML for mobility in NR: RP-240082 [S]. 2024
- [8] 3GPP. Study on enhancement for data collection for NR and EN-DC (Release 17): TR 37.817 [S]. 2022
- [9] 3GPP. Architecture enhancements for 5G system (5GS) to support network data analytics services (Release 18): TS 23.288 [S]. 2020
- [10] 3GPP. Management data analytics (MDA) (Release 18) [S]. 2022
- [11] YANG B, LIANG X, LIU S N, et al. Intelligent 6G wireless

network with multi-dimensional information perception [J]. ZTE Communications, 2023, 21(2): 3-10. DOI: 10.12142/ZTECOM.202302002

- [12] WANG C X, YOU X H, GAO X Q, et al. On the road to 6G: visions, requirements, key technologies, and testbeds [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2023, 25(2): 905-974. DOI: 10.1109/COMST.2023.3249835

## 作者简介



魏兴光, 中兴通讯股份有限公司无线技术预研高级工程师; 主要研究方向为人工智能、全双工等。



刘静, 中兴通讯股份有限公司无线技术预研高级工程师; 主要研究方向为人工智能、移动性管理等。



陈嘉君, 中兴通讯股份有限公司无线技术预研高级工程师; 主要研究方向为人工智能赋能无线网络技术。



谢鹏翔, 中兴通讯股份有限公司标准预研工程师; 主要研究方向为自智网络、智能内生网络等。



冯禹昂, 中兴通讯股份有限公司无线标准工程师; 主要研究方向为人工智能、XR等。



# 6G 物理层原生 AI 技术



## 6G AI-Zation in Physical Layer

田文强/TIAN Wenqiang, 沈嘉/SHEN Jia, 肖寒/XIAO Han,  
刘文东/LIU Wendong, 郑旭飞/ZHENG Xufei  
(OPPO研究院, 中国 北京 100026)  
(OPPO Research Institute, Beijing 100026, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404006  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20240722.0943.004.html>  
网络出版日期: 2024-07-23  
收稿日期: 2024-06-12

**摘要:** 针对6G系统的空口AI化演进, 需要对研究的路线、所受的限制条件、基础问题、技术趋势, 以及期待的突破与改变做出客观和明确的判断, 以便在不同层面和维度上获得理论与工程上的增益与突破, 具体包括: 引入AI的6G一体化、系统化构建, 形成基于AI的新传输方案与新空口设计, 考虑面向AI的生命周期管理与解决方案。在物理层原生AI技术方面, 具体分析了零开销叠加导频设计、信道与无线环境语义通信, 以及两项重点6G AI潜在技术方向。本研究可对未来6G系统AI化的技术推进和标准化提供有益参考。

**关键词:** 6G系统AI化; 6G AI新空口; 6G AI生命周期管理; 零开销叠加导频; 信道与无线环境语义通信

**Abstract:** To achieve theoretical and engineering gains and breakthroughs across different levels and dimensions in 6G AI-zation, a clear understanding on the research route, constraints, fundamental problems, technological trends, and expected breakthroughs and new changes is required. Specific aspects include the integration and systematic construction of AI in 6G, the forming of new AI-based transmission schemes and air interface designs, and AI lifecycle management solutions. Around physical layer native AI technologies, detailed analysis includes: zero-overhead superimposed pilot design, semantic communication for channels and wireless environment, and two key potential technology directions for 6G AI-zation. This research can provide valuable reference for future technical advancement and standardization of AI in 6G systems.

**Keywords:** 6G AI-zation; 6G AI air interface; 6G AI lifecycle management; zero-overhead superimposed pilot design; semantic communication for channels and wireless environment

**引用格式:** 田文强, 沈嘉, 肖寒, 等. 6G 物理层原生 AI 技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 32-41. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404006

**Citation:** TIAN W Q, SHEN J, XIAO H, et al. 6G AI-zation in physical layer [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 32-41. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404006

智能化的网络构建已经成为未来移动通信系统设计的重要方向<sup>[1-4]</sup>。国际标准化组织第3代合作伙伴计划(3GPP)已经初步开展用于5G空口的人工智能(AI)增强技术研究, 涉及信道状态信息(CSI)反馈增强、波束管理、定位增强3个用例<sup>[2,5-7]</sup>, 但是这3个用例引入AI增强的方式依旧是在传统收发信机架构中, 试图在零散的物理层技术点上用AI算法替换传统算法, 即便在这些技术点上获得了一定增益, 对6G系统整体的性能提升的贡献也是有限的。因此, 在当前针对6G系统的空口AI化演进的过程中, 有必要对研究的路线、所受的限制条件、基础问题、技术趋势, 以及期待的突破与改变做出客观和明确的判断, 以在获得理论与工程上的增益与突破。

### 1 6G 系统的 AI 化

6G空口的AI化演进包括基于AI的系统赋能和基于AI的

系统重构两个方面。

#### 1.1 基于 AI 的系统赋能

针对无线通信系统的智慧赋能将依托AI技术首先提升单点或者特定链路上的无线通信系统性能, 即利用AI对原有系统架构中的功能模块, 进行数据驱动或者模型驱动的智慧化增强。例如, 在物理层对原有的信道估计功能、信道状态信息反馈模块、波束管理功能、符号检测链路、定位系统等AI增强设计, 提升相应模块的性能; 在接入网对系统中的移动性管理、资源分配、负载均衡、网络/用户节能等问题, 利用AI的决策优势和预测优势, 提升接入网络整体性能增益; 在核心网侧, 构建支持AI的网络结构, 实现基于AI的网络规划与细化优化, 以及基于AI的网络故障检测与维护能力。

在实际工作中, 研究者们可以通过AI方案性能对比、

设备软硬件能力评估，构建并形成相比于非 AI 算法的更大增益的用例及能力集合，继而开展相应的无线 AI 课题研究、标准化及工程实现。依托上述方式，6G 的 AI 将通过多个版本的迭代逐步形成。例如，6G 第一版本标准协议将体现少量用例实现 AI 化，并在后续标准版本中逐步丰富，如图 1 所示。但是，这种循序渐进式的实现方式需要经过长时间的迭代和反复多次的标准化讨论，对无线通信系统的换代契机利用不足，很难在 6G 构建之初达到人们对下一代无线通信系统原生 AI 能力的预期。

## 1.2 基于 AI 的系统重构

上述面向空口 AI 化的功能应用是无线通信与 AI 技术结合的开端。但需要注意的是，6G 阶段的一个重要的背景特征是整个通信行业再次获得了系统性改变整体通信架构的机会。所以，在这个阶段，仅在现有架构设计的基础上逐步优化基于 AI 的系统并不是智能化 6G 研究的全部内容。着眼于 AI 对未来通信系统设计与重构的深度影响，一些固有的模式需要被尝试打破，开展全新的探索，以期构建形成面向智能需求且构建基于智能技术的新一代无线通信系统。

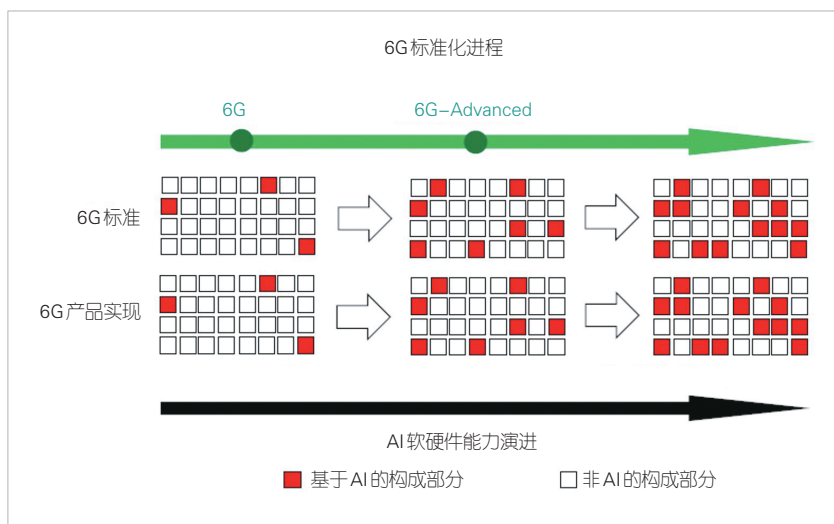
在这种方式下，6G 系统可通过“AI 化”向“内生 AI”快速过渡，在各个环节快速引入 AI 算法，在 6G 所有领域开放接收基于 AI 解决方案的提案，实现 6G 标准的快速 AI 化。AI 产品化进程取决于软硬件研发和产业化进展，不受限于 6G 标准。这将促成“6G 赋能 AI”和“AI 赋能 6G”的融合，以及内生 AI 的实现，如图 2 所示。

## 2 6G 物理层原生 AI 技术

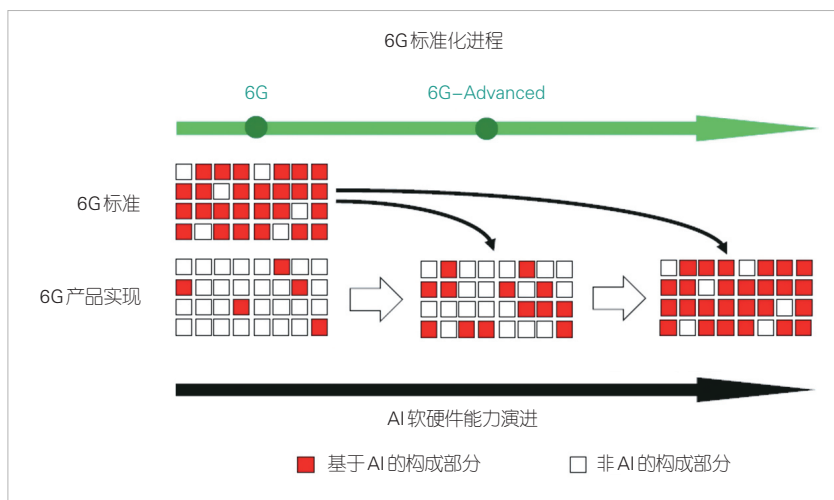
6G 空口 AI 化的研究不仅仅局限于在已成型的具体无线用例上进行修补优化型演进，还将从系统重构的角度出发，开展无线 AI 共性基础问题的深度剖析，具体包括：引入 AI 的 6G 一体化、系统化构建，基于 AI 的新传输方案与新空口设计，面向 AI 的生命周期管理与解决方案。

### 2.1 引入 AI 的 6G 一体化、系统化构建

6G AI 无线通信系统的一体化、系统化构建可包括自上



▲图1 逐步构建 6G AI 用例、标准、能力集合

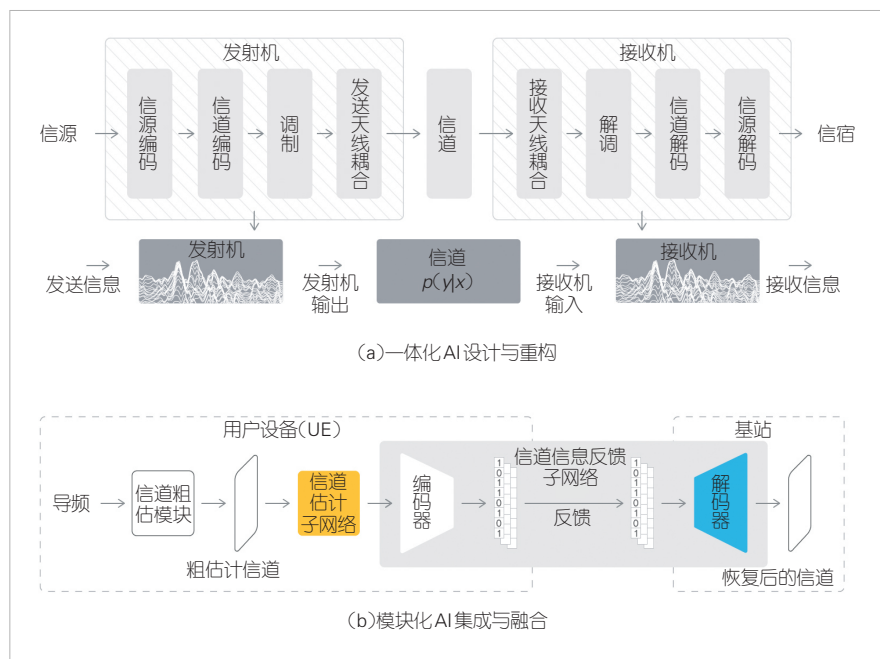


▲图2 6G 系统“AI 化”向“内生 AI”快速过渡

而下的一体化设计重构和自下而上的系统化集成融合两个方向。

传统的通信系统设计中，基于功能划分等原因，整体通信系统一直以来被划分为特定模块单元，通过问题拆解、模型化、参数化拟合等方法级联形成完整的通信系统设计。但是，通信的目的是有效信息成功传输，人为划分的模块化设计只是达到上述目的一种方法。AI 技术则为解决上述问题提供了新思路。基于 AI 的整体通信系统设计，以传输增益最大化为目标，以待传输信息作为收发模型的期待输入输出条件，以信道环境、噪声等不可控因素作为传输和模型构建的限制条件，以期获得整体的设计增益<sup>[8-10]</sup>，如图 3 (a) 所示。

需要指出的是，大规模系统的一体化设计虽然在减少信息量损失方面是有益的，但也会引入较高的自由度和复杂度



▲图3 6G AI的一体化、系统化构建方式

问题。在提取无损信息量中的有用信息时，这对6G系统的AI化仍旧是一大挑战。所以基于模块化AI的集成与融合，也是未来无线通信系统智能化演进的重要探索阶段。图3(b)以信道估计及信道信息反馈过程为例，较好地展示了这一类设计。

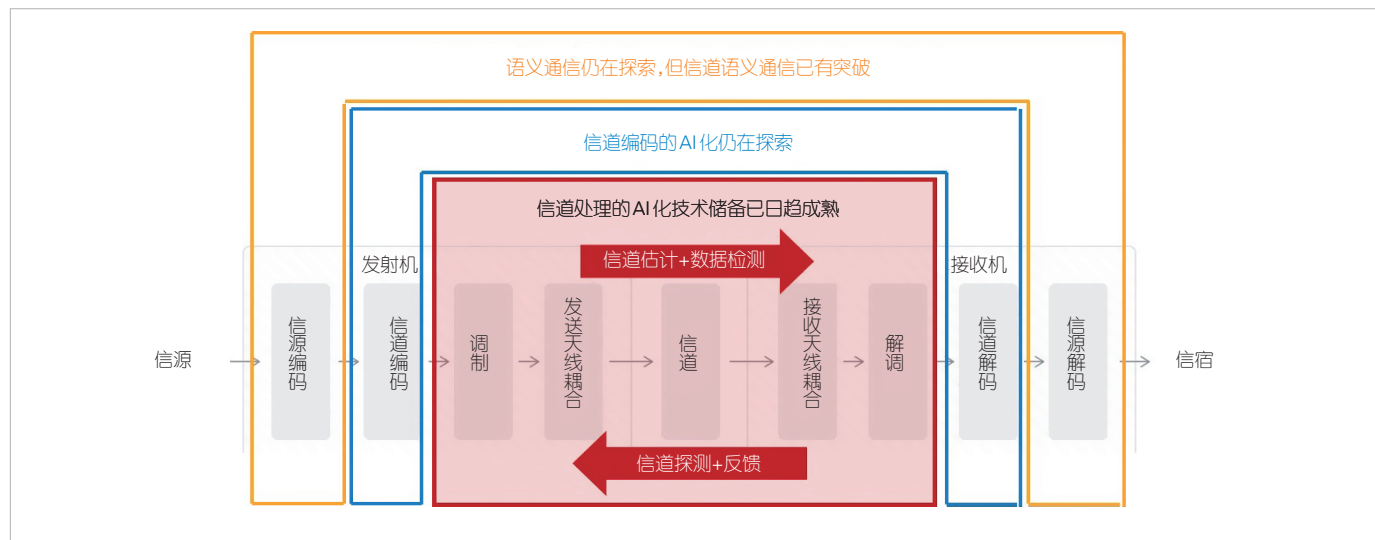
针对物理层无线通信系统设计，基于近年来无线AI解决方案技术探索与成果储备，我们可以从三个层面来分析6G物理层AI的一体化、系统化构建问题。如图4所示，首先是以信道为中心的一系列预处理、后处理方案所构成的闭

环集合，其中包括信道估计、信道信息反馈与恢复、调制与解调、数据检测等。围绕这部分内容，单个模块的研究已相对较多，性能增益与优势分析也已开展，并且部分内容在5G后期也进入了标准化讨论阶段。模块间的连接相对直接，模块间的相互依赖和共存关系相对明确。模型级联和一体化实现、系统化优化的工作也已在学术界和产业界开展。所以，对于这一层面，信道处理相关的AI化技术储备可以认为已经日趋成熟，具备了在6G阶段开展一体化、系统化设计与标准化的可能。在此基础上，还可以进一步考虑信道编码、解码的AI化影响，以及语义通信对于AI化系统构建的影响。

## 2.2 基于AI的新传输方案与新空口设计

在6G研究中，有必要对AI技术可带来的核心优势做最大程度的利用。当前AI技术的发展已使得原本很多难以解决的复杂问题被重新审视。在可预见的相当长一段时间内，AI技术的迭代与发展速度将远快于传统通信理论的演进速度。随之而来的是，通信传输方案与处理方案之间的关系将在底层设计思路上发生变化。

在传统无线通信系统设计中，一个重要的短板来自于受限的接收算法和后处理能力，因此在实践中往往需要在发送端做一些特殊处理，例如需要进行一些正交化、线性化的传输设计，通过增加发送复杂度的方式换取对接收端处理的可



▲图4 6G物理层的AI的一体化、系统化构建



行性和较低的复杂度。

在 AI 技术的使能下，当前 AI 接收机对信号的后处理能力得到大幅提升。这使得“大后台、小前端”的设计思路得以尝试，例如简化一些非必要的正交化、线性化的预处理传输方案，在降低整个系统设计的复杂度的同时，通过 AI 解决方案，保持甚至进一步提升系统效能。

### 2.2.1 零开销叠加导频设计

5G 系统中，导频信号对于确保通信系统链路的可靠性和有效性至关重要。一直以来，5G 系统借助一系列导频信号，例如解调参考信号（DMRS）、信道状态信息参考信号（CSI-RS）、探测参考信号（SRS）以及相位跟踪参考信号（PTRS）等，以支持包括信道估计、资源调度、链路自适应、波束管理等其他多种功能。这一类导频一般被设计为一系列预定义的图样及序列，与数据符号在时间与频率资源上是正交分配的，即导频与数据相互竞争有限的传输资源。这无疑带来了显著的导频开销，进而降低了数据传输的频谱效率，限制了系统的吞吐性能。尤其是面向 6G 的设计中，更大规模的天线阵列、更高速场景的适配等复杂的场景将对导频的设计和开销提出更高的要求，从而导致导频与数据间无线资源的竞争进一步加剧。因此，亟需考虑设计新的导频和数据的传输策略以应对上述挑战。

当前，针对数据与导频叠加传输问题的研究已有一定理论和研究基础<sup>[8,11-15]</sup>，针对上行、下行特定信道和传输条件的叠加导频设计与分析均有相应的工作持续开展。不过需要指出的是，目前工作对于复杂信道环境下的叠加导频方案性能，对于多流、高阶、高速等复杂传输条件下的叠加导频设计与实现效果，均有待进一步提升。特别是在 AI 接收机引入后对复杂干扰环境下的叠加导频传输与接收方案设计以及潜在的工程化实现相关的工作，均需要进一步考虑。本节将重点介绍针对多流、高阶、高速场景等复杂、强干扰环境下

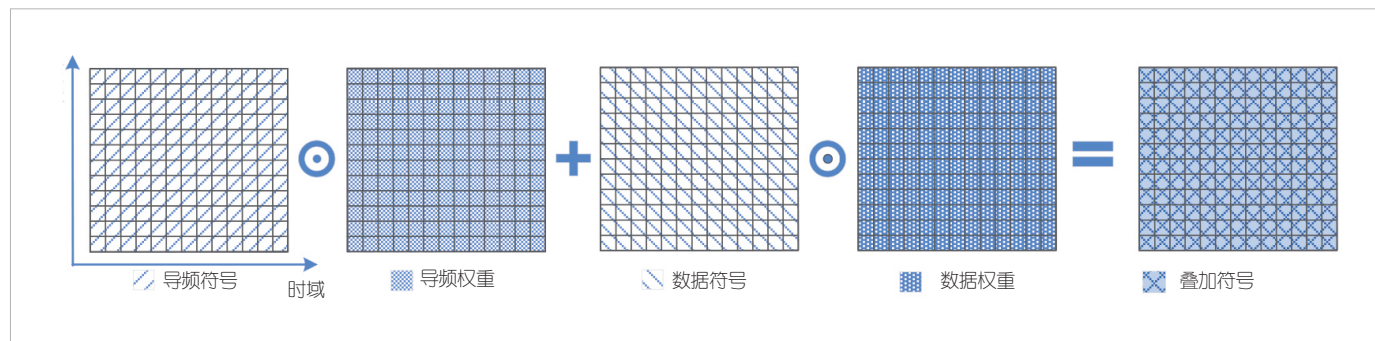
的叠加导频设计与实现问题，并考虑更加贴合实际的仿真分析。

#### 1) 新的导频传输与数据传输之间的关系

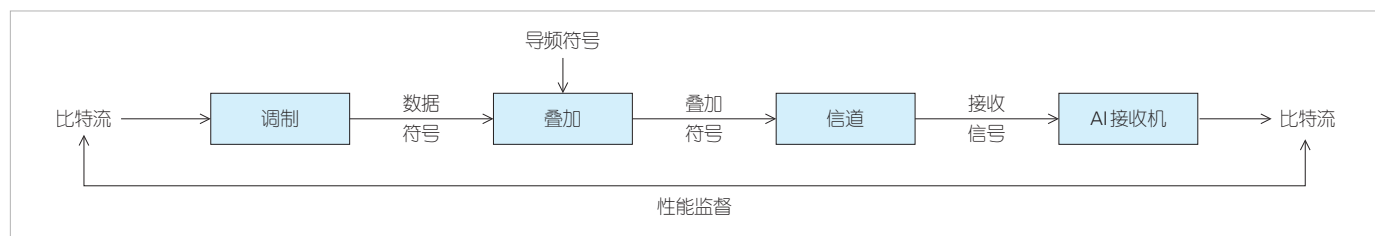
在当前的研究中，基于 AI 的空口增强在系统性能提升方面展现了巨大的潜力。尤其是在接收端引入 AI 处理模块后，强大的非线性处理能力将使得发送端导频设计中一直以来遵循的正交约束变得松弛，这也为重新探索导频与数据间的资源分配关系提供了可能。例如，可以探索一种新的框架或方法，使得导频与数据在传输资源上采用非正交的方式进行分配，以降低甚至完全消除导频的独立资源开销和对有限传输资源的竞争。

叠加导频是拓展了导频与数据间资源分配关系的一类具有较大应用潜力的技术，其核心思路是将导频符号与数据符号在发送端进行叠加发送，以突破传统的正交传输方式的性能限制。通过在相同的时间和频率资源上同时传输导频和数据，实现频谱资源的共享从而显著提高频谱利用率。

如图 5 所示，在发送端，考虑将时频资源内的导频符号矩阵与数据符号矩阵加权求和，获得叠加符号矩阵以进行后续的发送。显然，在上述的叠加方案中，每个传输资源均携带了一部分的导频信息和数据信息，使得 AI 接收机可以利用叠加符号中的导频信息实现每个对应资源位置的信道估计，同样也在这些资源上实现了高频谱利用率的数据承载传输。另外，在叠加过程中，需要合理地划分导频符号与数据符号的功率分配比例，以在数据等效信噪比和信道估计性能间的权衡下，保证最终的高性能接收。在接收端，可考虑利用先进的 AI 接收机基于导频和数据的叠加接收信号实现有效的数据接收。如图 6 所示，AI 接收机的输入为原始信息比特流经过调制、导频非正交叠加以及经过信道发送后的接收信号。另外，AI 接收机的实现不仅可以是联合隐式信道估计及数据恢复的一体化接收机，也可以是分别进行显式信道估计和数据恢复的模块化接收机。



▲图5 非正交叠加导频构建方式



▲图6 非正交叠加导频收发系统

## 2) 叠加导频为6G带来的系统设计优势

叠加导频方案的使用有望为6G系统设计带来新的变化和突破，这主要体现在：

首先，非正交叠加导频的引入，大大减少了独立导频资源的开销需求，提升了系统的频谱效率。传统的正交导频方案虽然避免了相互干扰，但占用了大量的频谱资源，随着MIMO技术、高速场景、精确信道估计、感知通信等应用需求的进一步提升，导频资源开销的问题依旧存在，且将越来越明显。叠加导频设计通过在相同的时间和频率资源上同时传输导频和数据，实现了导频与数据的传输资源共享，极大地提高了有限资源的利用率。导频信号在时频域的独立资源开销为零，这意味着更多的资源可以用于数据信号的传输，从而提升系统的吞吐量。

其次，在传统的正交导频中，导频符号的资源分配图样会根据不同的传输环境进行单独设计，这增加了系统设计的复杂度，也对网络的调度和管理提出了更高的要求。而叠加导频方案精简了时域和频域导频资源的分配设计。在这种非正交传输方式下，由于导频和数据共享相同的资源，不再需要复杂的图样设计和资源分配策略，只需考虑如何优化导频和数据的功率分配，以确保信道估计和数据传输的性能即可。这种简洁的资源分配设计不仅降低了系统实现的复杂度，还提高了系统的可扩展性和灵活性。

另外，由于叠加导频方案在所有时频域资源上都分布了导频和数据信息，因此可以凭借AI接收机强大的非线性信号处理能力，基于全部资源上的导频和数据的分布进行更精确的隐式信道估计及符号检测，无论是在低速、高速还是更具有挑战的超高速移动场景中，叠加导频都能够灵活适应不同的传输需求，具有较高的鲁棒性，提供了较优的系统性能。

## 3) 叠加导频仿真验证

针对叠加导频的性能仿真结果如图7所示，仿真参数如表1所示。基线方案为5G系统中的正交导频设计及线性最小均方误差（LMMSE）接收机，其中用于LMMSE信道估计的协方差矩阵为统计 $10^5$ 信道样本计算获得。

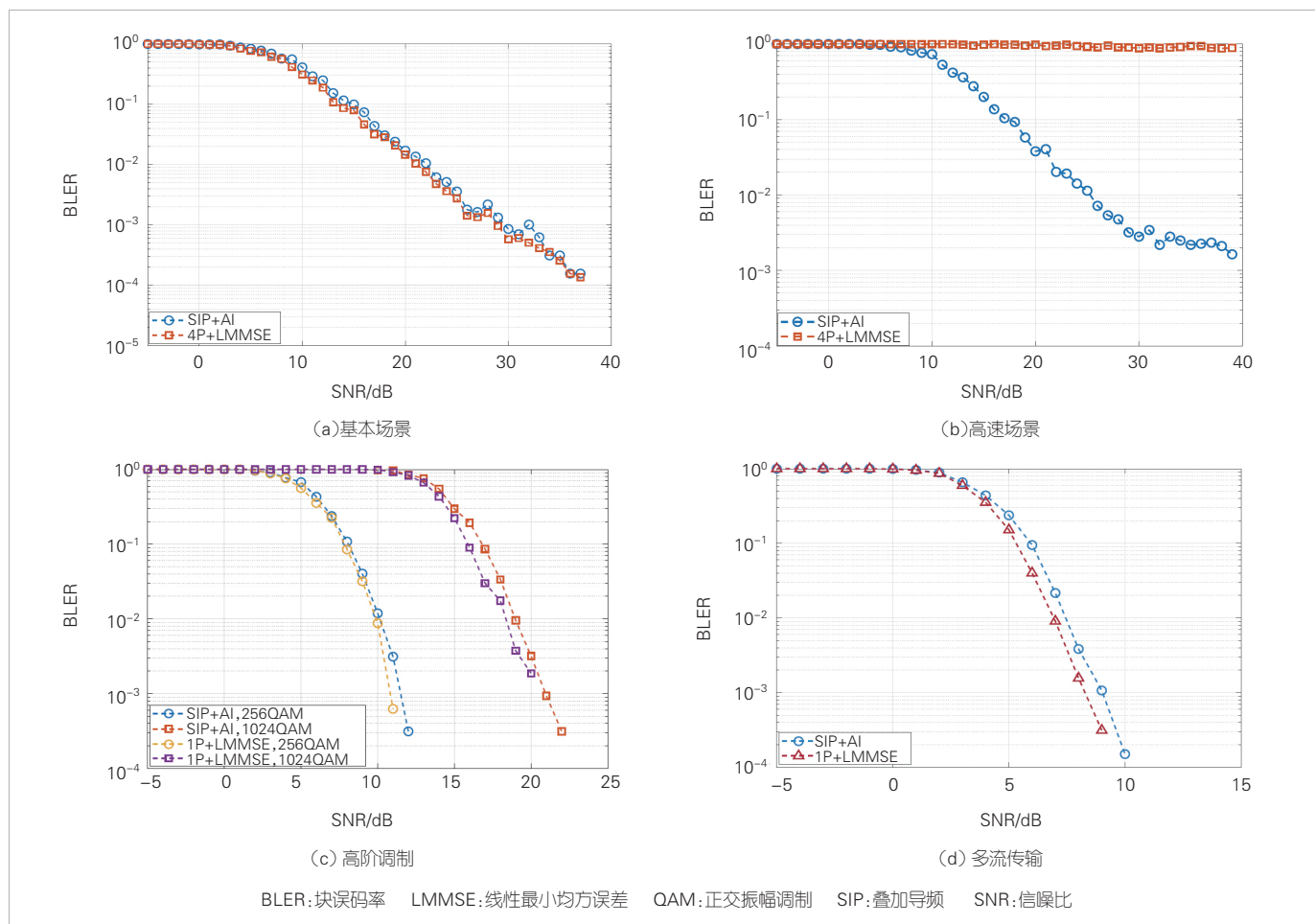
图7（a）首先给出了在城区宏小区（UMa）信道模型及300 km/h移动速度、16QAM调制条件下的块误码率（BLER）性能对比。可以看出：发端采用叠加导频方案下，接收端的AI接收机可以有效地进行数据接收。进一步地，叠加导频方案在BLER性能上获得了与基线正交导频方案相同的性能，这表明叠加导频的引入没有带来BLER的性能损失。相应地，在可比较的BLER性能下，叠加导频方案由于节省了导频的开销，可以在相同码率下传输更多的数据信息比特，从而获得更好的吞吐量性能。

图7（b）、7（c）、7（d）进一步给出了在1200 km/h的高速环境、3 km/h移动速度条件下256QAM和1024QAM高阶调制、3 km/h移动速度条件下64QAM对应的4流传输等更为严苛条件下的BLER性能对比。可以看出：叠加导频方案由于所有可用的时域和频域资源都具有导频分布，相比传统仅仅占用部分时域和频域资源的正交导频而言，在超高速场景中具有非常显著的性能优势。在干扰容忍度较小的高阶调制配置下，叠加导频方案仍然能获得与基线方案可比较的BLER性能，进而可获得更高的系统吞吐性能。在多流传输下，层内导频与数据的干扰以及层间的导频或数据的干扰同时存在，此时叠加导频方案同样可以获得与基线方案可比较的BLER性能，进而凭借无额外导频开销的优势达到更高的系统吞吐性能。

综上所述，基于AI的叠加导频传输和处理方案从基础框架、实现方式到仿真结果，展现了较高的频谱利用率、传输吞吐量、场景鲁棒性和系统灵活性等优势，是一种具有非常高应用潜力和优势的6G物理层新技术。

## 2.2.2 信道与无线环境语义通信

近年来，语义通信吸引了学术界的广泛关注<sup>[16-18]</sup>。目前的语义通信系统主要关注的是从应用层面的数据信源信息中提取语义信息并进行传输。这些语义信息可以采用人工智能技术进行提取和利用，从而在传输过程中，节省传输资源，提高传输性能。上述过程中，应用层信源、语义信息提取和语义空间表征等对于物理层来说是不可见的。物理层仅关注



▲图7 叠加导频设计在不同条件下的BLER性能对比

▼表1 叠加导频仿真参数

参数	配置
天线配置	1T1R、32T4R
传输层数	1、4
信道模型	UMa、CDL-C
时延扩展	300 ns
资源分配	8RB、52RB 12 symbols
载波频率	4 GHz
子载波间隔	30 kHz
调制策略	16/64/256/1 024QAM
编码策略	LDPC
预编码方案	SVD
移动速度	3/300/1 200 km/h
基线正交导频方案	1 symbol、4 symbols
基线接收机	LMMSE
叠加导频功率比例	5%

CDL-C: 簇时延线-C信道  
LDPC: 低密度奇偶校验码  
LMMSE: 线性最小均方误差  
QAM: 正交振幅调制

RB: 资源块  
SVD: 奇异值分解  
UMa: 城区宏小区

资源映射后的传输过程, 继而进一步考虑跨层优化和新的物理层设计影响, 如图8(a)所示。

此外, 对于物理层内部来说, 6G系统物理层信道与无线环境语义通信则是一个新的研究方向。无线通信系统内部可考虑针对物理层内生信源信息作为输入的语义通信设计, 如图8(b)所示, 但是目前这方面的研究非常有限。如何定义并获取物理层信源输入用于语义信息提取和实现是核心问题。

### 1) 信道与无线环境语义信息概念与实现

信道与无线环境语义信息可以定义为无线信道在空/时/频等变换域特征和由不同无线环境带来的功率、相位等参数分布规律。获取和利用信道与无线环境语义信息的具体包括步骤为:

(1) 基站/终端通过测量不同的物理层参考信号(例如CSI-RS)获得原始信道信息;

(2) 基于不同目的, 采用不同语义信息提取方式(例如经典的信号处理算法或AI方法), 将原始信道转化为对应



的语义空间特征；

(3) 设计对应的物理层语义通信的传输方法。

CSI就是一种典型的信道与无线环境语义信息。终端基于下行CSI-RS信道估计，并向基站反馈CSI用于多用户调度和下行预编码。CSI中蕴含了无线信道的多维度语义信息，可以采用传统的数学变换到对应变换域进行显式表征，或者采用AI模型信息提取进行隐式表征。例如，信道状态信息包含的语义信息内容可以是：预编码向量指示（PMI）或信道特征向量隐含空域-频域特征、信道质量指示（CQI）隐含功率分布特征、秩指示（RI）隐含独立信道个数特征。

从语义通信的视角看，CSI包含了信道与无线环境的语义信息，主要由用户上报至网络侧用于下行预编码和多用户调度。传统的CSI反馈流程如图9所示。在用户发射机侧，具体包括3个过程：

(1) 信源压缩，例如将用户侧测量计算得到的CSI特征向量压缩成比特流；

(2) 信道编码，例如通过极化码（Polar）或低密度奇偶校验码（LDPC）完成信道编码；

(3) 符号调制，例如通过符号调制将信道编码后输出的比特流映射为星座点。

调制后的符号经过资源映射后，进行上行信道反馈。上行信道会包含噪声和干扰等非理想因素。

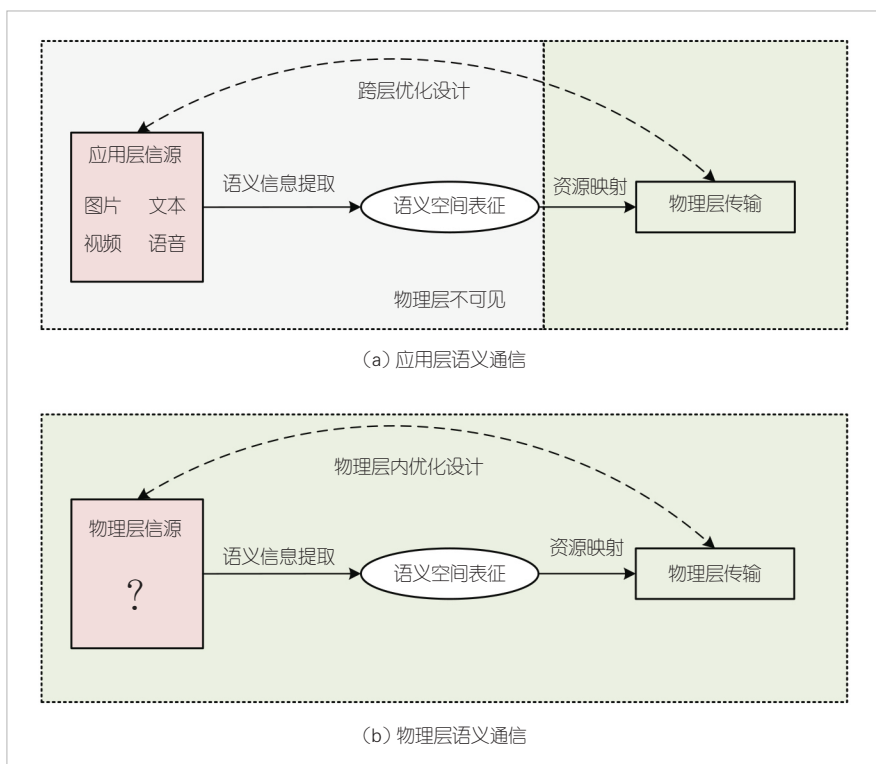
在基站接收机侧，具体也包括3个过程：

(1) 符号解调，例如采用与调制对应的解调方式，输出星座点承载比特的对数似然比；

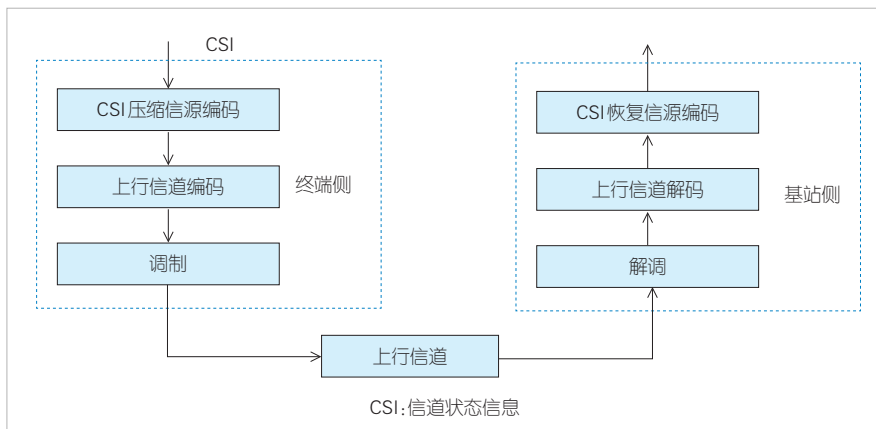
(2) 信道解码，例如采用与信道编码对应的解码方式，输出未编码的信源信息比特流；

(3) 信源解码，例如将信源信息比特流恢复为CSI特征向量。

对于传统的CSI反馈架构来说：CSI压缩过程实际上是有损的信源编码，会导致CSI信源信息的丢失，这部分信息丢失在接收机侧无法恢复；信道编码考虑上行信道带来的衰落和噪声影响后，用于降低传输差错，增加了额外的冗余，



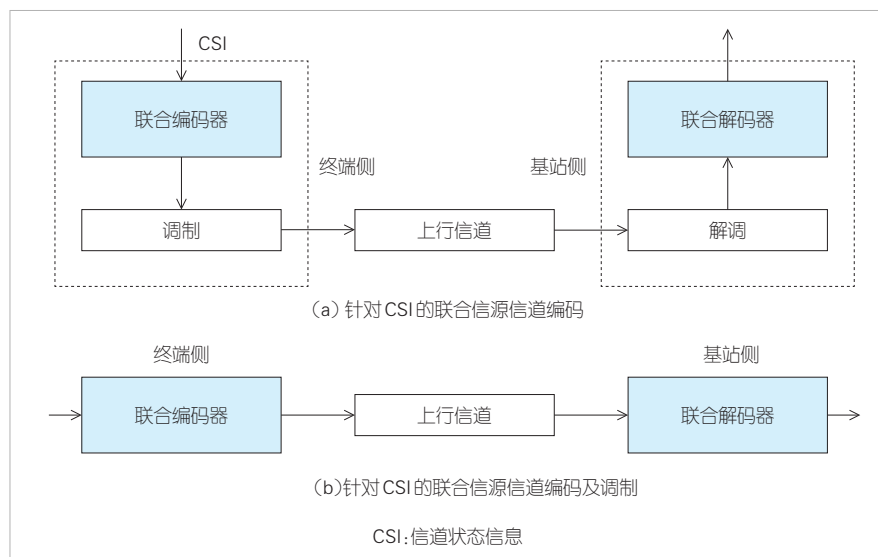
▲图8 应用层语义通信与物理层语义通信示意图



▲图9 传统CSI反馈流程

因此占用了更多的上行传输资源；信源信息压缩带来的损失和信道编码带来的冗余是分别独立设计的，在传输资源和性能方面无法达到联合的优化。

基于联合信源信道编码方法，可以重构CSI反馈架构，如图10（a）所示。用户侧部署联合编码器，实现联合的CSI压缩和信道编码的功能，其输入可以采用信道特征向量作为信源信息，输出为联合编码的比特流。基站侧部署联合解码器，实现联合的信道解码和CSI恢复的功能，其输入是解调后的对数似然比信息，输出为恢复的信道特征向量。联合编码器和联合解码器均可采用AI模型实现，训练过程采



▲图10 针对CSI的信源信道联合编码方案

用端到端的训练方式。这种方法的潜在优势是，联合编码和解码器可以提取 CSI 中的语义信息，并学习 CSI 信源分布和上行信道特征，在信源信息压缩和信道编码增加冗余对抗噪声的平衡中取得更好的反馈性能。

进一步地，基于联合信源信道编码的 CSI 反馈方法可以将调制和解调模块也包含在联合编码器和联合解码器中。如图 10 (b) 所示，联合编码器实现 CSI 压缩、信道编码和调制功能，其输入以信道特征向量作为信源信息，输出是复数序列。序列中的每个复数值被映射到一个上行传输的物理资源上（等价于一个调制后的星座点），对联合编码器输出的复数序列可以做能量约束，例如恒模约束或者总功率约束。联合解码器实现解调、信道解码和 CSI 恢复功能，其输入是接收到的信道均衡后的接收符号，输出是恢复的信道特征向量。这种方法的潜在优势是，基于联合信源信道编码和调制的贯通式 AI 化端到端设计，可以提取信源语义信息和上行信道特征，尝试自适应优化信源编码、信道编码和等效调制阶数需求下的最佳匹配方式，获得更优的反馈性能。

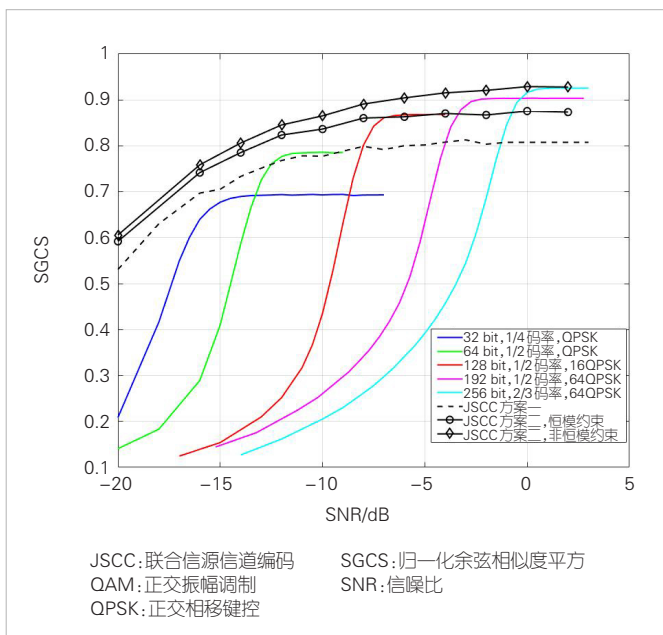
## 2) 针对CSI的联合信源信道编码仿真验证

针对 CSI 的联合信源信道编码的性能仿真结果如图 11 所示，仿真参数如表 2 所示。作为对比的基线方案是，3GPP R18 讨论的基于 AI 的 CSI 反馈方案。CSI 编码器和解码器在训练过程中假设的是理想反馈，在推理评估时考虑实际的上行传输链路。

基于表 2 的评估参数，不同 CSI 反馈方案的仿真评估结果如图 11 所示，其中归一化余弦相似度平方 (SGCS) 被作为评估指标。基线对比方案采用不同 CSI 编码器输出比特、码率、调制方式。信源信道联合编码 (JCSS) 方案一中采用

128 bit 输出、正交相移键控 (QPSK) 调制。JCSS 方案二采用 64 复数序列输出，实现 CSI 联合信源信道编码及调制功能，并分别对比了恒模与非恒模的功率约束方式。在相同的反馈开销下，相比于基线方案，CSI 信源信道联合编码方案能在中低信噪比区间取得较好性能。包含调制的 CSI 信源信道联合编码方案可获得进一步的性能提升，即端到端的全 AI 联合设计具有更高的潜在增益。此外，包含调制的 CSI 信源信道联合编码的非恒模约束方案在不同信噪比下的性能，均优于所有基线方案的包络上边界。基线方案的包络线对应的假设是，基站侧能够基于不同的上行信噪比进行理想的上行调度，进而在不同

上行信噪比下选择最适配的上行码率和调制方式。但在实际系统中，由于上行信噪比的测量精度是有限的，基站侧进行理想上行调度的可行性和效率会受到约束。针对不同的信噪



▲图11 信道状态信息(CSI)信源信道联合编码方案性能评估

▼表2 针对CSI的联合信源信道编码基本仿真参数

公共参数	配置
下行信道	UMa, 32T4R
上行信道	UMa, 1T32R
CSI 反馈层数	1
上行信噪比	(-20, 3) dB
占用上行传输资源数目	64 RE

CSI: 信道状态信息    RE: 资源粒子    UMa: 城区宏小区

比区间,信源信道联合编码方案有望规避基于上行信噪比进行调度和模型选择的额外操作,具有更好的实际部署能力和扩展性。

以上结果表明,由于提取了信道特征向量在空间和频域的语义信息,并且在传统信源编码的信息损失和传统信道编码的增加冗余之间取得了更好的折中,CSI信源信道联合编码方案使得信源信息在有限传输资源上能够被更好地编码和恢复。因此,利用语义通信的方法提取信道与无线环境语义信息,并设计基于联合信源信道编码的CSI反馈,有望提升CSI在非理想信道下的反馈性能,是面向6G的具有潜力的无线通信与AI结合的又一关键物理层技术方向。

### 2.3 面向AI的生命周期管理与解决方案

6G AI需要对无线通信与AI技术深度融合所面对的共性限制条件进行明确的判断。

当前无线系统AI化的重点集中在期望通过增益、复杂度、泛化性等维度,优先评估AI对未来无线通信系统带来的新变化、新增益。相对理想的数据、训练、场景等限制条件被优先考虑,以快速确认AI解决方案在无线系统中使用所带来的影响。但上述的假设往往会引入一些过于理想的条件,比如:对于数据来说,是否能够获取足量的训练数据,如何评估获取数据所需要付出的代价;对于场景来说,模型训练是否可以在足量场景下完成,如何评估不同场景对智能无线通信解决方案的影响;对于模型、算法训练来说,在不同场景、数据条件下,是否都可以使用离线处理的方案。

在当前工作的基础上,6G系统智能重构还需要充分考虑实际系统与人工智能技术深度结合时所面临的数据、场景,以及在线训练更新等更多方面的影响因素,从系统设计的源头支持面向小样本、场景自适应、可在线更新需求的无线AI解决方案的应用部署,进一步扩充未来无线通信系统的智能化边际<sup>[19]</sup>。

在AI和下一代无线通信系统的深度结合过程中,作为智能化系统设计、性能评估的基础,针对无线数据集本身及其衍生问题的研究在6G阶段中将扮演着不可或缺的角色。以物理层应用为例,无线数据大多都可溯源到信道数据。基础方案可采用由平台仿真与外场实采所形成的基本物理层无线AI研究数据集。但是,对于实际无线环境来说,通信系统所需面临的信道条件往往较为复杂,仿真数据和局部实采数据的可靠性往往有限。在实际无线环境中,充分且完备的实采信道数据很难获取。传统路测获得底层无线信道数据的方式,往往在花费较大的人力、物力成本后依旧难以获取完备的数据集。针对这类问题,在进行6G无线系统的AI化构

建时,需要充分考虑无线AI不同研究方向所涉及的不同数据集需求,充分评估获取方式与获取难度,支持小样本数据假设下的真实场景建模。例如,通过智能技术实现物理信道的虚拟重构,继而评估不同来源的无线AI数据集在其所对应的无线AI用例中的可用性及有效性<sup>[20]</sup>。

### 3 结束语

本文中我们围绕引入AI的6G一体化、系统化构建,基于AI的新传输方案与新空口设计,以及面向AI的生命周期管理与解决三方面内容进行了研究说明。特别地,我们重点介绍了零开销叠加导频设计、信道与无线环境语义通信,两项重点6G AI物理层技术,以及上述问题的需求、设计和仿真验证情况。本研究可为未来6G系统物理层AI化构建、技术推进和标准化提供参考。

人工智能的发展与应用为未来无线通信系统的智能构建提供了潜力,也带来了更多的挑战。对于6G来说,未来的无线通信网络将不再是一张简单的传输网络,智能的需求、智能的改变、智能的构建将贯穿于6G系统甚至更长久系统的设计与建设当中。我们期待着“智启无线、智享世界”的到来。

### 参考文献

- [1] TANG H, YANG N, ZHANG Z, et al. 5G NR and enhancements: from R15 to R16 [M]. Elsevier, 2021.
- [2] CHEN W S, LIN X Q, LEE J, et al. 5G-advanced toward 6G: past, present, and future [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(6): 1592-1619. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3274037
- [3] IMT-2030(6G)推进组. 6G 典型场景和关键能力白皮书 [R]. 2022
- [4] IMT-2030(6G)推进组. 6G 总体愿景与潜在关键技术白皮书 [R]. 2021
- [5] GUO J J, WEN C K, JIN S, et al. Overview of deep learning-based CSI feedback in massive MIMO systems [J]. IEEE transactions on communications, 2022, 70(12): 8017-8045. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3217777
- [6] MA K, WANG Z C, TIAN W Q, et al. Deep learning for mmWave beam-management: state-of-the-art, opportunities and challenges [J]. IEEE wireless communications, 2023, 30(4): 108-114. DOI: 10.1109/MWC.018.2100713
- [7] XIAO H, WANG Z Q, TIAN W Q, et al. AI enlightens wireless communication: analyses, solutions and opportunities on CSI feedback [J]. China communications, 2021, 18(11): 104-116. DOI: 10.23919/JCC.2021.11.008
- [8] SOHRABI F, ATTIAH K M, YU W. Deep learning for distributed channel feedback and multiuser precoding in FDD massive MIMO [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(7): 4044-4057. DOI: 10.1109/TWC.2021.3055202
- [9] AOUDIA F A, HOYDIS J. Trimming the fat from OFDM: pilot- and CP-less communication with end-to-end learning [C]// Proceedings of IEEE International Conference on



- Communications Workshops (ICC Workshops). IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473605
- [10] SONG J X, HÄGER C, SCHRÖDER J, et al. Benchmarking and interpreting end-to-end learning of MIMO and multi-user communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(9): 7287–7298. DOI: 10.1109/TWC.2022.3157467
- [11] HOEHER P, TUFVESSON F. Channel estimation with superimposed pilot sequence [C]//Proceedings of Seamless Interconnection for Universal Services. Global Telecommunications Conference. GLOBECOM'99. (Cat. No. 99CH37042). IEEE, 1999: 2162–2166. DOI: 10.1109/GLOCOM.1999.827587
- [12] JING X R, LI M W, LIU H Q, et al. Superimposed pilot optimization design and channel estimation for multiuser massive MIMO systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2018, 67(12): 11818–11832. DOI: 10.1109/TVT.2018.2875480
- [13] MA J J, LIANG C L, XU C B, et al. On orthogonal and superimposed pilot schemes in massive MIMO NOMA systems [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35(12): 2696–2707. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2726019
- [14] AIT AOUDIA F, HOYDIS J. End-to-end learning for OFDM: from neural receivers to pilotless communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(2): 1049–1063. DOI: 10.1109/TWC.2021.3101364
- [15] YE H, LI G Y, JUANG B H. Deep learning based end-to-end wireless communication systems without pilots [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2021, 7(3): 702–714. DOI: 10.1109/TCCN.2021.3061464
- [16] XU J L, AI B, WANG N, et al. Deep joint source-channel coding for CSI feedback: an end-to-end approach [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(1): 260–273. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3221963
- [17] ZHANG P, XU W J, GAO H, et al. Toward wisdom-evolutionary and primitive-concise 6G: a new paradigm of semantic communication networks [J]. Engineering, 2022, 8: 60–73. DOI: 10.1016/j.eng.2021.11.003
- [18] JIANG Y H, KIM H, ASNANI H, et al. Joint channel coding and modulation via deep learning [C]//Proceedings of IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2020: 1–5. DOI: 10.1109/SPAWC48557.2020.9153885
- [19] XIAO H, TIAN W Q, LIU W D, et al. Knowledge-driven meta-learning for CSI feedback [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(6): 5694–5709. DOI: 10.1109/TWC.2023.3327984
- [20] XIAO H, TIAN W Q, LIU W D, et al. ChannelGAN: deep learning-based channel modeling and generating [J]. IEEE wireless communications letters, 2022, 11(3): 650–654. DOI: 10.1109/LWC.2021.3140102

## 作者简介



**田文强**，OPPO研究院通信标准高级研究员；主要研究方向为5G/6G无线通信系统标准化、6G技术预研、基于人工智能技术的无线通信技术。



**沈嘉**，OPPO研究院通信标准专家，教授级高工；主要研究方向为5G/6G无线通信系统标准化、6G技术预研、基于人工智能的无线通信技术。



**肖寒**，OPPO研究院通信标准高级研究员；主要研究方向为6G技术预研、基于人工智能的无线通信技术。



**刘文东**，OPPO研究院通信标准高级研究员；主要研究方向为6G技术预研、基于人工智能的无线通信技术。



**郑旭飞**，OPPO研究院通信标准高级研究员；主要研究方向为6G技术预研、基于人工智能的无线通信技术。

# 6G 星地融合无线网络及关键技术



## Terrestrial and Satellite Network Integration Based 6G System and Its Key Technologies

缪德山/MIAO Deshan<sup>1,2</sup>, 邓凌越/DENG Lingyue<sup>1,2</sup>,  
孙建成/SUN Jiancheng<sup>1,2</sup>, 徐晖/XU Hui<sup>1,2</sup>

(1. 中兴科移动通信技术股份有限公司, 中国 北京 100083;

2. 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室, 中国 北京 100083)

(1. CICT Mobile Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Wireless Mobile Communication, China Information and Communication Technologies Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404007

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20240719.1812.008.html>

网络出版日期: 2024-07-24

收稿日期: 2024-06-20

**摘要:** 地面移动通信网络与卫星网络的融合是技术发展的必然趋势。5G 非地面网络 (NTN) 系统已实现星地网络在标准体制层面的融合, 在向 6G 的技术演进中, 星地网络将会走向更加深入的融合, 包括标准、设备、资源和业务等多个方面。从技术需求和应用场景出发, 本文提出星地融合的网络架构, 分析星地融合网络的关键技术, 并对未来的技术趋势进行展望。

**关键词:** 星地融合; 6G; 网络架构; 协同传输

**Abstract:** The integration of terrestrial network and satellite network is an inevitable trend in technological evolution. 5G NTN has achieved the integration of satellite network and terrestrial network at standard level. In the evolution towards 6G technology, satellite and cellular communication will move towards deeper integration, comprised of standard, device, resource, and service, etc. Starting from technical requirements and application scenarios, this article proposes a kind of network architecture for the integration of terrestrial network and satellite network, analyzes relevant key technologies, and looks forward to future technological trends.

**Keywords:** integration of terrestrial network and satellite network; 6G; network architecture; cooperative transmission

**引用格式:** 缪德山, 邓凌越, 孙建成, 等. 6G 星地融合无线网络及关键技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 42-49. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404007

**Citation:** MIAO D S, DENG L Y, SUN J C, et al. Terrestrial and satellite network integration based 6G system and its key technologies [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 42-49. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404007

在 5G 时代, 地面移动通信网络以增强移动宽带 (eMBB)、海量机器类通信 (mMTC)、超可靠低时延通信 (URLLC) 三大场景为应用支撑, 以万物互联为目标, 大幅度提升了移动通信的应用范围和业务服务能力。但近年来随着卫星通信的需求扩展, 第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 开展了 5G 非地面网络 (NTN) 的技术标准化工作, 进一步提升了 5G 系统的应用能力。卫星通信的主要优势在于可提供更广域范围的通信服务能力, 特别是在海洋、山川、沙漠等野外环境, 也可以用于农村和偏远地区, 以弥补地面网络

覆盖的不足。但总体看, 5G NTN 是在 5G 后期版本才开始的标准化设计, 在系统架构、空口设计以及星地系统协同等方面还未考虑星地系统深度融合的需求, 也未考虑卫星空间应用场景的定制化需求, 因此卫星网络和地面网络基本上独立部署, 而且系统效率并未充分优化。在 6G 时代, 星地融合的全域覆盖已是大势所趋, 终端在卫星网络和地面网络的无缝切换将成为现实<sup>[1-3]</sup>。因此, 空天地一体化是 6G 网络设计的一个重要动力, 也是 6G 网络实现泛在连接的主要抓手。

针对空天地一体化的应用需求, 6G 无网络系统应该在系统架构、空口技术和关键流程等方面面向星地融合的技术路径开展相关设计, 主要目标是实现星地融合的一体化设计理念, 真正实现网络融合和系统融合<sup>[4-6]</sup>。

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB2902600)

1 星地融合网络发展趋势

1.1 星地网络技术与标准融合

卫星通信具有广覆盖的特点，作为地面通信的补充，一直以来都是独立发展的。然而，从技术体制的角度看，两种通信系统还是有很多相似之处的。无论是窄带卫星通信，还是近年来的宽带卫星通信系统，卫星通信总体上吸取了地面移动通信的先进技术作为系统设计支撑。值得注意的是，最近几年的手机直连技术进一步推进了卫星通信和地面移动通信的深度融合。在标准层面，ITU-R WP4B在2020年成立了5G卫星无线空口研究项目，侧重于对5G卫星的应用场景、关键性能指标进行评估<sup>[7]</sup>。目前3GPP已经提交了基于5G NTN的技术标准作为候选技术方案。3GPP从R15后期开展了基于5G NTN的网络架构、应用场景和技术方案的讨论，在R17阶段完成了第一个融合标准<sup>[8-10]</sup>，在R18和R19中继续推进NTN技术的实用化和性能方面的优化。中国通信标准化协会（CCSA）也同步开展了卫星通信的技术和标准讨论，以5G卫星融合为基本技术路径，逐步针对应用场景和技术方案进行全面标准化设计。

然而，总体来说，5G系统设计时由于以地面覆盖为主，没有全面考虑卫星通信的应用需求和场景限制，因此，5G NTN体制实现了两种通信模式的标准兼容，但并未形成系统层面的融合和优化。

面向6G，星地一体化将会成为技术发展的必然趋势，已经受到全球标准组织和产业界的高度关注。中国IMT-2030（6G）推进组成立了天地一体化工作子组，负责卫星和地面通信融合技术研究。欧洲电信标准化协会（ETSI）的6G项目也把星地一体化设计作为基础目标，同时ETSI还倡议成立了6G NTN技术联盟，进一步明确了6G星地融合的技术路径。在6G的标准设计需求上，星地融合必然是内生需求。面向6G的天地一体化，需要从标准和技术层面同步考虑地面和卫星的差异性需求，实现系统内生融合，支持星地融合的全球无缝覆盖。

1.2 星地网络应用和系统融合

从应用场景和业务类型来看，6G星地一体化系统能够面向空天地海等泛在连接场景，支持多样化的业务类型，手机直连卫星将成为其中最具代表性的应用。从整个星地一体化角度看，6G系统在引入卫星的业务应用后，将能提供更丰富的业务能力和更好的业务体验。表1给出了6G星地一体化系统的业务需求和对应的支撑能力。

从星地融合的系统发展趋势来看，目前6G星地系统融合呈现将在覆盖协同、业务协同、资源共享和功能升级等方面进行全方位的优化和协同发展。其中，覆盖协同指的是星地系统各自发挥优势，人口密集区域将以地面通信为主，人口稀少的偏远地区将以卫星覆盖为主；业务协同方面可预见的是卫星通信在应急通信、中继通信和低空高速环境下具备明显优势，而地面通信主要为低速移动和高速率需求的用户服务为主；资源共享不仅仅在频率资源方面共存共享，也体现基于负载均衡的资源分配优化；功能升级主要体现为星地融合后，在导航定位、遥感感知、卫星车联网等场景的系统效能提升。基于上述方面的增强优化，可以预见，6G网络的星地融合将在资源协同共享、业务联合管理、协议标准融合等方面走向更彻底的升级演进。

2 6G星地融合无线网络架构

2.1 系统总体架构

星地融合的系统架构需要考虑星地立体异构网络的特点，可以通过地面移动通信网络和卫星通信网络的相互配合共同构成天地一体化信息网络<sup>[11]</sup>，也可以通过在星上部署用户面网元来实现业务本地传输和星上业务处理<sup>[12]</sup>。面向6G星地融合场景，网络架构需要支持根据业务和组网需求进行按需组网，因此星地融合的网络架构应按照按需配置、统一编排、柔性分割、弹性可重构的设计思路开展具体设计。在组网层面，满足多层网络之间的互联互通，满足数据和控制信息层间交互。在功能层面，每层网络可进行独立的功能配置和网元部署。

▼表1 6G星地一体化系统的业务支撑能力

业务类型	技术能力	典型场景
eMBB业务	为用户提供全球无缝覆盖的语音、数据和视频等业务的支持能力	手机直连卫星、卫星宽带接入、地面蜂窝通信
中继和回传通信	向地面网络无法到达的区域提供高速的通信连接,包括回传、数据中继等	偏远地区通信、远程物联网
高速移动的通信应用	为高速移动设备提供平滑和无缝切换的用户体验	船载通信、机载通信、无人机
广播业务	基于卫星和临空平台提供数据、视频等广播业务	卫星电视、数据广播
机器通信	为各种传感器、物联探测设备提供信息传输通道	卫星/地面物联网
紧急通信	应急灾害预警、应急信息上报、应急场景信息传送	应急救援通信

eMBB:增强移动宽带



如图1所示,星地融合网络采用服务化的网络架构,可以根据业务和组网需求按需部署网络功能。地面网络部署完整的网络功能,包括核心网、接入网和智能的管理和编排系统,在卫星节点上根据卫星能力和组网需求按需部署控制面网络功能和用户面网络功能,确定网络的锚点和接入点,实现用户的自由接入,满足业务和组网需求。在资源管理层面,星地融合网络需要统一的编排和资源管理,实现资源的共享和业务统一调度。通常,在地面网络可配置一个全局网管单元,实现全网资源的统一管控。

在网络架构和协议接口设计方面,星地融合网络需要采用统一的网络架构和标准体制。在进行接口协议设计时需要考虑网元功能和设备能力的差异,同时要考虑星地大时延传输带来的业务管理和资源分配的限制。不同的部署需求和不同功能要求,比如星间中继、星上存储转发、非连续覆盖等,都要求网络接口设计尽可能保持弹性和可扩展性。

在进行星地融合网络架构设计时,需要重点考虑移动性管理能力。低轨卫星的快速移动和星地网络的切换,都要求接入网和核心网对用户的移动性保持良好支持能力,需要满足终端动态的锚点迁移,适应不同终端的移动速度和网络节点的移动速度,真正满足全域覆盖和无缝切换的需求。

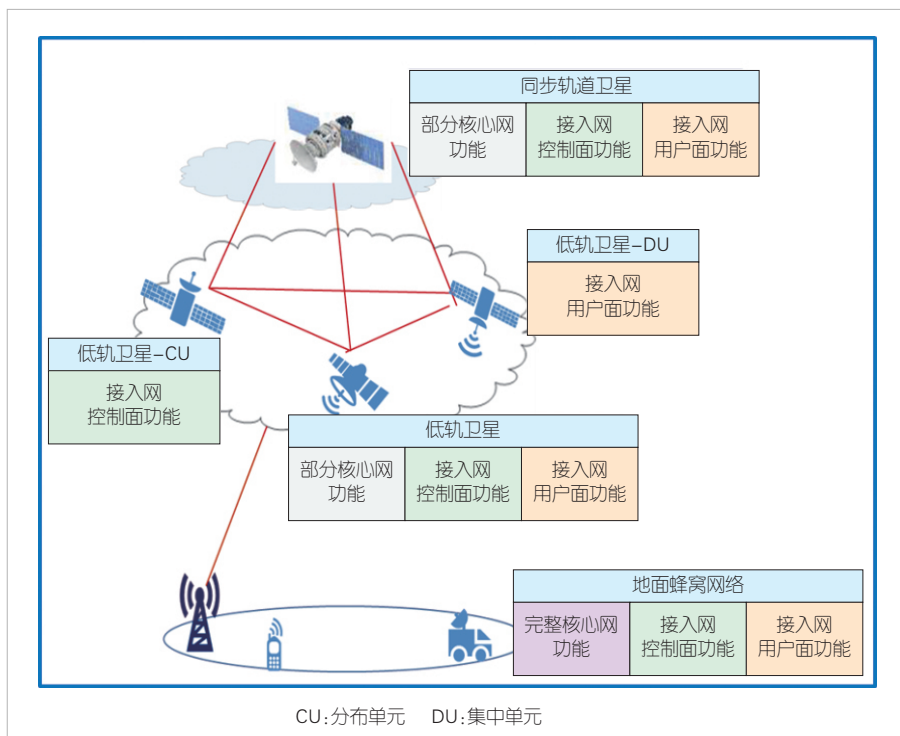
## 2.2 星地融合接入网架构

在图1的星地融合网络总体设计约束下,接入网架构可在5G NTN基础上进一步增强<sup>[13]</sup>,即实现星地网元功能的按需部署。未来6G系统设计仍会继续沿用类似无线接入网(RAN)分离的架构,并基于卫星能力和部署需求,将不同的RAN节点灵活部署在不同的卫星上,借助星间协同或星地协同来完成用户信令和数据的处理。

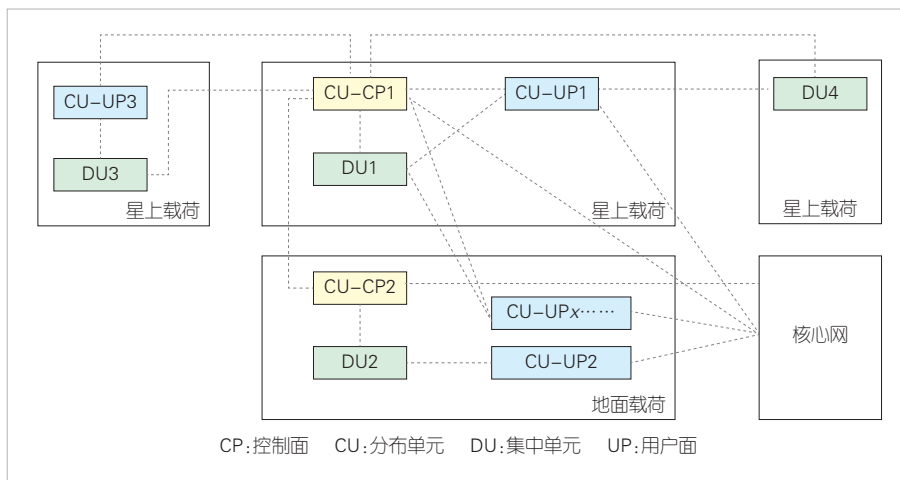
图2给出了一种可能的6G星地融合接入网架构。根据该架构,不同的卫星拥有不同的基带处理能力,有的具备完整的基站处理能力,有的具备DU和CU-UP(集中单元-用户面),有的仅有

DU。这样,相邻的卫星通过星间链路可以完成CU和CU-CP(集中单元-控制面)、DU和CU-UP间的接口建立维护,通过星间协同,共同为用户设备(UE)完成接入网侧的控制面信令和用户面数据的传输。也可以基于馈电链路,在星上载荷和地面载荷之间进行CU-CP、CU-UP以及DU间的灵活交互,以更好地进行星地资源协调、星上负荷卸载等。

另外,考虑到卫星部署的实际特点,6G需要考虑星间路由和中继,以支持远端卫星的馈电连接。在相应的RAN架构方面,可以考虑基于中继的网络架构来支持卫星的多跳连接。



▲图1 弹性可重构的6G星地融合网络架构



▲图2 6G星地融合接入网架构示意图

如图3所示,有些卫星距离卫星网关较远,无法建立直接的馈电连接,但可以将邻近卫星作为中继节点,通过一跳或多跳,连接到锚点基站。该拓扑结构中,中继锚点负责中继路由的配置和管理,每一个中继节点均可以为UE提供接入和服务,通过一跳或多跳将UE的信令和数据路由到锚点基站。具体的中继技术可以是基于层3的技术,要求每个中继节点拥有完整的基站处理能力;也可以是基于层2的中继,要求每个中继节点只需要具备物理层和L2的处理能力。

### 2.3 架构主要特征

基于上述的网络架构描述,未来星地融合网络将采用弹性可重构的网络设计,实现网元功能的按需部署,基于不同的业务需求对卫星节点上的资源进行调度和编排,提高卫星上资源的利用率。面向应用需求,相对于5G NTN网络,6G星地融合网络呈现下列新的特征:

#### 1) 星载平台的虚拟化

星上虚拟化技术可使星地融合网络突破卫星节点之间物理资源不互通的限制,更快地响应业务,降低网络部署和管理开销。通过统一的编排来部署不同的网络功能,满足业务不同服务质量的需求粒度,提供差异化服务;同时根据星上负载情况,采用与地面不同的虚拟化技术,比如轻量化技术中的容器等技术,提升星上资源的通用性与鲁棒性,为多层的星地融合网络的协同管理提供技术保障。

#### 2) 星载功能与协议的轻量化

由于卫星网络与地面网络有不同的通信体制与差异化的通信链路,地面核心网在参数配置及网络功能设置上无法兼容天基网络,因此需要地面核心网网络功能进行适配性优化。为了实现星地融合网络,需要对星地融合网络功能进行

裁剪或者定制化,即在不改变现有网络架构的前提下,评估接入方式、位置更新等过程,以及卫星与地面网络功能裁剪方案对系统技术指标(如业务时延、阻塞率及定时机制)的影响,对地面核心网进行定制化参数设置,使其能够适配天基网络。

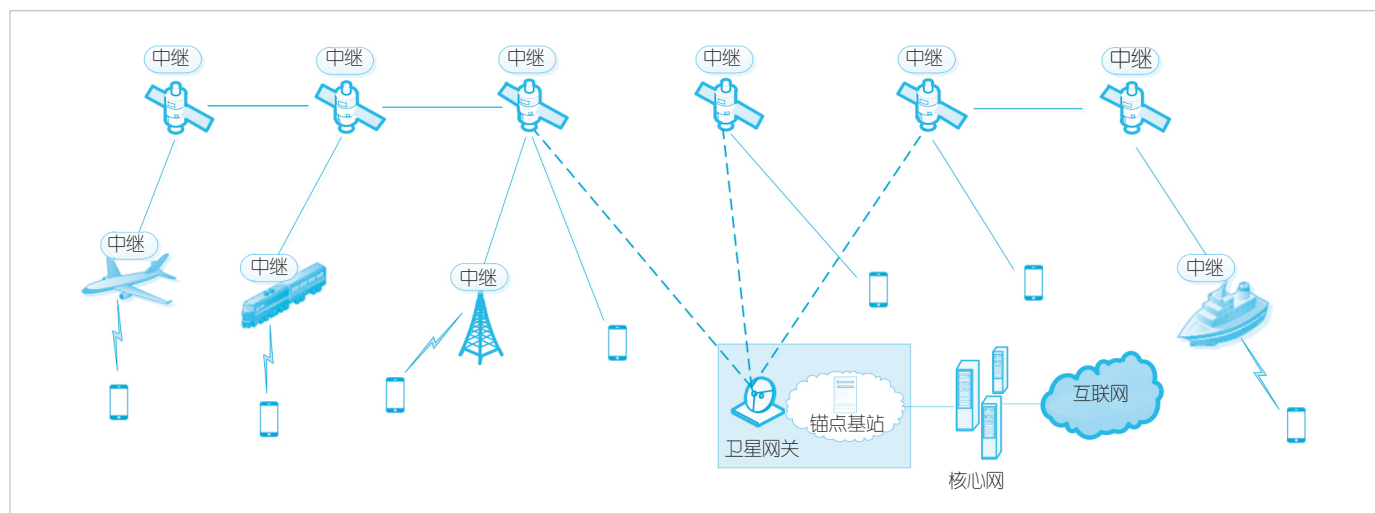
#### 3) 网元功能的按需部署

由于卫星能力和成本的限制,星载基站的CU和DU基于需求可以不在不同卫星上部署,CP和UP也可以按需部署。进一步地,CU-CP和CU-UP也可以分开部署。核心网功能的CP和UP可以按需部署。当采用核心网的部分或全部功能上星部署时,可建立天基核心网,使得信令消息直接在星上处理,避免信令消息在卫星与信关站之间频繁交互。在实际部署中,网络架构应兼容透明转发和星上处理的混合组网,以提供网络部署的便利性。

## 3 6G星地融合无线系统关键技术

### 3.1 波形与多址技术

对于6G星地融合网络,波形技术需要针对地面蜂窝通信和卫星通信一体化设计,以满足差异化的信道环境同时确保统一的设备实现,降低系统建设成本。相对于地面环境,卫星存在特定的信道差异,需要在波形设计方面予以针对性考虑。对于卫星通信,低峰均比是个关键需求,因此需要考虑低峰均比的波形设计,以提升功耗的效率。由于DFT-S-OFDM(离散傅里叶变换扩展的正交频分复用技术)波形呈现单载波特性,可有效降低峰均比,卫星系统的下行和上行信道均可选择性使用。当多个卫星波束共用一个功率放大器(PA)时,叠加信号的峰均比对于不同波形的差异降低,此



▲图3 基于中继的接入网拓扑结构示意图

时可以直接应用CP-OFDM波形,或者进一步考虑采用削峰和数字预失真等处理技术降低信号的峰均比。总的来说,基于CP-OFDM和DFT-S-OFDM的波形设计仍然可以继续沿用。

为支持统一的波形设计,空口设计需要采用可变参数集以自适应配置不同的应用场景,包括CP长度、子载波间隔、带宽和DFT变换等参数的动态配置。比如,在卫星信道中,通常以视距传输为主,CP长度的配置相对地面通信可以进行差异化设计,此时下行链路采用较短的CP,而上行链路则采用较长的CP以容忍较大的同步偏差。同时,低轨卫星信道的多普勒偏移较大,子载波间隔的配置必须克服预补偿后的多普勒残差影响。

面向未来的星地融合场景,由于卫星服务的广覆盖需求,系统需要具备支持较多用户同时接入的能力,同时考虑到星地传输时延大,为降低终端接入时延,可以采用非正交多址技术,并简化接入流程,实现有效覆盖。UE之间以非正交多址方式发送接入请求,同时携带数据包承载以简化传输流程,然后卫星基站在检测到数据后,发送确认信息。如果没有持续数据发送,UE可以终止发送过程。通过这一机制,UE以完成了极简接入。

### 3.2 灵活双工技术

地面移动通信系统中通常采用频分双工(FDD)模式和时分双工(TDD)模式。传统的卫星通信系统多采用FDD模式,目前3GPP NTN主要研究的双工模式也是FDD模式。对于星地融合通信来说,未来的双工方式是FDD和TDD融合部署:当频段受限时,采用TDD模式;当具备成对频谱且需要和地面手机共存时,可以采用FDD模式。

TDD模式是星地融合通信的一个重要的发展方向<sup>[14]</sup>。其主要优势有:1)频率资源相对丰富;2)便于实现收发共阵。其主要不足在于:1)对时间同步要求高;2)复杂的上下行链路干扰问题;3)更长的物理帧长度。半双工FDD也是星地融合通信的一种重要的双工方式。这种方式的主要优点是便于实现单端收发共阵且能够解决收发隔离问题,主要不足是对时间同步要求高、传输效率较低。

对于TDD系统,需要考虑小区内用户上行和下行的相互干扰,如果直接采用地面的帧结构设计,帧开销太大,因此需要对TDD间隔进行优化设计。基本的技术思路是:基于用户的位置进行时序建立,不同区域的用户由于信号的衰减可实现信号的重叠发送;通过对用户归属区域进行划分,同一区域用户严格对齐,不同区域用户可以信号重叠,从而减少保护间隔。从图4可以看出,传统的GAP(保护间隔)

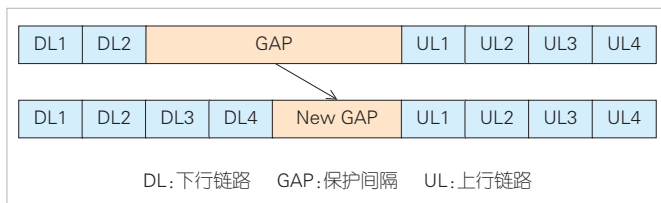
设计由于考虑星地传输时延,间隔较大。通过优化设计,新的GAP可明显降低,提升了系统效率。

### 3.3 星地融合网络的智能接入

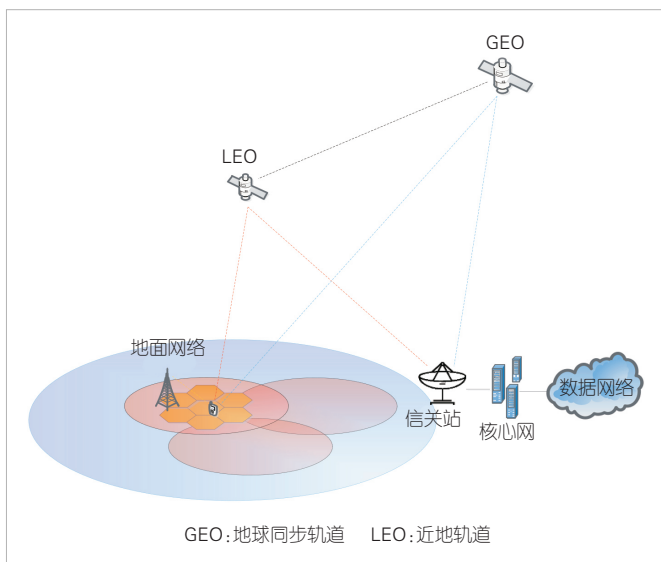
在传统的地面网络中,UE的选网策略比较单一,比如5G优先,其次是4G,再次是3G/2G;网络的切换策略也比较简单,主要是基于UE对邻区的信号测量和上报。不同接入技术间的切换,主要也是由于高优先RAT(无线接入技术)的覆盖不好导致的,通过异频测量或异系统测量配置和UE的测量结果来进行切换判决和实施。

6G星地融合将支持多种多样的终端类型和业务类型。对于支持多轨卫星及地面接入技术的终端,更加优化的网络选择、重选,以及切换技术是为UE提供高质量服务的重要依据。因此,可以综合考虑UE的接入能力、UE的签约信息、用户的个性化设置、UE的业务需求等来选择更优的网络。当UE发起业务时,其自身可以根据本次业务需求,主动进行小区选择或重选到更适合该业务的网络,以更好地满足UE的业务需求。

如图5所示,UE处于地球同步轨道(GEO)、近地轨道(LEO)以及地面蜂窝网络的多重覆盖下。如果UE当前驻留在高轨卫星小区,当其为宽带业务或低时延业务的需求时,



▲图4 时分双工(TDD)帧结构设计



▲图5 多重网络覆盖下用户设备(UE)网络选择/重选/切换示意图



会选择低轨卫星甚至地面网络，并发起相应业务。同样地，在UE业务期间，如果业务模型发生变化（比如发起了新的业务），网络可以根据新的业务需求，结合网络资源情况，优先将UE切换到能够满足新业务需求的网络。

### 3.4 星间星地协同传输

#### 1) 星间协同传输

为提高卫星通信的系统容量，在未来的海量星座系统中，应利用多颗卫星协作构成协同传输模式，不仅支持星间波束协作降低星间相互干扰，还支持多颗卫星为单个终端服务进行多流传输。从终端角度来看，可见空间内的多颗卫星可以作为多个传输天线或传输点。若每个卫星向终端提供一个波束，多个卫星同时向单个终端传输数据，则系统可以被视为一个大型的虚拟多输入多输出（MIMO）系统<sup>[15]</sup>。一般情况下，系统中轨道高度相同和轨道高度不同的卫星之间进行联合传输。各个卫星所处的位置不同，能够避免各个波束信道之间的高信道相关性。因此，多卫星联合传输避免了单星系统中必需的波束间隔离措施。

在典型的双卫星多波束单终端MIMO系统中，两颗卫星同时向单个终端发送数据，每个卫星仅发送一个波束。终端同时接收两个波束，但需要至少两处不同位置的天线以确保构成 $2 \times 2$  MIMO。由于两颗卫星位于不同位置，波束信道之间相关性较低，信道存在额外的空间自由度，因此，系统通过两颗不同卫星和终端的两个天线形成虚拟MIMO系统。从虚拟MIMO的角度来看，其系统性能取决于两处接收天线收到的叠加信号之间的相关性，而每一处接收天线所收到的叠加信号特性由与两颗卫星的配置有关。

多星协同传输的一个重要技术问题是星间同步问题。在常规思路中，应该由终端根据卫星的时刻进行接收校正，但终端只能确定一个下行接收时刻，不能对两个波束分别设置不同的下行定时。而另一方面，由于两颗卫星对于终端的相对距离不同，其传输时延也大概率不同，这就导致即使同时进行下行传输，两颗卫星信号的达到时刻也不是对齐的。为解决这一问题，可采用星间同步预补偿技术。具体地，以其中一颗卫星为锚点，其他卫星和锚点卫星对齐，在发送端进行信号的同步补偿，从而实现在终端接收侧的信号同步到达。当信号的时延误差在OFDM符号的CP范围之内，则不会影响系统性能。

#### 2) 星地协同传输

星地协同传输主要包括两种模式：一种是覆盖协同，当卫星信号和地面基站信号覆盖在不同区域时，终端在不同区域的移动可基于信号强度的差异进行动态切换；第二种是传

输协同，终端可以同时连接两种接入点，形成双连接，此时地面基站和卫星基站可以采用资源协同和业务协同。比如：卫星基站供广域覆盖，地面基站提供高速数据传输，或者地面基站与卫星基站进行负载均衡，基于不同接入点的资源配置情况，动态协同数据传输。

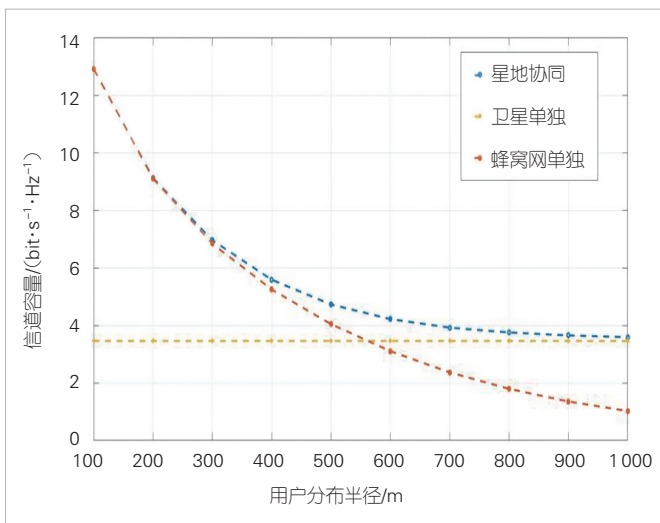
在星地协同传输研究中，有两个首要问题需要解决：（1）地面网络和卫星网络的协同需要高度紧密，最好是同一个运营商，否则协同将退化为异系统漫游；（2）不同协同方式对终端和网络的能力要求不同，需要准确定义接口要求、协议机制和实现约束。

图6给出了一种星地协同传输的理论容量示意图。可以看出，当用户在地面小区不同位置移动时，吞吐量将随用户和基站的位置变化而变化，而卫星传输吞吐量则相对稳定。但是，当采用星地联合传输时，总的传输容量大于单独的卫星传输或者地面蜂窝网传输，假定此时总传输功率一定，卫星传输吞吐量较稳定，总的传输量大于单独的卫星传输和地面传输，系统会保持一个较好的传输容量。这个例子也说明了星地传输的技术潜力。

### 3.5 星地频谱共享

随着用户和业务的增长，频率资源特别是用于卫星通信的频率资源，变得越发匮乏。星地融合通信网络需要突破传统的频率硬性分割模式，利用空间隔离、时间隔离、空分复用和精细化频谱管理实现星地频谱共享与频率复用。

在星地融合通信中，对于高频段，卫星和终端都采用高增益定向天线，空间隔离、时间隔离和空分复用相对容易实现；对于低频段，特别是手机直连卫星的场景，由于终端采用全向天线或低增益天线，频率复用变得更为复杂，集总干



▲图6 星地协同传输与非协同传输性能对比图

扰问题也十分突出,需要从整个星座的角度(而非单颗卫星的角度)来综合考虑,把多频复用方案、卫星天线模式、旁瓣抑制技术、终端功率控制技术等结合起来。常用的实施方法包括半静态的区域规划、动态的干扰侦听和规避以及星地的资源分配信息共享。如图7所示,卫星和地面覆盖相重叠的区域采用异频,而相距较远的位置可以采用同频,从而提高频谱使用效率。

在星地融合通信中,NGSO(非地球同步轨道)卫星系统不能干扰GEO卫星系统。对于两者共享的频段,应对NGSO卫星系统施加功率通量密度(PFD)限制;对于某些频段而言,还需要考虑等效功率通量密度(EFPD)的限制。因PFD设计相对简单,可以以PFD约束为条件,根据轨道高度、倾角和带宽来设计波束的EIRP(有效发送功率)。EFPD设计相对复杂,一般需要从覆盖、干扰规避角、天线旁瓣抑制水平、轨道高度、倾角和带宽等方面来综合考虑波束的EIRP。

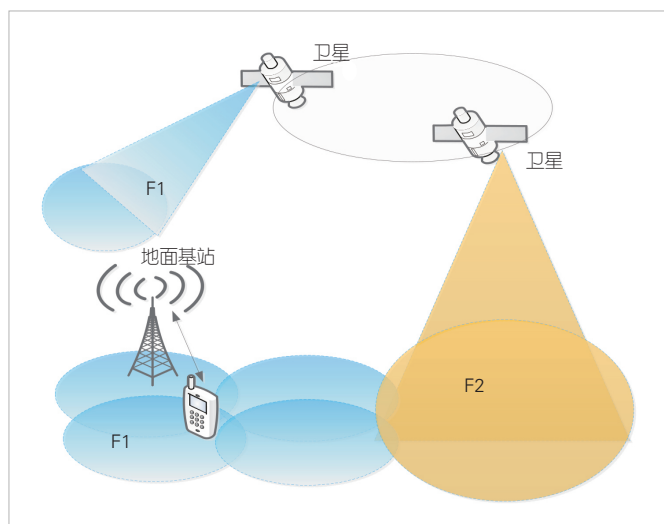
在星地融合通信中,可以利用先进的算法和机制来协作实现星地频谱共享。例如:终端可以使用人工智能(AI)技术,更好地区分卫星通信信号和地面通信信号;利用空间多层网络中波束和覆盖的差异性,实现星地通信的软频率复用;通过引入机器学习预测频率态势,制定星地动态频率共享策略。

### 3.6 通信、定位和感知融合设计

传统卫星的通信功能和导航定位功能相对分离,星座也是独立部署的。然而,随着星地融合网络的发展,卫星通信和定位技术可以进行深度融合。比如,采用通信信号可进行导航定位,通过卫星位置信息播发和终端的信号测量,终端将具备独立定位解算的能力。地面蜂窝系统的定位技术可以应用于卫星网络,或者基于卫星网络的差异性和空间环境特点,设计新的定位技术,从而实现通信和定位的一体化设计。

在3GPP R18 NTN项目中,相关的卫星定位方案已经过初步评估<sup>[16-17]</sup>,研究结果显示基于当前NTN定位技术卫星定位的精度在几百米到几公里之间。面向6G更高精度的通信定位融合设计中,主要解决的技术难点包括:1)终端可见卫星的数量有限,会降低估计的精度,增加定位的时延;2)卫星本身的定位精度和卫星之间、卫星和终端之间的钟差都会影响终端定位的精度;3)星地传输链路的信噪比对终端的定位精度有明显影响。这些难点问题后续需进一步解决。

通信和感知的融合设计是在近年来地面通信和感知一体化的基础上发展起来的。在地面5G网络中,目前正在开展通信和感知的技术与试验。而对于6G网络,不仅地面基站可以实现通信和感知的融合,卫星网络节点也可以进行



▲图7 星地频率共享复用示意图

通信和感知的融合设计。卫星通感一体化设计主要的挑战在于低信噪比、大时延和卫星高速移动带来的问题。针对这些问题目前业界正在逐步地研究解决。

## 4 总结与展望

基于6G的技术愿景和产业驱动,卫星通信和地面通信将深度融合,特别在覆盖协同、业务管理、资源共享和功能升级等方面进行全方位的优化和协同发展。在星地融合的系统设计层面,网络架构遵从星地多层网络的智能融合,满足弹性可重构的部署需求;在协议功能和接口设计方面,充分考虑星地网元的互联互通,同时考虑空间网元节点的能力限制;在无线传输技术方面,既考虑技术功能的一致性,也考虑卫星场景的差异性和具体场景的优势互补。

展望未来,星地融合的研究还有很长的路要走,在产业技术标准的全球一致性、网络和终端设备的低成本需求、系统的扩展性和健壮性方面仍需要进行探索。作为新型的信息基础服务设施,6G星地融合网络将在信息通信服务、社会安全与公共治理、产业升级等方面发挥更大的作用。

## 致谢

感谢中信科移动通信技术股份有限公司汪永明博士、康绍莉博士对本研究的大力支持!

## 参考文献

- [1] 林德平, 彭涛, 刘春平. 6G愿景需求、网络架构和关键技术展望[J]. 信息技术与政策, 2021, 47(1): 82-89
- [2] CHEN S Z, LIANG Y C, SUN S H, et al. Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system

- coverage, capacity, user data-rate and movement speed [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(2): 218–228. DOI: 10.1109/MWC.001.1900333
- [3] CHEN S Z, SUN S H, KANG S L. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G [J]. China communications, 2020, 17(12): 156–171. DOI: 10.23919/JCC.2020.12.011
- [4] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向6G的星地融合一体化组网研究 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 891–901. DOI: 10.3979/j.issn.1673-825X.202107130244
- [5] 徐晖, 缪德山, 康绍莉, 等. 面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术 [J]. 天地一体化信息网络, 2020(2): 2–10
- [6] 康绍莉, 缪德山, 索士强, 等. 面向6G的空天地一体化系统设计和关键技术 [J]. 信息通信技术与政策, 2022, (9): 18–26. DOI: 10.12267/j.issn.2096-5931.2022.09.003
- [7] ITU. Vision and requirements for satellite radio interface(s) of IMT-2020: ITU-R WP4B [S]. 2022
- [8] 3GPP. Study on using satellite access in 5G (R16): TR 22.822 V16.0.0 [S]. 2018
- [9] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (R15): TR 38.811 v15.4.0 [S]. 2020
- [10] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (R16): TR 38.821 v16.1.0 [S]. 2021
- [11] 吴曼青, 吴巍, 周彬, 等. 天地一体化信息网络总体架构设想 [J]. 卫星与网络, 2016(3): 30–36. DOI: 10.3969/j.issn.1672-965X.2016.03.004
- [12] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS): TS 23.501 [S]. 2023
- [13] 王胡成, 徐晖, 孙韶辉. 融合卫星通信的5G网络技术研究 [J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 535–542
- [14] KANG S L, MIAO D S, SUN S H, et al. TDD mode on NTN direct to satellite service [EB/OL]. [2024-06-10]. [https://futurenetworks.ieee.org/images/files/Tech\\_Focus\\_Articles/PDFs/issue16/TDD\\_mode.pdf](https://futurenetworks.ieee.org/images/files/Tech_Focus_Articles/PDFs/issue16/TDD_mode.pdf)
- [15] RAMAMURTHY B. MIMO for satellite communications systems [EB/OL]. (2018-08-22)[2024-06-10]. <https://www.dst.defence.gov.au/sites/default/files/publications/documents/MIMO%20for%20Satellite%20Communication%20Systems.pdf>
- [16] 3GPP. Evaluations on network verified UE location for NR NTN: R1-2208955 [S]. 2022
- [17] 3GPP. Network verified UE location for NR NTN: R1- R1-2210005 [S]. 2022

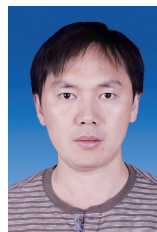
## 作者简介



**缪德山**, 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室技术骨干、中信科移动通信技术股份有限公司系统研究高级技术专家, 教授级高级工程师; 长期从事移动通信新技术研究与标准制定工作, 主要研究方向包括无线传输关键技术、卫星通信等。



**邓凌越**, 中信科移动通信技术股份有限公司工程师、科技市场高级经理; 主要从事卫星通信技术研究、解决方案制定和业务运营等工作。



**孙建成**, 中信科移动通信技术股份有限公司高级工程师、3GPP Rel-19 NR NTN 的联合报告人; 主要从事4G/5G/6G高层技术研究和标准化推动工作, 主要研究方向为卫星通信。



**徐晖**, 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信全国重点实验室技术骨干、中信科移动通信技术股份有限公司系统研究高级技术专家, 教授级高级工程师; 长期从事移动通信新技术研究与标准制定工作, 主要研究方向为网络架构及网络关键技术、卫星通信等。



# 面向 6G 的星地融合网络频谱共享技术



## Spectrum Sharing Technology for Satellite-Terrestrial Integrated Networks Towards 6G

瞿重希/QU Chongxi, 毛浩斌/MAO Haobin, 许懂/XU Chong, 张远钧/ZHANG Yuanjun, 肖振宇/XIAO Zhenyu

(北京航空航天大学, 中国 北京 100191)  
(Beihang University, Beijing 100191, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240722.0937.002.html>

网络出版日期: 2024-07-22

收稿日期: 2024-06-12

**摘要:** 卫星网络被认为是下一代移动通信系统的重要组成部分, 其与现有的地面蜂窝网络实现优势互补形成星地融合网络, 可以为全球范围内的海量用户提供无处不在的宽带接入服务。而两网如何高效共享有限的频谱资源、缓解同频共存干扰成为当前的技术难点与热点问题之一。分析了星地融合网络频谱共享时存在的典型干扰类型, 并对星地频谱共享场景中系统间干扰进行了仿真。介绍了星地频谱共享需要进一步研究的关键技术, 并总结了星地融合网络频谱共享面临的挑战。

**关键词:** 6G; 星地融合网络; 频谱共享; 同频干扰

**Abstract:** Satellite network has been widely recognized as an indispensable part of the next-generation mobile communication system, which together with the existing terrestrial cellular network can provide ubiquitous and wideband access service for massive users worldwide by taking the advantages of each to form satellite-terrestrial integrated network. How to efficiently share the limited spectrum resources between the two networks and mitigate coexistent interference has become one of the current technical difficulties and hot topics. The typical types of interference existing in the spectrum sharing of satellite-terrestrial integrated network are analyzed, and the inter-system interference is simulated. The potential key technologies for spectrum sharing in the satellite-terrestrial integrated network are analyzed, and the challenges of spectrum sharing in the satellite-terrestrial integrated network are summarized.

**Keywords:** 6G; satellite-terrestrial integrated network; spectrum sharing; co-channel interference

**引用格式:** 瞿重希, 毛浩斌, 许懂, 等. 面向 6G 的星地融合网络频谱共享技术 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 50-56. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404008

**Citation:** QU C X, MAO H B, XU C, et al. Spectrum sharing technology for satellite-terrestrial integrated networks towards 6G [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 50-56. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404008

地面蜂窝通信系统经过了几十年的商业化发展与部署, 已经基本满足人口密集地区的大带宽与低延时的网络接入需求。然而, 全球地面移动通信服务目前只能覆盖约 20% 的陆地面积、约 6% 的地球表面积。在灾害应急情况下, 地面网络易瘫痪且难以维护, 尚未满足用户对网络覆盖广度和深度的要求。相比于地面蜂窝网络, 卫星网络不受地形与地域的限制, 容灾性强, 可以满足海量异构天基、空基、陆基、海基用户的全时信息传输需求, 已经被公认为是第 6 代 (6G) 移动通信系统的关键组成部分。然而, 卫星网络和地面蜂窝网络长期以来处于独立运作的状态。为了满足未来全时全域立体空间人-机-物随遇接入与智能

连接需求, 卫星网络与地面蜂窝网络已经进入融合式发展的新阶段, 即卫星网络作为地面蜂窝网络的有效补充和延伸, 共同为用户提供连续稳定的宽带连接服务<sup>[1]</sup>。

星地融合呈现出从以前的业务融合到现在的体制融合, 进一步到未来的系统融合的发展趋势<sup>[2]</sup>。当前阶段, 为了解频谱资源愈发匮乏与用户多样化业务需求迅速增长之间的矛盾, 不同于以往卫星网络与地面蜂窝网络采用频率硬性分割使用的方式, 卫星通信系统与地面蜂窝网络协同复用频率资源已经成为一种潜在的解决方法。例如, 在 2017 年 1 月, 美国联邦通信委员会 (FCC) 就允许在已经用于固定卫星服务的 12.2 ~ 12.7 GHz 频段内进行 5G 运营征求意见

见<sup>[3]</sup>。此外,美国T-Mobile与SpaceX在2022年8月也宣布计划利用T-Mobile的频谱由SpaceX提供农村地区的移动服务,这项合作旨在解决频谱稀缺问题,并扩展覆盖范围。

然而,星地频谱共享必然带来复杂的同频干扰,这限制了网络的频谱利用效率,也成为星地融合网络所面临的重要挑战之一。为此,本文首先讨论了面向6G的星地融合网络中存在的典型的干扰类型,对星地下行系统间的干扰强度进行仿真评估,并基于前述分析与仿真结果,给出了星地融合网络中有前景的频谱共享关键技术,最后结合当前技术发展现状,分析了星地融合网络频谱共享面临的挑战及未来的研究方向。

## 1 星地融合网络频谱共享干扰分析

在星地融合网络频谱共享场景中不可避免地会存在同频干扰<sup>[4]</sup>,这对星地融合网络的通信性能造成严重影响。因此,需要对星地融合网络频谱共享时存在的同频干扰类型进行分析,从而可以精准设计干扰管理方案,最大化星地融合网络频谱共享系统效益。

### 1.1 波束间干扰

卫星通信系统通常产生多个点波束覆盖地面区域,通过在不同的波束之间复用相同的频谱,从而提高频谱利用效率和系统的吞吐量。然而在实际应用中,无法产生与其他波束完全空间隔离的理想点波束,因此会产生波束间干扰(IBE),特别是位于两个波束边缘的用户会受到严重的同频干扰。

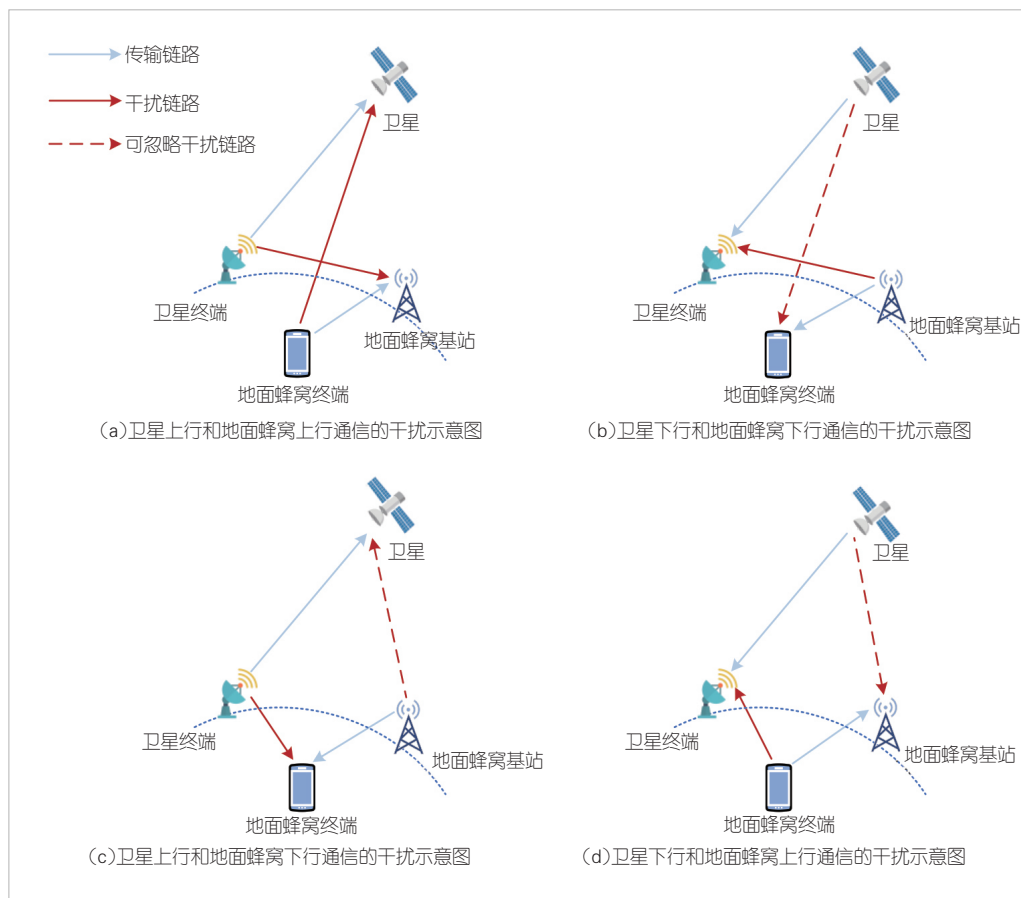
### 1.2 波束内干扰

在未来移动通信场景中,潜在的地面用户数量将远远大于波束数量。而且,在卫星通信系统中,在每个波束覆盖范围内同一时间内都有大量用户需要接入网络。若采用传统正交多址方式进行接入,波束内的用户虽然不存在同频干扰,但传

统正交多址方式的时频资源有限,难以满足大量用户的接入需求。新型多址接入技术,如非正交多址接入(NOMA)、速率分割多址接入(RSMA)等,可以有效缓解这一问题,但又不可避免地引入了同波束内的用户间同频干扰(IUI)。

### 1.3 系统间干扰

星地融合网络频谱共享系统由卫星、卫星终端、地面蜂窝基站以及地面蜂窝终端组成。由于卫星网络和地面蜂窝网络应用相同频段为地面终端提供接入服务,因此会产生系统间干扰(ISI)。对于地面蜂窝基站,其天线通常具有向下倾角,发射信号的仰角通常较小、且在近似水平的平面上传播,因此,地面蜂窝基站对卫星的干扰很小,可以忽略;对于卫星,其位置距离地面蜂窝基站和地面蜂窝终端较远,因此,卫星对地面蜂窝基站和地面蜂窝终端的干扰很小,可以忽略。在此条件下,根据卫星网络和地面蜂窝网络上下行传输情形,系统间干扰存在4种情况,如图1所示。



▲图1 星地融合网络频谱共享系统间干扰典型情况示意图

1) 当卫星网络上行链路和地面蜂窝网络上行链路应用相同频段时,地面蜂窝终端会对卫星产生干扰,同时卫星终端也会对地面蜂窝基站产生干扰。当卫星波束覆盖范围大,地面蜂窝基站终端数量多时,大量地面蜂窝基站终端对卫星会引起聚合干扰。卫星终端若采用全向天线,会对地面蜂窝基站产生同频干扰;卫星终端若采用定向天线,其波束指向性高,而地面蜂窝基站波束指向通常具有向下倾角,则卫星终端的波束旁瓣会对地面蜂窝基站造成同频干扰。

2) 当卫星网络下行链路和地面蜂窝网络下行链路应用相同频段时,地面蜂窝基站会对卫星终端产生干扰。由于地面蜂窝基站的波束指向性较高,当卫星终端配置定向天线时,若其波束主瓣正好指向地面蜂窝基站的波束,则会产生严重的同频干扰;否则,地面蜂窝基站对卫星终端造成旁瓣干扰。当卫星终端配置全向天线时,也会造成同频干扰。

3) 当卫星网络上行链路和地面蜂窝网络下行链路应用相同频段时,卫星终端会对地面蜂窝基站终端产生干扰。当卫星终端采用全向天线时,对地面蜂窝终端产生的干扰一般较低,但当卫星终端的数量多时会造成聚合干扰;当卫星终端采用定向天线时,其波束指向性较高,其波束旁瓣会对地面蜂窝终端造成同频干扰。

4) 当卫星网络下行链路和地面蜂窝网络上行链路应用相同频段时,地面蜂窝基站终端会对卫星终端产生干扰。地面蜂窝终端一般采用全向天线,对卫星终端的波束旁瓣干扰较低,但当地面基站终端数量较多时会造成聚合干扰。

网络组成。其中,卫星网络由一颗多波束低轨卫星和卫星终端组成,地面蜂窝网络由卫星波束覆盖范围内的地面蜂窝基站和地面蜂窝终端组成。假设卫星网络和地面蜂窝网络都采用频分双工(FDD)模式,当卫星网络和地面蜂窝网络使用相同频段进行通信时,根据传输模式的不同可以分为同向模式和反向模式<sup>[5]</sup>。同向模式指卫星网络与地面蜂窝网络的上行链路和下行链路分别使用同一频段,而反向模式指卫星网络的上(下)行链路与地面蜂窝网络系统的下(上)行链路使用同一频段,如图2所示。

## 2.2 仿真结果与分析

由于合理设计跳变图样可以实现波束间地理空间隔离<sup>[6]</sup>,故在本文仿真中忽略波束间干扰。仿真中,设置载波频率为2 GHz,带宽为1.6 MHz。地面蜂窝基站的部署密度为0.1 BS/km<sup>2</sup>,每个地面蜂窝基站由3个扇区组成,每个扇区装配下倾角为7°的天线,采用TR 38.863中的天线模型。设置低轨卫星高度为600 km,采用TR 38.863 6.2.3.1节中的天线模型,其3 dB角设置为4.4°。地面蜂窝终端和卫星终端采用增益为0 dB的全向天线。地面蜂窝基站、卫星和终端的发射功率分别为26 dBm/MHz、53 dBm和23 dBm<sup>[7]</sup>。

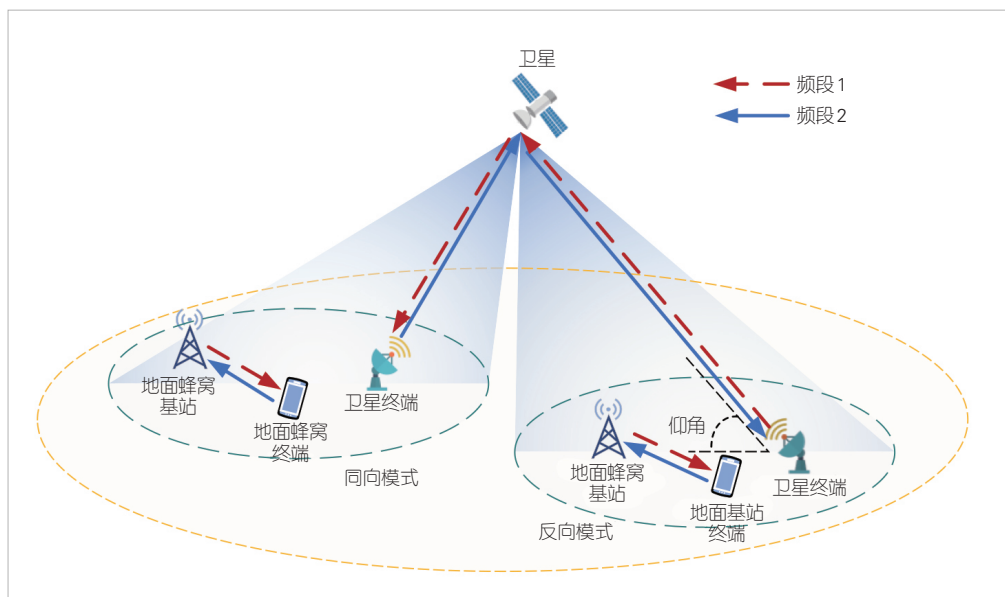
图3、图4分别显示了当地面蜂窝基站和地面蜂窝终端所接收的有用信号的功率为-85 dBm时,卫星网络对地面蜂窝基站和地面蜂窝终端的干扰情况。从图3可以看出,即使在干扰最强的地方,地面蜂窝终端接收信号的信干噪比也可以保证在-10 dB以上,满足5G新无线技术设备的最低要求<sup>[5]</sup>,也即卫星对地面蜂窝终端的干扰程度较小,可以

## 2 星地融合网络频谱共享系统间干扰仿真分析

星地融合网络频谱共享场景中系统间干扰对通信质量造成严重影响,降低了系统资源利用效率。为了提出有效的干扰抑制方案,本节通过仿真评估系统间干扰对地面蜂窝网络和卫星网络信干噪比的影响程度,并分析其原因。

### 2.1 仿真场景

星地融合网络频谱共享场景由卫星网络和地面蜂窝



▲图2 星地融合网络频分双工(FDD)模式下频谱共享场景



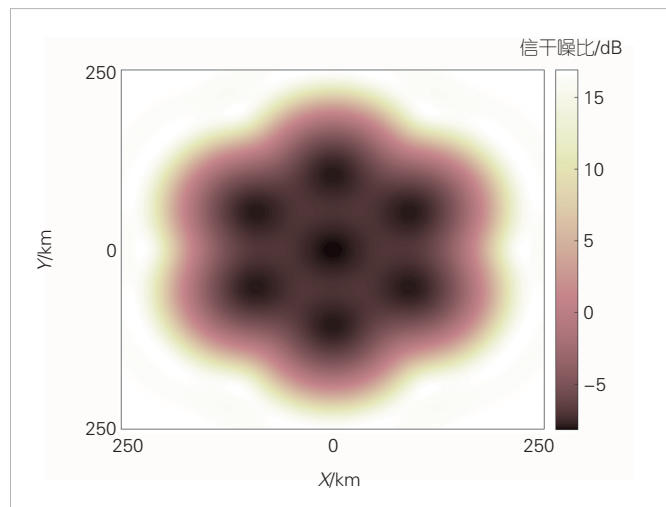
忽略。从图4可以看出，地面蜂窝基站接收信号的信干噪比都在15 dB以上，有卫星覆盖区域和无卫星覆盖区域的信干噪比相差不大，这是由地面蜂窝基站天线的下倾角所导致的。说明卫星对地面蜂窝基站的干扰程度很小，也可以忽略。这与1.3节的干扰分析一致。

图5、图6分别显示了在卫星网络上、下行链路中，在同向模式、反向模式以及无频谱共享场景下，随卫星终端与卫星间仰角变化平均信干噪比的变化情况。可以看出，随着卫星终端与卫星间仰角的增大，卫星网络上、下行链路的平均信干噪比都会增加。这主要是由于随着仰角的增加，卫星与卫星终端间的链路衰减会减小。

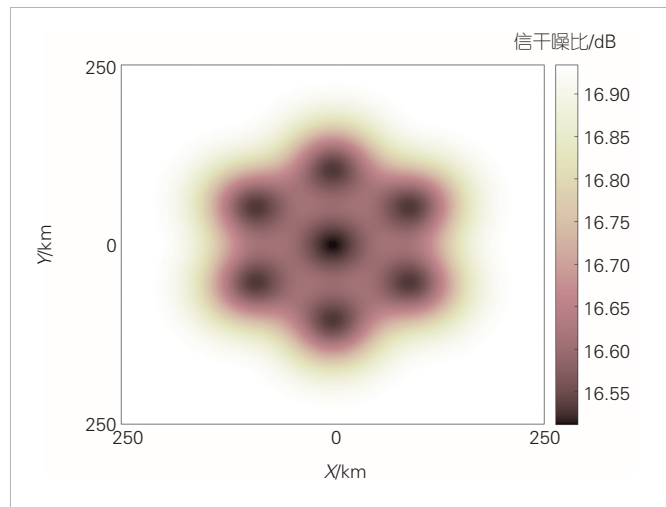
对于卫星网络上行链路而言，在同向模式中地面蜂窝终端干扰卫星，在反向模式中地面蜂窝基站干扰卫星。从图5中可以看出，无论同向模式还是反向模式，频谱共享

都导致卫星网络上行链路信干噪比出现显著下降。其中，反向模式的信干噪比比同向模式高8 dB，可以在一定程度上抑制干扰。这是由于地面蜂窝基站天线存在下倾角，天线波束在卫星方向的增益很小；而地面蜂窝终端采用全向天线，且发射功率与卫星终端相当，聚合干扰会严重影响卫星网络上行链路的信干噪比。因此，在星地融合网络频谱共享场景中，对于卫星网络上行链路而言，干扰抑制是必不可少的。

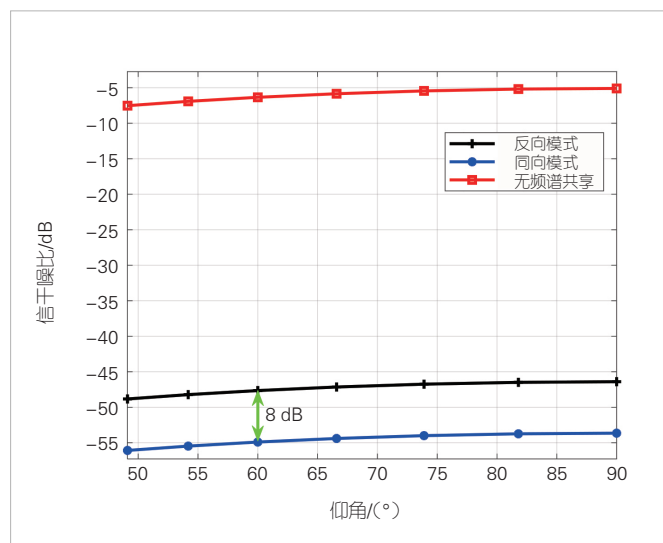
对于卫星网络下行链路而言，在同向模式中地面蜂窝基站干扰卫星终端，在反向模式中地面蜂窝终端干扰卫星终端。从图6中可以看出，在卫星网络下行场景中，反向模式的信干噪比略高于同向模式，但差别不大。这是由于



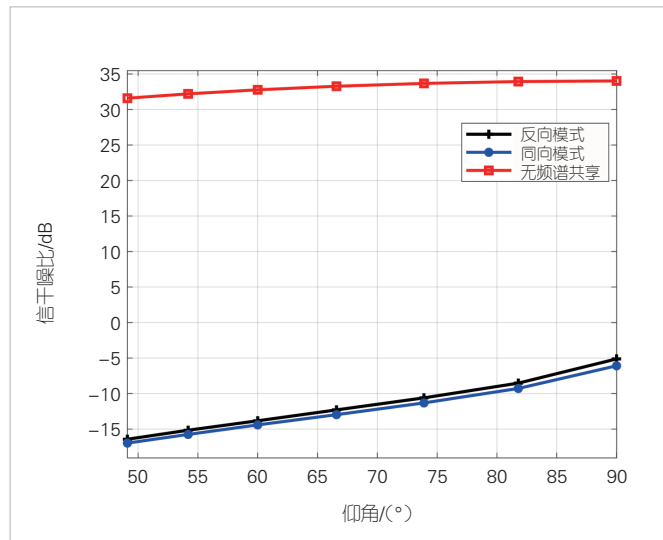
▲图3 地面蜂窝终端接收信号信干噪比



▲图4 地面蜂窝基站接收信号信干噪比



▲图5 卫星网络上行链路受干扰情况



▲图6 卫星网络下行链路受干扰情况

地面蜂窝基站发射功率大，但采用定向天线；地面基站蜂窝终端发射功率小，但采用全向天线且数量众多，故其带来的干扰程度相近。图6中频谱共享导致卫星网络下行链路信干噪比明显下降，但对于卫星网络下行场景而言，卫星终端通常位于地面蜂窝网络未覆盖或信号较差的地方，其与地面蜂窝网络存在物理空间隔离，故卫星网络下行链路在实际应用中受地面蜂窝网络干扰较小。

### 3 6G星地融合网络频谱共享关键技术

为了有效抑制星地融合网络频谱共享产生的同频干扰，提升频谱利用效率，本节介绍几种潜在的星地融合网络频谱共享关键技术，为星地融合网络频谱共享的实际应用提供参考。

#### 3.1 星地协同按需资源分配

在星地融合网络中，不同物理节点（如卫星、地面蜂窝基站等）的功率、频率、时间、存储、计算等多维资源联合按需调度可以提升网络频谱利用效率<sup>[8]</sup>。然而，随着卫星星座规模的持续性快速增长，星间波束交叠变化复杂，星地重叠覆盖区域增大，用户间潜在通信干扰增强。并且，不同物理节点的资源特性不同，资源分布分散且不均衡，多维资源间相互作用与耦合性较强。此外，非均匀分布用户的动态海量多样化业务对通信资源调度的要求越来越高。因此，需要不同物理节点间协同进行多维资源规划，以实现星地融合网络资源整体优化与高效利用，从而可以灵活响应用户各类服务请求，提升星地融合网络按需服务保障能力。

多层多域物理节点的多维资源可用特性是星地协同资源分配的前提，需要对多维资源类型、分布情况及使用情况等进行统一感知与表征。从而，考虑星地融合网络具有时空尺度差异大、信号传播环境动态变化等特性，从满足陆海空天各域用户的动态多元化业务需求出发，建模星地网络包括功率、频率、卫星波束跳变图案等在内的多维资源按需分配优化问题。而通常情况下，此类问题具有多目标、多约束以及多变量特性，传统数学优化求解方案难以适用。虽然诸如强化学习、图神经网络等人工智能算法在此方面具有优势，但是由于卫星等非地面节点受到平台体积、功耗等约束，可用计算资源严重受限，需要构建适用于星地协同处理的算力平台，从而可以实现系统多维资源统一高效管理方案的快速生成与执行，进一步满足异构节点多维资源与海量用户多样需求间的动态适配性要求。

#### 3.2 星地联合波束赋形

由于星地无线信号传输距离远，信号传播环境复杂，星地间信号传输路径损耗高，星地融合网络频谱效率低，难以满足未来更加多样化的用户通信服务需求。在星上使用阵列天线技术有助于解决这一问题，大规模的阵列天线可以通过在发射端配备数百个天线以获得显著的波束增益。当前，星载阵列天线技术也得到了业界的广泛关注<sup>[9]</sup>。此外，相比于阵列天线，新兴的可移动天线技术<sup>[10]</sup>通过机械结构带动天线在空间内移动、旋转，最多可获得六维的空间自由度，通过将联合优化天线位置和波束赋形向量，可以实现更加灵活的波束赋形，有效抑制功率泄露，降低干扰。然而，星地融合网络中终端位置、业务需求、可用资源处于高度动态变化状态，需要实现星地联合波束赋形，协同控制卫星和地面蜂窝基站的的天线阵列，以提高信号覆盖质量，降低同频干扰强度。

地面蜂窝网络的波束赋形技术通过控制天线波束指向目标终端方向，以提供高速、低延迟的通信服务；卫星则通过灵活波束赋形实现波束按需跳变，保证地面按需覆盖。两者需要通过联合波束赋形在实现热点地区保证覆盖的同时，有效降低两系统间的同频干扰，大幅提升资源利用效率。然而，波束赋形权重的优化通常与时、频、功率等资源的分配高度耦合，这会导致建模问题具有高度非凸性，难以直接采用传统数学优化方法求解，而低复杂度的高效深度学习算法解决此类问题具有优势。在实际应用中，还需要构建星地全局信息共享机制，搭建星地联合波束赋形控制平台，以充分发挥星地联合波束赋形的优势，提升系统吞吐量。

#### 3.3 智能频谱态势感知与利用

基于频谱态势感知结果进行星地融合网络空闲频谱资源利用，是缓解可用频谱短缺问题的有效途径之一<sup>[11]</sup>。然而，一方面，星地融合网络异构终端节点数量多，分布范围分散，海量感知数据不可避免地会增加星地传输链路负担，且在传输过程中不可避免地发生数据错误；另一方面，星地传输链路信道变化速度快、信号传播时空尺度差异大，频谱感知结果滞后性强。因此，如何充分利用海量感知数据提升频谱态势感知准确度，如何基于当前频谱态势感知结果提前获知未来频谱占用状态，如何基于感知与预测结果实现频谱资源高效利用是亟待解决的难题。

为了保证卫星网络不对现有地面蜂窝网络造成严重干扰，卫星网络需要充分利用节点局部感知数据从空间、时间等多维度进行频谱态势感知，有效利用多节点空间分布

差异性特征,设计联合异常数据修正与分布式协作感知算法,实现低开销、高精度的频谱态势感知。从而可以基于当前态势感知结果,利用长短期记忆神经网络预测当前区域未来频谱占用状态,有效克服星地传输时延大导致频谱感知结果滞后的问题。进一步地,可以基于星地重叠覆盖区域内的频谱态势感知结果,设计卫星终端实时接入地面蜂窝网络空闲频谱的强化学习算法,通过集中式训练与分布式执行,实现频谱资源高效利用,最大程度抑制卫星网络对地面蜂窝网络造成的同频干扰,实现星地融合网络系统效益最大化。

### 3.4 新型多址接入技术

随着工业物联网、低空智联网、远程医疗等各种新兴应用的快速发展,全球范围内的终端连接数量日益增长。而传统移动通信系统采用的正交多址接入方案的资源池有限,系统容量较低,难以支撑6G海量终端设备的接入需求。新型多址接入技术利用非正交性的思想,如NOMA、RSMA等,基于先进的信号处理技术,通过支持多个终端设备同时同频同空域传输,可以有效提升系统的频谱效率。然而,准确的信道状态信息对于新型多址接入技术接收端的正确解码至关重要。并且,星地融合网络中显著增加的终端设备数量、超大规模阵列天线,以及高速动态的网络节点,都使得信道状态的准确估计更具挑战性。同时,串行干扰消除等技术也相应地提高了接收机的复杂度。此外,新型多址接入技术在星地融合网络中的应用通常也与多维资源优化高度相关。

深度学习已经被证明在信道估计方面有较好的性能,然而在星地融合网络场景中,信道状态具有高度变化和难以预测特性,需要借鉴迁移学习等鲁棒人工智能方法,实现训练模型在实际通信场景下的通用化应用能力。同时为了降低终端设备的硬件复杂度,需要设计高能效的串行干扰消除算法,实现新型多址接入技术的快速落地与应用。并且,空时频功率等多域资源的高效调度也影响着新型多址接入技术优势的充分发挥。然而,两者的联合设计具有极高挑战性,需要精准建模表征两者相互影响机理,探索非完美信道状态下高效优化求解算法,从而可以充分发挥新型多址接入技术的潜力,实现星地融合网络频谱高效共享。

### 4 6G星地融合网络频谱共享面临的挑战

面向6G的星地融合网络频谱共享的实际应用在星地融合网络架构、星地协同资源管控协议,以及星地融合网络

时频同步等方面还面临着诸多挑战。这些挑战严重制约着星地融合网络频谱共享系统的发展和性能。

首先,卫星网络与地面蜂窝网络当前还处于独立组网的状态,而未来的星地融合网络需要两者深度耦合,协同为地面用户提供高速无缝服务,这就亟需兼容不同组网方式的星地协同组网架构设计,实现两网的智能统一管控与运作<sup>[12]</sup>。然而,卫星系统的体积、发射功率等指标在技术设计时均已确定,卫星载荷和星上可用资源严重受限,无法冗余部署完备的通信网元功能。如何在星上部署轻量化的虚拟化资源,提高不同/异构节点上资源的通用性,实现星上功能的重构?如何对网元功能进行裁剪和细粒度分割,并根据组网形态、业务需求、网络资源情况和节点处理能力,在卫星和地面节点之间柔性分割并合理部署网元功能?这些都是重要挑战。

其次,在星地融合网络中,卫星网络和地面蜂窝网络的覆盖范围、服务能力和通信计算资源具有显著的差异性。而卫星网络与地面蜂窝网络的覆盖性能和节点多维资源之间又相互耦合,需要组建全局统一调度的资源配置协议,实现星地网络多网多域资源联合协调与优化,提升星地融合网络的资源利用率与服务效率。

最后,在星地融合网络中,时频同步是终端成功接入地面蜂窝基站与卫星的关键一步<sup>[13]</sup>。用户终端需要通过检测地面蜂窝基站下发的下行同步信号来进行下行时频同步。根据下行同步信号的时频位置,用户终端可以进一步地接收蜂窝基站下发的系统消息。然而,对于卫星网络,卫星与地面终端的距离较大,卫星的移动速度较快,这给地面用户终端带来了远超地面蜂窝系统的传输时延和频偏。而地面蜂窝系统现有的同步方案无法直接适用于高动态的星地融合网络场景同步需求。对于下行同步来说,用户终端需要在可能的时频位置上搜索参考信号。当时频偏移范围过大时,需要搜索的位置过多,会导致用户终端计算复杂度过大。对于上行同步来说,时频偏移远超传统随机接入前导序列能容忍的范围,这使得上行同步无法完成。因此,需要考虑基于星历信息等预测手段,实现多普勒频偏估计和星地时延补偿,完成精准星地时频同步。

### 5 结束语

星地融合网络是未来通信系统特别是当前手机直连卫星背景下的重要发展方向。星地两网通过频谱共享缓解优质频谱资源短缺问题也是当前业界关注的热点之一。本文对星地融合网络频谱共享存在的典型干扰类型进行了分析,并对星地频谱共享系统间干扰进行了仿真,在此基础上,



介绍了支撑星地融合网络频谱共享的关键技术，并分析其面临的挑战，为未来星地融合网络频谱共享提供参考与借鉴。

#### 参考文献

- [1] 程锦霞, 邓伟, 翁玮文, 等. 面向 6G 的天地一体无线网络技术研究 [J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 788–794. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3114.2023.05.002
- [2] 徐晖, 缪德山, 康绍莉, 等. 面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术 [J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 1–10. DOI: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200201
- [3] FCC. Expanding flexible use of the 12.2–12.7 GHz band [EB/OL]. (2021–06–22) [2024–06–10]. <https://www.federalregister.gov/documents/2021/06/22/2021-12947/expanding-flexible-use-of-the-122-127-ghz-band>
- [4] PENG D Y, HE D X, LI Y, et al. Integrating terrestrial and satellite multibeam systems toward 6G: techniques and challenges for interference mitigation [J]. IEEE wireless communications, 2022, 29(1): 24–31. DOI: 10.1109/MWC.002.00293
- [5] LEE H W, MEDLES A, CHEN C C, et al. Feasibility and opportunities of terrestrial network and non-terrestrial network spectrum sharing [J]. IEEE wireless communications, 2023, 30(6): 36–42. DOI: 10.1109/MWC.001.2300209
- [6] GUO Q, CUI G F, HE M M, et al. Multi-dimensional resource allocation strategy for LEO multi-satellite beam hopping systems [C]//Proceedings of 9th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2023: 301–305. DOI: 10.1109/ICCC59590.2023.10507281
- [7] LEE H W, CHEN C C, LIAO C I S, et al. Interference mitigation for reverse spectrum sharing in B5G/6G satellite-terrestrial networks [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2024, 73(3): 4247–4263. DOI: 10.1109/TVT.2023.3328599
- [8] 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G 星地融合移动通信关键技术 [J]. 中国科学:信息科学, 2024, 54(5): 1177–1214
- [9] 焦凌霄, 李文静, 董建飞, 等. 面向手机直连的星载相控阵: 关键技术与未来展望 [J]. 电信科学, 2024, 40(4): 30–42. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024096
- [10] SHAO X D, JIANG Q J, ZHANG R. 6D movable antenna based on user distribution: modeling and optimization [EB/OL]. (2024–03–12)[2024–06–10]. <http://arxiv.org/abs/2403.08123>
- [11] 杨宁, 郭道省. 星地融合网络中基于三维频谱感知的空时频谱机会检测 [J]. 天地一体化信息网络, 2022(4): 67–74
- [12] 邓伟, 赵琳, 翁玮文, 等. 面向星地协同的接入网架构与关键技术 [J]. 天地一体化信息网络, 2023(3): 12–22
- [13] 周文慧. 面向新一代低轨卫星的时频同步设计及同步算法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2024

#### 作者简介



**瞿重希**, 北京航空航天大学在读硕士研究生; 主要研究领域为星地融合网络干扰分析及干扰缓解技术。



**毛浩斌**, 北京航空航天大学在读博士研究生; 主要研究领域为空天安全通信与网络资源调度技术。



**许懂**, 北京航空航天大学在读博士研究生; 主要研究领域为卫星通信网络、卫星随机接入和信道编码。



**张远钧**, 北京航空航天大学硕士研究生; 主要研究领域为卫星波束赋形抗干扰技术。



**肖振宇**, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授、爱思唯尔中国高被引学者; 研究方向包括天地一体化、无人集群网络、空天阵列通信等; 曾获国家技术发明奖二等奖、中国电子学会自然科学奖一等奖、中国出版政府奖等多项国家级、省部级科研教学奖励; 已发表论文 150 余篇。

# 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



## A Real-World Data-Based Network Coverage Prediction and Optimization for Integrated Sensing and Communications

李昕昊/LI Xinhao<sup>1,2</sup>, 韩凯峰/HAN Kaifeng<sup>3</sup>,  
朱光旭/ZHU Guangxu<sup>1,2</sup>

(1. 香港中文大学(深圳), 中国 深圳 518172;

2. 深圳市大数据研究院, 中国 深圳 518172;

3. 中国信息通信研究院, 中国 北京 100083)

(1. Chinese University of Hong Kong, Shenzhen, Shenzhen 518172, China;

2. Shenzhen Institute of Big Data, Shenzhen 518172, China;

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

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404009

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240722.1608.006.html>

网络出版日期: 2024-07-23

收稿日期: 2024-06-12

**摘要:** 传统基于人工经验、试错迭代的低效方法已无法适应未来多功能网络的参数优化。为了提升通信感知一体化 (ISAC) 网络的优化效率以及服务质量, 亟需建立系统级全局网络性能建模与优化新范式。为此, 提出了一种面向6G的ISAC网络覆盖预测与优化框架。该框架利用离线的现实网络数据与多波束信道建模的方法, 实现任意天线参数下的ISAC网络性能预测, 并且利用零阶块坐标下降等数学优化工具求解黑盒优化问题, 实现网络参数的精准寻优。基于所提框架, 我们对现实世界中的空地协同ISAC网络进行了系统级性能仿真, 并对低空用户进行感知性能优化, 对地面用户进行通信性能优化。基于真实网络数据的实验结果表明, 所提方法在性能上显著超越了传统的建模与优化方法。

**关键词:** 网络智能优化技术; 通信感知一体化; 本地化信道估计; 覆盖预测; 零阶优化; 低空经济

**Abstract:** The conventional network optimization methods, based on manual experience and trial-and-error iterations are no longer suitable for parameter optimization of future multifunctional networks. To enhance the optimization efficiency and service quality of integrated sensing and communication (ISAC) networks, there is an urgent need to establish a new paradigm for system-level network performance modeling and optimization. To this end, a 6G-oriented ISAC network coverage prediction and optimization framework is proposed. This framework utilizes offline real network data and multi-beam channel modeling methods to predict ISAC network performance under various parameters and employs advanced mathematical optimization tools such as zero-order block coordinate descent to solve black-box optimization problems, achieving precise network parameter optimization. Based on the proposed framework, we conducted system-level performance simulations for real-world aerial-ground cooperative ISAC networks, optimizing sensing performance for low-altitude users and communication performance for ground users. Experimental results demonstrate that our method significantly outperforms traditional modeling and optimization methods.

**Keywords:** network optimization; integrated sensing and communication (ISAC); localized statistical channel estimation; coverage prediction; zero-order optimization; low-altitude economy

**引用格式:** 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

**Citation:** LI X H, HAN K F, ZHU G X. A real-world data-based network coverage prediction and optimization for integrated sensing and communications [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 57-64. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404009

当蜂窝移动通信技术专注于提供高效、可靠的无线连接服务, 同时为了进一步满足未来网络在环境监测、

智能物联网 (IoT)、车联网 (V2X)、虚拟现实 (VR) 和增强现实 (AR) 等领域的应用, 蜂窝网络的智能化和通信感知一体化 (ISAC) 技术的发展, 为实现此类领域更智能、更自动化的服务提供了可能<sup>[1]</sup>。不只局限于当代蜂窝网络提供的一般用户设备 (UE) 定位功能, 通过对通信和感知的频谱、能源、硬件框架的统一化设计, 通信感知一体化技术

**基金项目:** 第八届中国科协青年人才托举工程项目 (2022QNRC001); 广东省基础与应用基础研究重大项目 (2023B0303000001); 国家自然科学基金面上项目 (62371313); 广东省基础与应用基础研究基金面上项目 (2022A1515010109); 深圳市龙岗区科技创新专项资金项目 (LGKCSPT2023002)

不仅进一步增强了网络对环境的感知能力，还同时赋能通信，获得显著的集成增益<sup>[2]</sup>。

国际电信联盟（ITU）已将ISAC确定为第6代（6G）移动通信网络的六大典型场景之一。这不仅标志着ISAC技术在未来通信发展中的核心地位，而且也意味着ISAC网络的设计与优化成为了推动6G技术创新的关键因素。因此，对ISAC技术的研究和开发，尤其是在网络设计与优化方面的深入探索，对如今6G关键技术的研发愈加重要<sup>[1]</sup>。为了实现更加有效的ISAC网络无线电资源管理和更高质量的ISAC服务，未来支持大规模接入的通信感知一体化网络优化问题将变得更加具有挑战性：一是ISAC网络性能与网络参数之间的关系仍然难以预测，二是巨大的网络参数解空间使得一般的寻优算法效率低下<sup>[3]</sup>。

近年来，许多研究团队通过资源分配、波束赋形、检测策略优化和波形设计来提升ISAC网络性能。Xu等<sup>[4]</sup>在分布式天线网络（DANs）中研究了ISAC的资源分配问题，提出了一个分阶段的方法，以避免干扰并通过协调波束赋形和感知阶段的持续时间来优化能耗。为了减轻ISAC协调蜂窝网络中的自干扰，LIU等<sup>[5]</sup>引入了多基地雷达框架，从而实现更低干扰和更优的发射与接收波束赋形策略，进一步提升了感知精度。ALI和CHAFII<sup>[6]</sup>提出了一种动态传输策略和联合检测方法，以改善大规模网络中的雷达性能，尽管在通信性能上存在一些权衡，但雷达检测质量得到显著提高。LI等<sup>[7]</sup>提出了一种多基站通信感知一体化场景下的波束赋形设计方法，实现无缝的感知覆盖。LIU等<sup>[8]</sup>通过ISAC波形设计研究了高斯信道下感知和通信之间的确定性-随机权衡。总之，虽然在ISAC网络优化方面取得了进展，但在实际应用中实现高精度预测和高效优化仍然面临诸多挑战。

第5代（5G）无线通信的物理层设计支持用户设备进行基于多波束的参考信号接收功率（RSRP）测量报告，为现实世界的网络优化和建模提供了更好的技术基础，同时也使得传统驾驶测试（DT）<sup>[9]</sup>在一次测试中能够收集更高维度的空间信息，提高了DT效率。但是在网络参数调节时，传统驾驶测试仍只能评估在测量过程中运行的配置。在实际工程中，网络专家通常需要根据工程经验尝试多种配置，并对每种配置进行DT，这样的方法得到的解很可能是次优的。为了解决现实网络优化问题，LUO等<sup>[3]</sup>提出了通信网络的模拟现实框架（SRCON），通过整合白盒模型与机器学习技术，实现用于现实世界网络的精确有效的离线模拟和优化。SRCON通过统计孪生信道建模的方法，大幅减少了大规模DT的需求，使得从大规模网络参数解空间中获得最优网络配置成为可能。然而，现有的通信网络的模拟现实框架主要

面向5G通信网络优化场景，因此需要一个能够精确预测通信感知一体化网络行为的框架，以适应6G网络中通信与感知的高度融合。

面向现实世界通信感知一体化网络优化的方法一般面临两大挑战。一方面，为了在实际通信网络中部署，需要一种快速且准确的系统级网络仿真方法，以便能够建模实际网络中的无线通信与感知的传播环境，并高效利用现有DT数据。另一方面，这种基于系统级仿真的优化问题往往被构造成一个黑盒优化问题，且求解复杂，没有收敛保障，并容易陷入次优解。为了实现解决此类高维非凸的大规模ISAC网络性能优化问题，需要一种高效的ISAC性能优化方法。

系统级网络仿真方法一般分为基于统计模型和基于确定性模型两类方法。统计模型在特定环境仿真和性能优化方面的局限性，限制了此类方法在精确模拟现实世界网络环境方面的应用。此外，基于射线追踪的确定性建模方法，尽管在模拟精度上具有优势，但由于高精度地图和配置参数获取的难度以及计算成本问题，面临计算复杂度过高的难题。为了解决上述两方面的问题，对现实世界无线网络行为进行高效、准确的仿真，基于无线网络孪生的系统级网络仿真方法<sup>[10]</sup>被提出。这个方法关注从真实无线网络中构建统计孪生网络，不止局限于固定的简化场景，利用多波束信息充分探测无线信道环境，利用有效的稀疏优化方法恢复信道角度功率谱（APS），为大规模ISAC网络优化奠定了网络信道环境建模基础。

在面向现实世界的ISAC网络优化中，除了快速准确应对系统级网络仿真的挑战外，另一个关键挑战在于如何从庞大的参数解空间中高效地找出最优的ISAC网络参数组合，尤其是考虑到低空网络与地面网络的协同部署时，这一问题将变得更加复杂。低空网络和地面网络通常会在同一地点部署。地面网络由于建筑物的阻挡，需要密集部署基站以确保覆盖，其基站参数组合的可能性可能高达数十亿级，即便各参数仅限定于有限的离散取值。而低空网络因受阻挡较少，可以稀疏部署基站。然而，由于这两种网络在覆盖区域上存在重叠，因此需要进行协调以减少相互干扰<sup>[11]</sup>，这使得ISAC网络优化更具挑战。此外，当低空网络与地面网络同频部署时，基站信号主要覆盖地面，这会限制空域的覆盖范围，并导致空地用户的信号干扰增加，从而加大了网络优化的难度。

此外，网络优化的目标函数通常呈现不连续性，甚至缺少明确的数学表达，这进一步增加了性能评估的复杂性和耗时程度，导致传统的基于梯度的优化技术在此情境下不再适用。一些基于随机梯度下降（SGD）和零阶（ZO）优化的



方法被提出<sup>[12-14]</sup>用于优化网络覆盖率。然而, 这些方法仍存在挑战: 一方面, 因为使用了近似的优化目标<sup>[13]</sup>使得问题难以捕捉真实网络的特性; 另一方面, 基于系统级仿真的优化方法<sup>[12,14]</sup>往往难以高效, 且缺乏有保证的收敛性。这些问题使得现有方法难以应用于大规模 ISAC 网络的优化。

综上所述, 现有 ISAC 网络优化框架尚存两大挑战: 一是基于统计模型或射线追踪的系统级网络仿真方法, 在确保真实网络仿真精度与降低计算复杂度之间难以兼顾; 二是基于近似优化目标的方法和基于系统级仿真的优化策略, 在精确捕捉空-地 ISAC 协同网络特性与确保优化过程高效收敛之间难以兼顾。

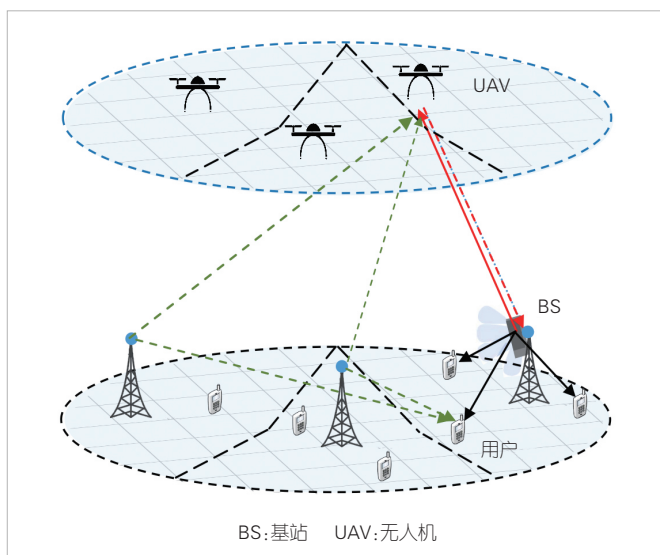
为了实现准确、快速、有效的大规模 ISAC 网络优化, 我们提出一种基于真实数据的通信感知一体化网络建模优化框架。整体框架由 ISAC 系统级网络仿真方法和 ISAC 网络优化方法构成。具体而言, 在系统级网络仿真方法上, 我们提出基于多波束统计信道建模 (MBCM) 的 ISAC 网络覆盖预测方法。首先建立信道角度功率谱与一轮实际 DT 测量到的 RSRP 的统计关系, 接着利用多波束统计信道建模方法估计信道 APS, 然后利用信道 APS 预测不同天线参数配置下的通信信干噪比 (SINR) 和感知信干噪比, 最后根据通信和感知 SINR 计算 ISAC 覆盖率。尽管现实网络中基站参数与用户侧 ISAC 性能的关系难以捕捉, 本文所提的系统级网络仿真方法通过多波束统计信道建模, 建立网络参数到 ISAC 覆盖率的映射。在特定 ISAC 网络场景下, 估计到的大尺度信道统计信息与真实网络有统计一致性, 确保了所提方法对 ISAC 网络性能的准确评估。在估计信道 APS 时使用的稀疏恢复算法, 因为较低的计算复杂度也使得所提方法可以对 ISAC 覆盖率执行相对快速的预测。在 ISAC 网络优化方法方面, 基于我们使用的系统级 ISAC 网络仿真方法, ISAC 网络覆盖问题被构造为一个优化网络参数以最大化 ISAC 网络覆盖率的黑盒优化问题。尽管这个问题缺乏导数信息, 优化变量维度高且非凸, 本文提出的零阶块坐标下降 (ZOBCD) 的黑盒优化方法仍然可以执行快速有效的优化策略, 找到最优的网络参数配置。该方法基于块坐标下降的方法加速求解速度, 并利用布伦特法 (Brent)<sup>[15]</sup>使每个维度的搜索都有质量保证, 同时减少了计算量。基于所提框架, 我们对现实世界中的空地协同 ISAC 网络进行了覆盖预测与优化, 对低空用户和地面用户进行系统级通信与感知性能仿真和 ISAC 覆盖预测, 并对低空无人机用户的感知与通信覆盖率, 以及地面用户的通信覆盖率进行优化。基于现实网络数据的实验结果验证了所提方案的有效性。与基准优化方案相比, 所提方案使得 ISAC 网络的整体通信-感知覆盖能力显著提升。

## 1 系统模型

现实世界通信感知一体化网络的基站、用户、感知目标拓扑复杂, 信道环境复杂, 空地协同的感知与通信覆盖困难。在本工作中, 考虑一种空地协同的 ISAC 融合网络。如图 1 所示, 单站并置 ISAC 基站 (BS) 被部署在网络中, 与低空用户和地面用户进行下行通信, 同时感知低空目标。基站配置  $N = N_x \times N_y$  个发射天线的均匀平面阵列 (UPA) 用于参考信号发送, 并使用  $N$  个天线进行感知回波接收。用户均配备单天线接收设备, 每个用户可能同时接收到来自多个基站的信号, 低空中目标采用非合作方式被感知。低空中和地面区域均被划分成若干栅格, 每个栅格具有相同的几何形状和面积。

对于通信模型, 使用  $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N \times M}$  表示预定义的  $M$  个波束的预编码矩阵。该矩阵的项可表示为  $w_m[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} (e^{-j\varphi_n^{(m)}})$ , 其中  $\varphi_n^{(m)}$  表示第  $m$  个波束对应于第  $n$  个天线的相位。 $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{N \times Q}$  表示 UPA 天线导向矩阵, 它的每一列可表示为  $\mathbf{s}(\theta_{N_y}, \varphi_{N_x}) = [1, \dots, e^{-j\psi_x(N_x-1)}, \dots, e^{-j\psi_y(N_y-1)}, \dots, e^{-j(\psi_x(N_x-1) + \psi_y(N_y-1))}]^T / \sqrt{N}$ , 其中  $\psi_x = \frac{2\pi}{\lambda} d_x \sin\theta_{N_y}$ ,  $\psi_y = \frac{2\pi}{\lambda} d_y \cos\theta_{N_y} \sin\varphi_{N_x}$ 。  $Q = N_y \times N_x$  表示天线球坐标系的角度分辨率,  $d_x$  和  $d_y$  表示相邻天线间隔。自由空间中的离开下倾角 (AoD)  $\theta_i (1 \leq i \leq N_y)$  和离开方位角  $\varphi_j (1 \leq j \leq N_x)$  被分别均匀离散为  $N_y$  个下倾角度和  $N_x$  个方位角。

在现实网络中, 可调天线参数  $\Theta$  包括覆盖场景、数字下倾角、机械下倾角和机械方位角等。 $\Theta$  调整的影响可以被



▲图1 通信感知一体化网络

建模为天线系数矩阵关于天线参数的隐函数<sup>[16]</sup>。因为天线机械角度的调整会同时影响控制业务波束和公共波束<sup>[17]</sup>，所以在这个工作中我们关注机械下倾角  $\mathbf{t} = [t_1, \dots, t_k]$ ，和机械方位角  $\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_k]$  的调整，即  $\Theta = (t_1, \dots, t_k, a_1, \dots, a_k)$ 。因为实际系统的限制， $\mathbf{t}$  和  $\mathbf{a}$  有各自的可调范围限制<sup>[14]</sup>。假设天线面板进行机械下倾角和机械方位角调整时只改变导向矩阵  $\mathbf{S}$ 。

首先基于 DT 得到真实 RSRP 测量值，低维 RSRP 测量值和高维信道 APS 向量的统计关系可以被表示为<sup>[16]</sup>：

$$\mathbf{rsrp} = \mathbb{E}[\mathbf{rsrp}(t)] = \left( \left\| \mathbf{W}^H \mathbf{S} \right\|^2 \mathbf{x}_t \right) \in \mathbb{R}^M, \quad (1)$$

其中  $\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^Q$  代表 APS 在  $Q$  个角度分辨率上的期望。基站  $k$  到栅格  $l$  的 RSRP 可以被表示为  $\mathbf{rsrp}_{k,l} = \max_m \mathbf{rsrp}_{k,l}$ 。栅格  $l$  的 SINR 可以被表示为：

$$\text{sinr}_l^c = 10 \log_{10} \left( \frac{10^{\max_k \mathbf{rsrp}_{k,l}/10}}{\sum_k 10^{\mathbf{rsrp}_{k,l}/10} - 10^{\max_k \mathbf{rsrp}_{k,l}/10}} \right). \quad (2)$$

对于雷达模型，假设基站作为单站共置雷达，因此信号到达角 (AoA) 和 AoD 被假设相等，感知目标的响应矩阵  $\mathbf{G}_R \in \mathbb{C}^{N \times N}$  可以表示为：

$$\mathbf{G}_R = \alpha x^2 [\theta_{N_v}, \varphi_{N_h}] s(\theta_{N_v}, \varphi_{N_h}) s^H(\theta_{N_v}, \varphi_{N_h}), \quad (3)$$

其中  $\alpha$  表示雷达散射截面 (RCS)， $x^2 [\theta_{N_v}, \varphi_{N_h}]$  表示估计的回波路损。假设基站和感知目标之间存在视距传输 (LOS) 路径，且具有最大增益的路径方向即为 LOS 方向。因此，BS 接收到的回波信号  $\mathbf{y}_R \in \mathbb{R}^M$  可以表示为：

$$\mathbf{y}_R^H = \mathbf{u}^H \mathbf{G}_R \mathbf{W} + \mathbf{z}_R^H, \quad (4)$$

其中  $\mathbf{z}_R \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_R^2 \mathbf{I}_N)$  是 BS 侧的加性高斯白噪声 (AWGN)。

我们利用接收波束赋形向量  $\mathbf{u} \in \mathbb{C}^N$  来接受想要的回波信号。因此，为了衡量从第  $l$  个目标的反射信号中可以获得的环境信息量，目标在 BS 处的感知 SINR 可以表示为：

$$\text{sinr}_l^s = 10 \log_{10} \left( \frac{\mathbb{E} \left\| \mathbf{u}_l^H \mathbf{G}_{R,l} \mathbf{W}_l \right\|_\infty^2}{\mathbb{E} \{ |\mathbf{z}_R|^2 \}} \right). \quad (5)$$

感知 SINR 可以表示从特定目标反射的信号中提取环境信息的能力，可用于优化传感波形设计<sup>[8]</sup>，还可应用于发射波束赋形设计<sup>[7]</sup>。通信 SINR 和感知 SINR 可被作为 ISAC 网络性能指标。

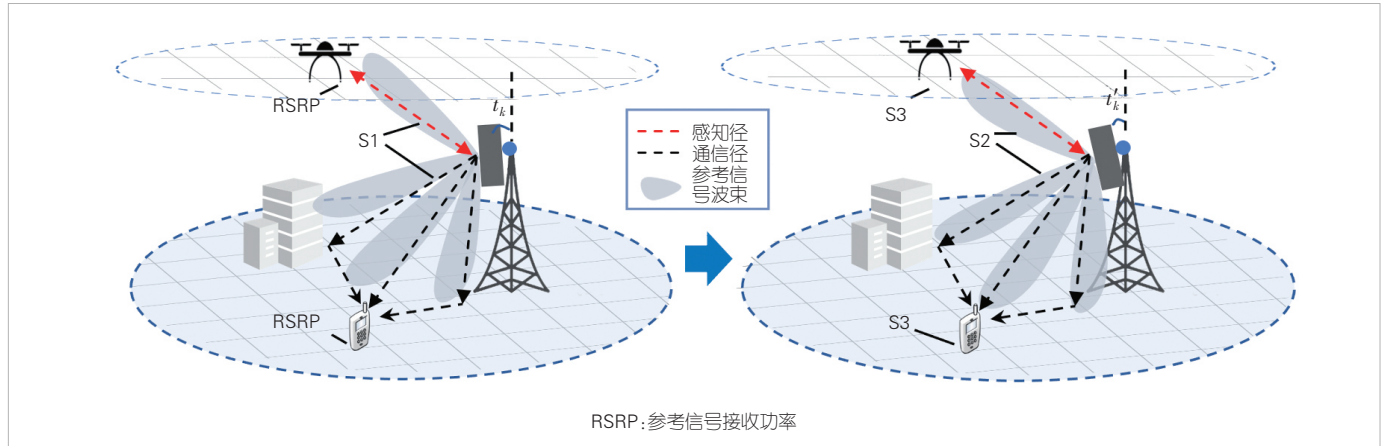
## 2 ISAC 网络覆盖预测

本节中我们提供 ISAC 网络通信和感知 SINR 的预测方法，并定义 ISAC 网络覆盖指标。

现实网络的复杂性使得一般的统计模型，比如一维路损模型，无法对特定环境进行精确仿真，而基于射线追踪的确定性建模方法因为高计算复杂度的限制无法进行高效系统级网络仿真。因此，我们提出一种如图 2 所示的三阶段 ISAC 网络覆盖预测方法，利用多波束信号充分探测无线信道环境，从而提供准确快速的的天线参数调整后的通信和感知 SINR 预测。图 3 具体展示了天线机械下倾角调整后的通信和



▲图2 ISAC网络覆盖预测流程图



▲图3 预测天线调整后的通感信干噪比

感知 SINR 预测方法。首先对低空目标和地面目标进行第一轮 DT, 获得多波束 RSRP 测量值, 以及基站侧包括波束信息和机械参数等在内的信息。在第 1 阶段 (S1), 对天线机械参数变化前后不变的信道和感知径进行估计, 获得径的方向和增益, 经过 S1 的信道 APS 表示为  $\hat{\mathbf{x}}_i$ 。然后, 天线机械参数发生变化 (在图 3 的示例中, 天线机械下倾角加大, 由  $t_k$  调整为  $t'_k$ ), 在第 2 阶段 (S2), 通过更新导向矩阵获得参数变化后的参考信号波束。在第 3 阶段 (S3), 对低空和地面目标重新计算通信和感知 SINR。最后统计所有基站下全部低空和地面栅格信息, 计算 ISAC 网络覆盖率, 完成系统级 ISAC 网络仿真。接下来将详细描述每一阶段方法。

### 1) 第 1 阶段: 不变信道结构估计

这一阶段的目标是根据多波束的通信 RSRP 测量值估计信道 APS 向量  $\mathbf{x}_i$ 。根据公式(1), 因为  $\mathbf{x}_i$  的稀疏特性, 一些稀疏恢复算法可以被用来恢复  $\mathbf{x}_i$ 。然而, 实际网络中的天线系数矩阵  $|\mathbf{W}^H \mathbf{S}|^2$  通常具有不均匀且高度相干的列。为了准确地恢复  $\mathbf{x}_i$ , ZHANG 等<sup>[16]</sup>提出的二阶加权正交匹配追踪算法 (SWOMP) 可以有效解决这个问题。这是因为  $\mathbf{x}_i$  很好地描述了特定环境中 APS 的统计特性和多径信道结构。为了更准确地恢复多径信道结构, 需要使用多个参考信号来尽量检测多方向的信道多径和物理传播环境, 从而实现更好的信道拓扑刻画。在特定 ISAC 网络场景下, 估计到的大尺度信道统计信息与真实网络具有统计相似性, 这确保了本文所提方法对 ISAC 网络性能的准确评估。在估计信道 APS 时会使用稀疏恢复算法, 该算法计算复杂度较低, 也使得所提方法可以对 ISAC 覆盖率进行相对快速的预测。经过第 1 阶段估计到的信道 APS 可以被表示为  $\hat{\mathbf{x}}_i$ 。

### 2) 第 2 阶段: 更新变参导向矩阵

这一阶段将计算天线参数调整后的导向矩阵, 并关注机械下倾角  $\mathbf{t} = [t_1, \dots, t_k]$ , 和机械方位角  $\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_k]$  的调整。假设  $t_k$  和  $a_k$  的调整只改变导向矩阵  $\mathbf{S}_k$ 。机械角度的改变分别表示为  $\Delta \mathbf{t} = \mathbf{t} - \mathbf{t}'$  和  $\Delta \mathbf{a} = \mathbf{a} - \mathbf{a}'$ 。我们将某天线  $i$  的导向矢量  $\mathbf{r} \in \mathbb{C}^Q$  表示为  $\mathbf{r}^H = \mathbf{S}(\cdot, i) = [r_{11}, r_{12}, \dots, r_{1N_H}, r_{21}, \dots, r_{N_V N_H}]$ 。  $\mathbf{r}$  可以被重新写成矩阵形式  $\mathbf{R} \in \mathbb{C}^{N_V \times N_H}$ , 具体表示为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1N_H} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2N_H} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N_V 1} & r_{N_V 2} & \cdots & r_{N_V N_H} \end{bmatrix} \quad (6)$$

随后, 可以将机械旋转表示为对  $\mathbf{R}(i, j)$  的坐标变换。具体来说, 需要把  $\mathbf{t}$  和  $\mathbf{a}$  调整前的坐标表示为  $\mathbf{p}^H = [i, j, 1]$ 。考虑

的空间球坐标系中竖直方向上的角度范围为  $[-90^\circ, 91^\circ]$ , 水平方向上的角度范围为  $[-90^\circ, 269^\circ]$ , 然后定义变换矩阵  $T$  为:

$$T = \begin{bmatrix} \frac{N_V}{182} & 0 & \frac{N_V \Delta t_k}{182} \\ 0 & \frac{N_H}{360} & \frac{N_H \Delta a_k}{360} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

于是参数调整后的坐标  $(\mathbf{p}')^H = [i', j', 1] = T\mathbf{p}$ 。在进行坐标变换时同时应注意边界值的处理。如果  $j' \geq N_H$ , 则令  $j' = j' - 270$ ; 如果  $i' \geq N_V$ , 则令  $i' = 360 - i'$ 。于是可以获得机械参数变换后的矩阵形式的导向矢量  $\mathbf{R}'(i', j') = \mathbf{R}(i, j)$ 。基于  $\mathbf{R}'$ , 可以得到参数变化后的导向矩阵  $\mathbf{S}'$ 。

### 3) 第 3 阶段: 通感 SINR 预测

这一阶段主要对参数调整后的通信和感知 SINR 进行预测。因为基站参数变化不影响物理信道传播环境, 第 1 阶段估计到的信道 APS  $\hat{\mathbf{x}}_i$ , 可以被用来计算天线参数变换后的通信 SINR 和感知 SINR。天线参数变化后的导向矩阵为  $\mathbf{S}'$ , 假设  $\hat{\mathbf{x}}_i$  在一段时间内不变, 则基站参数变化后的 RSRP 可表示为:

$$\widehat{\text{rsrp}}' = \left( \|(\mathbf{W})^H \mathbf{S}'\|^2 \hat{\mathbf{x}}_i \right) \in \mathbb{R}^M \quad (8)$$

类似地, 天线参数变化后的通信 SINR 和感知 SINR 分别被表示为  $(\text{sinr}_i^c)'$  和  $(\text{sinr}_i^s)'$ , 具体表达式为:

$$(\text{sinr}_i^c)' = 10 \log_{10} \left( \frac{10^{\max_k \text{rsrp}'_{k,i}/10}}{\sum_k 10^{\text{rsrp}'_{k,i}/10} - 10^{\max_k \text{rsrp}'_{k,i}/10}} \right) \quad (9)$$

$$(\text{sinr}_i^s)' = 10 \log_{10} \left( \frac{\mathbb{E} \left\| \mathbf{u}_i^H \mathbf{G}'_{R,i} \mathbf{W}_i \right\|^2}{\mathbb{E} \{ |\mathbf{z}_R|^2 \}} \right) \quad (10)$$

这样我们就能获得参数调整后的通信和感知 SINR 的预测值。

在所提的模型中, 因为基站被用作单站共置雷达, 信号 AoA 和 AoD 被假设相等, 此时的参考信号波束不仅可以探测环境中的通信径, 还可以探测感知径。这在以视距传输的低空感知场景中尤为适用, 此时的感知目标响应矩阵  $\mathbf{G}'_{R,i}$  可以根据公式 (3) 计算。

最后, 基于上述的通感 SINR 预测, 进一步计算任意天线参数调整后的 ISAC 覆盖率,

并使用公式 (2) 和 (5) 定义 ISAC 覆盖率指标:

$$\Gamma = \frac{1}{L} \sum_i \left( \frac{w_c}{1 + e^{-\lambda_c (\text{sinr}_i^c - \mu_c)}} + \frac{w_s}{1 + e^{-\lambda_s (\text{sinr}_i^s - \mu_s)}} \right) \quad (11)$$



其中,  $\mu_c$ 、 $\mu_s$  和  $\lambda_c$ 、 $\lambda_s$  分别代表通信 SINR 和感知 SINR 的阈值和正则系数。与传统覆盖率指标  $\Gamma_0 = \frac{1}{L} \sum_i (w_c \times \mathbb{1}(\text{sinr}_i^c > \mu_c) + w_s \times \mathbb{1}(\text{sinr}_i^s > \mu_s))$  相比,  $\Gamma$  也使用了通信权重因子  $w_c$  和感知权重因子  $w_s$ , 来控制通信和感知覆盖作为优化目标的权重。此外,  $\Gamma$  还使用了 Logistic 函数来避免  $\Gamma_0$  中的二值函数  $\mathbb{1}(\cdot)$  带来的不可微分的问题。将  $(\text{sinr}_i^c)'$  和  $(\text{sinr}_i^s)'$  代入公式 (11) 后即可得到天线参数调整后的 ISAC 覆盖率。

### 3 ISAC 网络性能优化

本节将构造 ISAC 网络性能优化问题, 并使用适当的黑盒优化算法获得优化后的 ISAC 网络性能。

为了最大化 ISAC 网络的通信感知覆盖率, 需要优化天线机械下倾角  $\mathbf{t} = [t_1, \dots, t_k]$  和方位角  $\mathbf{a} = [a_1, \dots, a_k]$ 。优化问题可以表示为:

$$\begin{aligned} (\text{P1}): \max_{\mathbf{t}, \mathbf{a}} \quad & \Gamma(\mathbf{t}, \mathbf{a}) \\ \text{s.t.} \quad & t_k^{\min} \leq t_k \leq t_k^{\max}, \forall k, \\ & a_k^{\min} \leq a_k \leq a_k^{\max}, \forall k, \end{aligned} \quad (12)$$

其中两个限制条件分别代表下倾角和方位角的调节范围。可以看出, 空地融合网络的覆盖优化问题需要有多重考量。对于每个待优化小区的基站, 在调整下倾角和方位角时, 要在最大化主区覆盖率的同时避免对相邻小区产生严重干扰, 在提升对空覆盖率的同时也应避免对地覆盖劣化。同时, 小区边缘栅格覆盖的提升也对于整网优化至关重要。(P1) 中的 ISAC 覆盖率关于天线的参数并没有闭式表达, 对此可采用零阶优化类的黑盒优化方法<sup>[14]</sup>来有效求解此类问题。如算法 1 借助 Brent 方法<sup>[15]</sup>来执行坐标搜索, 没有使用差分梯度估计, 并用块坐标下降减少收敛所需的迭代次数。Brent 方法结合了黄金分割搜索和抛物线插值, 用于无导数的一维函数优化, 能够在没有梯度信息的情况下有效地找到函数的最小值。通过使用 Brent 方法, 并结合块坐标下降, 收敛所需的迭代次数显著减少。

#### 算法 1: 基于 Brent 方法的块坐标下降 (BCD) 算法

输入:  $\mathbf{x}_0$ , 块索引, 容差

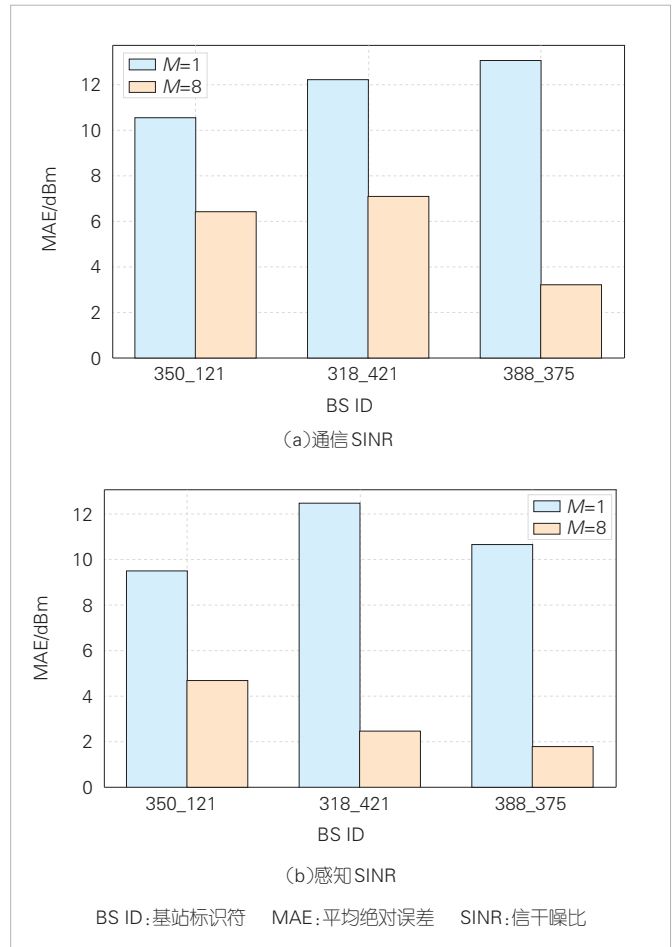
- 1: 重复
- 2: for all  $i \in$  块索引 do
- 3:  $\mathbf{d}_i \leftarrow \mathbf{e}_i$  ( $\mathbf{e}_i$  是标准基向量)
- 4: 定义  $f_i(\alpha) = f(\mathbf{x} + \alpha \mathbf{d}_i)$
- 5:  $x_i^*, f_i^* \leftarrow \text{Brent}(f_i, \text{下界}_i, \text{上界}_i, \text{容差})$

- 6:  $\Delta \mathbf{x}_i \leftarrow x_i^* - x_i$  {计算步长}
- 7:  $\mathbf{x} \leftarrow \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}_i \mathbf{d}_i$  {沿方向  $\mathbf{d}_i$ , 更新变量}
- 8: end for
- 9: 直到满足收敛条件
- 10: 返回  $\mathbf{x}$

### 4 仿真结果

本节中, 我们提供数值结果来评估所提方法的有效性, 使用现实世界采集的数据进行信道建模。一个城区地面 ISAC 网络场景的天线参数调节后的估计误差如图 4 所示。这个场景包含 59 个栅格和 3 个基站, 其中  $\sigma_R^2 = -80$  dBm,  $\alpha = 1$  m<sup>2</sup>。栅格形状为 10 m  $\times$  10 m 的正方形。在我们使用 MBCM 辅助的信号 SINR 预测中, 波束数量被设置为  $M = 8$ 。以传统一维路损模型方法<sup>[14]</sup>为基准, 其中  $M = 1$ , 基于公式 (8) 的计算, 我们使用平均绝对误差 (MAE) 来衡量所提方法的性能:

$$\text{MAE} = \frac{1}{M} \left\| \widehat{\text{rsrp}}' - \text{rsrp}' \right\|_1. \quad (13)$$

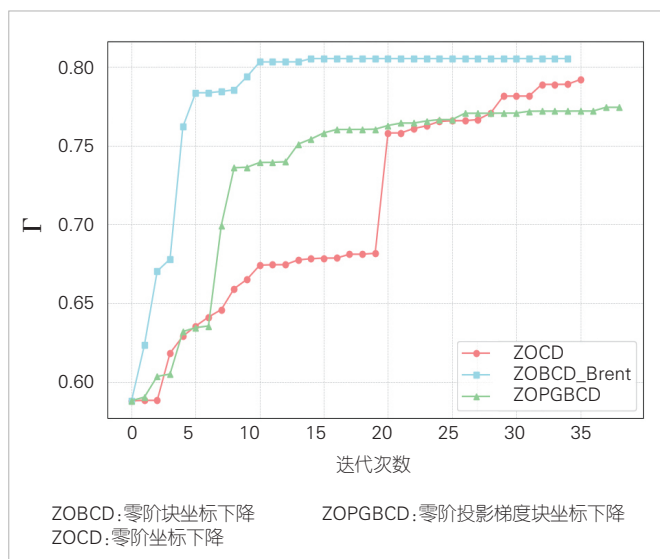


▲图4 天线参数调节后的估计误差

类似地，我们也可以预测天线参数变化后的  $\text{sinr}_i^c$  和  $\text{sinr}_i^s$ ，并获得相应的 MAE。在所有 3 个基站的实验中，与基准方法相比，MBCM 辅助的方法在通信和感知 SINR 的预测中都可以获得更低的 MAE。这是因为 MBCM 提供了更精确的多径信道模型，从而使天线参数调整后的预测更加准确。

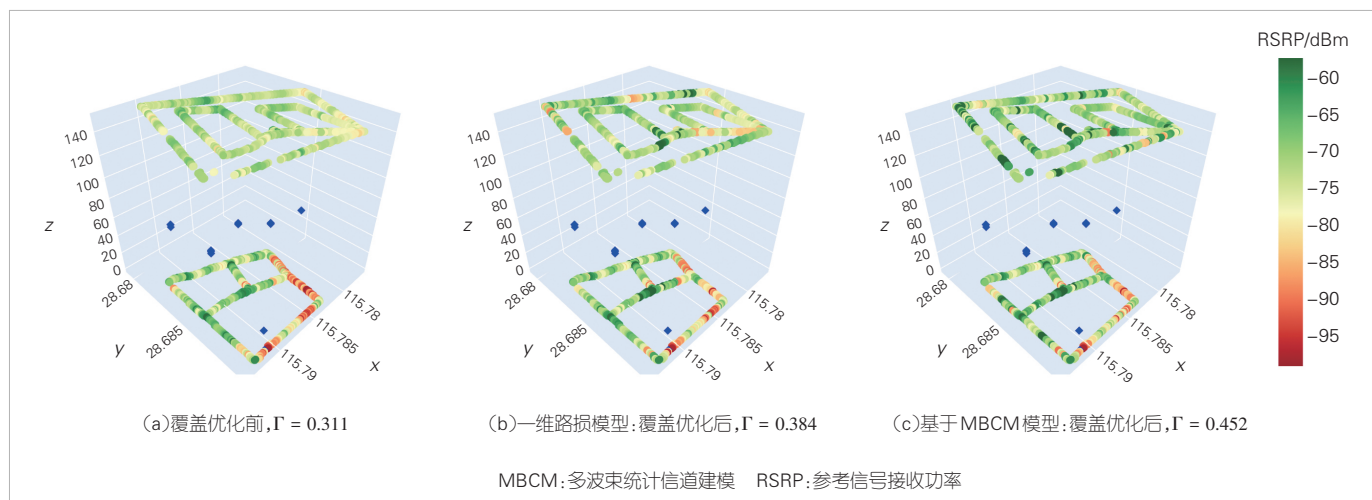
图 5 展示了使用不同零阶优化算法的对比结果。通感覆盖率（公式 11）被作为算法迭代次数的函数。其中，ZOBCD\_Brent 算法如算法 1 所示，ZOCD 算法仅使用自适应的坐标搜索和步长调整策略，ZOPGBCD 算法由文献<sup>[14]</sup>提出。参数设置为： $\lambda_c = \lambda_s = 0.3$ ， $\mu_c = 12$  dB， $\mu_s = -70$  dBm。对于地面用户，优化问题只关注通信覆盖，通信权重因子设置为 1，感知权重因子为 0；对于低空用户，优化问题只关注感知覆盖，通信权重因子设置为 0，感知权重因子为 1。感知 SINR 参数设置与图 4 场景相同。为了提高基站参数调整建议的可靠性，机械下倾角的调节范围基于现网配置再增加或减少  $20^\circ$ ，机械方向角的调节范围基于现网配置再增加或减少  $40^\circ$ 。可以看到，本文所提算法在求解速度和求解质量上都优于其他算法。这是因为 BCD 算法使求解速度变得更快，Brent 方法使每个维度的搜索都有质量保证。由于实际数据集的差异，基于差分估计梯度的优化策略（ZOPGBCD）并不能很好地指导整个优化过程。

图 6 展示了使用不同信道建模方法辅助的 ISAC 网络覆盖优化结果。我们采用基于一维路损模型的传统网络优化方法<sup>[14]</sup>为基准进行对比。地面和低空区域一共被分为 698 个栅格，待优化基站数量为 31，蓝色点标识出了部分待优化基站的位置。我们对每个基站的下倾角和方位角进行了优化，以获得最佳的低空覆盖率和地面通信覆盖率。参数设置与图 4、图 5 场景相同。经过基于 ZOBCD\_Brent 的黑盒优化后，



▲图 5 零阶梯度优化算法对比

基于一维路损模型的方法可以将 ISAC 覆盖率  $\Gamma$  从 0.311 提升到 0.384，基于 MBCM 的方法可以将覆盖率  $\Gamma$  提升到 0.452。如果使用传统覆盖率指标  $\Gamma_0$ ，则覆盖优化前和使用两种建模方式进行覆盖优化后的覆盖率则分别为 0.262、0.401、0.477。由此可见，基于 MBCM 的网络优化实现了更高的 ISAC 覆盖率，这是因为它通过更多的探测信号提供了更准确的信道信息，从而有助于构建更准确的覆盖预测模型，大大提升后续黑盒优化模块的效果。虽然低空栅格覆盖优化仅关注感知 SINR，但由图 6 可知低空和地面通信覆盖同时得到了提升。更高的感知覆盖能力意味着更强的环境信息提取能力。对于 ISAC 系统来说，增强的通信覆盖可以提高环境信息提取能力。因此，感知性能的提升也会使通信覆盖同步提升。



▲图 6 通信感知一体化网络覆盖优化

## 5 结束语

为了解决6G时代ISAC网络优化设计问题,我们提出了一种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框架。该框架采用多波束统计信道建模方法,获得了高效准确的大尺度信道结构估计,并提出了仅需单一工参样本观测的强泛化网络覆盖性能预测模型。在此基础上,利用零阶块坐标下降的优化方法实现了高效的黑盒天线参数优化策略。基于所提框架,我们对现实世界中的低空和地面用户进行了系统级ISAC性能仿真、覆盖预测和优化。基于现网真实数据的实验结果表明,所提方法在性能上显著优于基准方法。

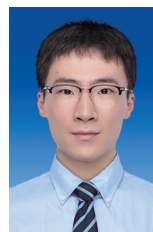
## 参考文献

- [1] ZHU G X, LYU Z H, JIAO X, et al. Pushing AI to wireless network edge: an overview on integrated sensing, communication, and computation towards 6G [J]. Science China information sciences, 2023, 66(3): 130301. DOI: 10.1007/s11432-022-3652-2
- [2] LIU F, CUI Y H, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1728-1767. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632
- [3] LUO Z Q, ZHENG X, LÓPEZ-PÉREZ D, et al. SRCON: a data-driven network performance simulator for real-world wireless networks [J]. IEEE communications magazine, 2023, 61(6): 96-102. DOI: 10.1109/MCOM.001.2200179
- [4] XU D F, KHALILI A, YU X H, et al. Integrated sensing and communication in distributed antenna networks [EB/OL]. (2023-05-02) [2024-06-25]. <https://arxiv.org/abs/2210.14880>. DOI: 10.48550/arXiv.2210.14880
- [5] XU D F, LIU C, SONG S H, et al. Integrated sensing and communication in coordinated cellular networks [C]//Proceedings of IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP). IEEE, 2023: 90-94. DOI: 10.1109/SSP53291.2023.10207991
- [6] ALI K S, CHAFI M. Integrated sensing and communication for large networks using joint detection and a dynamic transmission strategy [EB/OL]. (2023-05-23) [2024-06-25]. <https://arxiv.org/abs/2211.09466>. DOI: 10.48550/arXiv.2211.09466
- [7] LI R G, XIAO Z Q, ZENG Y. Toward seamless sensing coverage for cellular multi-static integrated sensing and communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2024, 23(6): 5363-5376. DOI: 10.1109/TWC.2023.3325849
- [8] LIU F, XIONG Y F, WAN K, et al. Deterministic-random tradeoff of integrated sensing and communications in Gaussian channels: a rate-distortion perspective [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT). IEEE, 2023: 2326-2331. DOI: 10.1109/ISIT54713.2023.10206462
- [9] BARIK D K, MALI S, ALI F A, et al. Design and analysis of RF optimization in 2G GSM and 4G LTE network [C]//Innovation in Electrical Power Engineering, Communication, and Computing Technology. 2022: 11-18. DOI: 10.1007/978-981-16-7076-3\_2
- [10] 张树韬, 薛烨, 史清江, 等. 无线网络孪生中的统计信道建模方法: 现状与前沿 [J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(3): 26-31. DOI: 10.12142/ZTETJ.202303006
- [11] LI Y, XU S Y, WU Y P, et al. Network energy-efficiency maximization in UAV-enabled air-ground-integrated deployment [J]. IEEE Internet of Things journal, 2022, 9(15): 13209-13222. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3142073
- [12] LI W J, LÓPEZ-PÉREZ D, GENG X L, et al. A zeroth-order continuation method for antenna tuning in wireless networks [C]//Proceedings of ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2021: 1-6. DOI: 10.1109/ICC42927.2021.9500847
- [13] LIU Y X, HUANGFU W, ZHANG H J, et al. An efficient stochastic gradient descent algorithm to maximize the coverage of cellular networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(7): 3424-3436. DOI: 10.1109/TWC.2019.2914040
- [14] HE P C, LU S Y, GUAN X, et al. A zeroth-order block coordinate gradient descent method for cellular network optimization [C]//Proceedings of International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). IEEE, 2022: 1-6. DOI: 10.1109/ISWCS56560.2022.9940430
- [15] D G, BRENT R P. Algorithms for minimization without derivatives [J]. Mathematics of computation, 1974, 28(127): 865. DOI: 10.2307/2005713
- [16] 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
- [17] 3GPP. Physical channels and modulation: 3GPP TS 38.211 [S]. 2023

## 作者简介



**李昕昊**, 香港中文大学(深圳)理工学院在读硕士研究生; 主要研究领域为无线通信中的网络优化、通信感知一体化等; 已发表论文2篇。



**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研究员、信息系统大数据实验室副主任; 主要从事边缘智能和通信感知一体网络的研究工作; 先后主持多个国家自然科学基金项目、广东省基础研究重大项目等, 担任国际权威期刊IEEE TWC和IEEE WCL编委; 曾获IEEE通信学会亚太区最杰出青年学者奖和最佳论文奖、浙江省自然科学奖二等奖; 发表论文70余篇。



# 面向6G典型场景的无线系统研究



## 6G Wireless System Research Towards Typical Scenarios

王志勤/WANG Zhiqin, 杜滢/DU Ying, 沈霞/SHEN Xia,  
焦慧颖/JIAO Huiying

(中国信息通信研究院, 中国 北京 100083)  
(China Academy of Information and Communication Technology, Beijing  
100083, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240724.1128.010.html>

网络出版日期: 2024-07-24

收稿日期: 2024-06-12

**摘要:** 6G无线系统作为6G系统的重要组成部分,其设计和关键技术的选择将直接影响通信、智能、感知、计算等多个维度的性能。预计6G系统设计将以沉浸宽带通信为基础,支持人工智能和通信融合、通信和通感一体化、泛在连接场景,并可与5G配合,全面支持物联网应用。针对这些典型场景,分析6G无线系统需要重点研究的技术要素。

**关键词:** 6G; 智能; 感知; 通信

**Abstract:** As the important part of 6G networks, 6G radio access network design and key technologies selection will directly affect performance of multiple dimensions such as communication, intelligence, sensing, and computing. It is expected that the 6G system will be designed based on immersive communication, supporting artificial intelligence and communication, integrated sensing and communication, and ubiquitous connectivity, and furthermore can combine with 5G to fully support IoT applications. The design roadmap and key technical elements are analyzed that need to be studied for the wireless system to support 6G typical scenarios.

**Keywords:** 6G; intelligence; sensing; communication

**引用格式:** 王志勤, 杜滢, 沈霞, 等. 面向6G典型场景的无线系统研究 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 65–68. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404010

**Citation:** WANG Z Q, DU Y, SHEN X, et al. 6G Wireless system research towards typical scenarios [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 65–68. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404010

6G作为新一代智能化综合性数字信息基础设施,具备泛在互联、普惠智能、多维感知、全域覆盖、绿色低碳、安全可靠等典型特征,可实现普惠智能、通信感知一体化、空天地立体覆盖的能力拓展<sup>[1]</sup>。

### 1 6G整体发展

2023年6月,国际电信联盟(ITU)发布《IMT面向2030及未来发展的框架和总体目标建议书》,指出:6G将在5G三大场景基础上增强和扩展,包含沉浸式通信、超大规模连接、极高可靠低时延、人工智能(AI)与通信、感知与通信一体化、泛在连接六大场景。负责6G标准的国际标准组织第3代合作伙伴计划(3GPP)已确定6G标准化的主要时间点:将于2024年底启动6G业务场景研究,于2025年启动6G技术预研,以研究形成6G系统总体框架,并在2027年启动6G标准制订。

6G系统将成为提供新通信、计算、智能、感知、数据

等能力的服务平台,提供连接和超越连接的服务。其中,6G无线系统需要提供超越通信边界的性能、智能多样灵活的无线功能,并支撑新的应用生态和发展需求,其设计至关重要<sup>[2]</sup>。

业界广泛认为,6G将使用低中高的频谱资源,以实现全方位的6G业务体验。3GPP正在开展新频段的传播特征研究(如6~24 GHz),为6G技术研究和未来网络部署提供更多可能的候选频谱。6G无线系统将以沉浸通信场景为基础,有望率先支持人工智能与通信、通信和通感一体化、泛在连接场景,并可与5G配合,全面支持物联网应用。

### 2 人工智能和通信融合

面向6G,人工智能技术可以与系统的方方面面进行深度融合并发挥重要影响。面向无线系统侧,主要包含两个方面:AI4Net和Net4AI。其中,AI4Net利用AI优化无线接入网(RAN)的性能和效率;Net4AI是指RAN为AI应用和智

能体提供高效服务,如连接服务质量(QoS)保障、数据安全隐私保护机制等,并最终实现利用RAN内的连接、计算、数据和算法等资源对内对外提供AI即服务(AIaaS)能力。

人工智能和通信融合将影响6G无线系统设计的多个方面。首先,6G支持原生智能,人工智能/机器学习的数据采集、模型训练、模型分发等功能将被纳入6G无线系统内部。RAN架构需要考虑在线学习、联邦学习、迁移学习等分布式人工智能部署需求,最终形成人工智能功能模块定义、RAN新架构和协议栈设计。其次,人工智能的引入将提升多个用例下系统/模块性能、降低空口开销等,但同时也会带来模型、数据等开销。系统设计时需平衡两者性能。最后,人工智能在可解释性、泛化能力等方面仍存在一定问题,需要设计AI性能监测机制,而6G仍需支持非智能化的通信模式,这需要在系统总体设计中兼顾。

在无线系统设计方面,需要重点考虑以下几个要素:

### 2.1 支持分布式和集中式AI的融合架构

6G系统需基于不同的AI业务需求,通过控制信令的方式,实时地协同多节点和四要素资源(算力、算法、数据、模型),进而保障AI业务的QoS需求。RAN域内多节点/网元之间支持联邦学习、拆分学习、迁移学习、联合推理等分布式AI框架。灵活的节点/网元调度算法以及高效的空口传输机制,在提升频谱资源利用效率的同时,保证AI服务的质量,并进一步保护数据隐私和安全。例如,相对于5G以系统为中心的AI架构,6G“端网协同”更能够充分利用端侧的算力、数据等优势,支持端侧个性化模型以及网络和终端联合的AI任务,从而提升整网的AI性能。

### 2.2 融合的生命周期管理机制

针对AI4NET和NET4AI,虽然不同AI用例的执行过程各不相同,但其生命周期过程是类似的,都包括数据收集、模型训练、模型传递、模型注册、模型配置/激活/去激活、模型推理、模型监控、模型调整等逻辑功能。因此需要研究设计融合的生命周期管理机制,以降低系统复杂度。

### 2.3 通智算协同

在架构层面需原生支持网内分布式计算资源之间的发现、感知和控制,实现分布式计算资源功能的共享协同,来支持复杂计算任务的执行,并应对移动性带来的计算任务动态迁移等挑战。是否需要在RAN侧为终端提供动态的计算服务,以及从功能、接口协议等角度如何提供该类计算服务,都需要进一步研究。此外,考虑到RAN是否能处理应用数据,可采用边缘计算单元的架构来实现无线系统的计算

能力。

### 2.4 数据收集和数据服务等原生数据能力

原生数据能力既要保障数据的安全和隐私,也要提升数据收集、传输和存储等的效率,提升数据共享复用度。这里的数据包括通信连接服务运营过程中终端、无线接入网、核心网和网络管理功能等产生的数据(面向传统通信业务类型),也包括感知和AI等新业务服务运营过程中产生的新类型数据,以及移动系统从第三方获取的可共享数据。终端/接入网/核心网定义数据收集功能,支持所需数据到源数据的映射,并按需生成和收集数据。经过数据压缩、数据存储、数据传输、数据处理后,为网元提供数据服务。

## 3 通信感知一体化

通感一体化关键技术研究涉及无线空口、系统架构、硬件架构等方面,相关设计与感知模式和感知服务相关。在感知模式方面,预计6G从第一版本开始将支持多种模式的灵活选择,如基站(BS)自发自收、BS发BS收、BS发终端(UE)收、UE自发自收、多基站协同感知等;支持多种模式下的感知数据测量和处理,并提供业务连续性和一致性保障机制。在感知服务方面,支持感知导航、模式识别、成像、重构类、多模感知数据利用和管理、AI和感知融合,以及感知辅助通信等服务。

### 3.1 通感一体化无线空口技术

无线空口技术包括了通感一体化波形设计、感知频段设计、感知模式帧结构设计、感知信号设计、资源分配和无线感知流程设计等。例如:在波形方面,研究正交频分复用(OFDM)为主、结合雷达波形的融合波形方案,以满足更远距离感知需求;在感知频段方面,探索低频、高频以及太赫兹不同频段的能力特性,通过多频段通感一体化融合,满足不同业务的感知精度和分辨率需求;在感知模式方面,针对场景和感知设备部署方式,确定支持的基站感知和终端感知模式,作为空口协议设计参考。

空口通感一体化帧结构设计、感知信号设计、资源分配和无线感知流程的研究,与通感一体化波形设计、感知频段和感知模式密切相关。帧结构设计重点考虑物理帧中感知占用的时间资源,并且结合组网中感知与通信、感知与感知之间干扰,设计相应的保护间隔。感知信号设计研究复用通信参考信号,或使用独立的感知信号(涉及感知信号的序列和信号生成方式)。资源分配则在通信资源和感知资源通过时分、频分、空分或者码分复用基础上,合理调度通感资源满

足通信和感知性能需求。无线感知流程则包含感知能力上报、通感资源配置、感知测量及结果上报基本流程。

### 3.2 通感一体化架构设计

在5G-A通感融合架构设计时,考虑在5G核心网中引入感知网元,设计与5G核心网非独立和独立的两种感知架构,以满足不同场景的网元灵活部署需求。其中,感知网元将作为支持感知业务鉴权/授权、移动性管理、会话管理、能力开放和计费等功能的核心管理网元。

随着网络大数据算力能力提升,6G通感智算一体化架构的设计成为重要技术发展趋势,通过业务感知、智能、算力的编排,更好地满足通感融合应用需求。通感智算融合编排管理作为网络控制中心,通过收集各感知功能和计算控制功能上报的节点状态信息,借助AI算法模型库对网络拓扑进行动态预测,并向感知/计算控制功能下发资源部署和业务编排策略,例如感知、计算节点的选择,以及各节点通信、感知、计算资源的分配。

## 4 6G通信连接

6G将支持沉浸通信场景,提供更高速、低时延、多元的宽带服务,支持超大连接通信和超可靠低时延通信场景,支持更多类型终端和更广泛的物联。在技术方面,超大规模天线、智能超表面等代表性技术将支撑6G实现超高体验的通信连接。

### 4.1 超大规模天线

超大规模多输入多输出(MIMO)技术是大规模MIMO技术的进一步演进升级,通过部署超大规模的天线阵列、应用新材料、引入新工具,可以获得更高的频谱效率和能量效率、更广更灵活的网络覆盖,更高的定位精度<sup>[3]</sup>。面向6G,主要研究如下技术方向:

1) 近场特征和空间非平稳特性:超大规模MIMO随天线数的增加表现出近场特征和空间非平稳特性,而5G及其之前的通信系统主要考虑远场通信,因而在信道建模基础研究中,需要研究新的信道建模表征方法,准确表征信道,支撑技术方案评估和筛选。

2) 功耗:随着天线规模的扩大,天线的功耗也将变得不可忽视,需要研究具有低功耗、高能效的新型天线架构。

3) CSI反馈:在码本等CSI反馈设计中,需要充分考虑超大规模信道的近场特性、空间非平稳特性,以及新型天线架构对码本设计的影响、联合远场通信的码本联合设计等。同时在预编码处理方面,也需要充分考虑超大规模MIMO的

信道特点、大带宽特性,以及新型天线架构等要素。

4) 接收机算法:随着天线数的增加,接收机算法的复杂度变得很高,需要设计针对超大规模信道特点的低复杂度的接收机算法。

5) 波束管理:要考虑超大规模MIMO的高空间分辨率特性,以及新型天线架构的引入对波束管理的影响。

6) 分布式超大规模天线:研究低成本实用化分布式超大规模MIMO部署方案,以及节点间信息交互和时频同步等难题。

### 4.2 智能超表面

智能超表面(RIS)技术采用可编程新型亚波长二维超材料,通过数字编码对电磁波进行主动智能调控,形成幅度、相位、极化和频率可控制的电磁场。RIS具有低成本、低功耗、易部署等特点,将使智能无线环境,构建出可编程无线环境的全新范式<sup>[4]</sup>。面向6G,主要研究如下技术方向:

1) 近场和远场信道测量与建模:构建不同情况下RIS辅助无线通信的自由空间路径损耗和小尺度衰落模型,并通过实验测量初步验证。

2) 低复杂度的RIS信道估计与反馈:利用基站和RIS位置固定的特点以及RIS单元阵列特性,如RIS级联信道的结构化稀疏特征和RIS信道矩阵低秩特性,设计低复杂度、低开销的信道估计方法。

3) 硬件受限下的RIS波束赋形:设计离散相位、波束宽度、反射角度等硬件约束下的波束赋形,以解决理想硬件状态下由波束赋形算法导致的严重扭曲训练导频和期望接收信号偏差问题。

4) RIS部署优化设计:通过RIS部署位置、密度、RIS形态、调控/协作关系等参数实现复杂度、成本及性能的平衡。

5) RIS硬件架构与调控算法:基于可调元件的超表面阵面和基于编程元件的控制电路结合的RIS硬件架构设计。

6) RIS新器件:RIS从单一反射式形式,发展出透射式、透射-反射一体式等新形式,将其对电磁场与波的调控能力扩展到了全空间范围。

7) RIS新应用:基于RIS实现成本较低和架构简化的大规模天线阵列发射机,可以进一步扩展阵列规模与性能,无须使用传统相移器和考虑多个小功放之间的差异性。

但目前RIS技术在硬件架构设计及调控算法、空口传输技术、成本、更多价值场景等方面仍面临多重挑战。



### 4.3 物联网

回顾5G, 5G第一个版本重点支持增强移动宽带, 第二个版本重点提升低时延高可靠容量和性能, 第三个版本重点支持中高速物联网。结合5G支持三大连接场景的设计经验, 6G有能力在第一版本就支持扩展的三大连接场景, 以避免后续因对协议和功能的裁剪而导致的高复杂度和过度设计等问题。

6G需结合5G行业应用情况, 甄选亟需支持的物联网应用。在2024年4月3GPP举办的6G业务用例研讨会上, 来自全球的多家组织和公司表示, 面向工业应用, 需要进一步提升端到端性能、稳定性和确定性, 并期待结合6G新特征, 如AI和感知, 为工业互联网等物联网应用提供新的应用模式, 推动工业化和数字化转型, 提升生产效率。

工业互联网等物联网具有明显的多元性能特征。在5G URLLC设计的基础上, 6G具备HURLLC能力, 并支持类似于5G轻量化(RedCap)的物联网业务, 提升有广泛应用市场和发展潜力的边缘计算的效率。

### 4.4 泛在连接

6G将成为地面网络和多种类型非地面网络深度融合的全新移动信息网络, 实现全球无缝泛在连接。非地面网络既可以扩展常态化的地面网络部署, 实现空天地全域覆盖, 也可以分流地面网络的负载, 实现网络资源按需分配的目标。天地一体化设计涉及多样的节点能力、小区类型和属性、终端类型及服务要求等, 需要体系化研究系统性能需求、关键技术和功能架构特征等。

6G有望在第一版本就支持地面网络和非地面网络的融合技术, 并逐步优化增强。5G-A NTN标准能力可以作为6G非地面网络的技术起点。6G在接入过程、链路性能、波束管理、移动性管理、频谱管理、协议栈适配等方面会有更多设计空间, 以支持更多部署场景和业务用例。

## 5 结束语

当前全球6G发展正处于关键技术突破和总体方案设计的重要阶段。ITU已经明确了6G的典型场景, 并正在研究技术性能指标。3GPP也将于2024年底启动6G业务需求和典型用例研究工作。研究无线系统总体设计, 满足ITU所确定的场景和关键能力已成为6G工作重点。本文分享了面向六大典型场景的6G无线系统技术研究, 后续将进一步结合关键问题进行深入研究, 以支撑6G无线系统设计。

### 参考文献

- [1] 王志勤, 杜滢, 魏克军, 等. 6G移动通信愿景、应用场景和关键技术趋势展望[J]. 中国科学-信息科学(英文版), 2022, 65(5): 151301. DOI: 10.1007/s11432-021-3351-5
- [2] IMT-2030(6G)推进组. 6G无线系统设计原则和典型特征[R]. 2023
- [3] IMT-2030(6G)推进组. 2023集中式超大规模MIMO关键技术[R]. 2023
- [4] IMT-2030(6G)推进组. 2023智能超表面典型应用、挑战与关键技术[R]. 2023

### 作者简介



**王志勤**, 中国信息通信研究院副院长, 中国通信标准化协会副理事长、无线通信技术委员会主席, 中国通信学会无线移动委员会主任委员, 并担任中国IMT-2020(5G)推进组组长、IMT-2030(6G)推进组组长; 在信息通信技术标准、信息化、产业与政策等方面有深入研究, 推动中国3G、4G及5G创新; 荣获全国三八红旗手、全国创新争先奖、全国五一劳动奖章等国家级荣誉称号, 入选国家百千万人才工程, 荣获国家科学技术进步奖特等奖, 并多次获得国家科学技术进步奖一等奖、二等奖。



**杜滢**, 中国信息通信研究院移动通信创新中心副主任, 现任IMT-2030(6G)推进组标准和国际合作组副组长; 长期从事移动通信领域无线新技术研究和国际标准化工作。



**沈霞**, 中国信息通信研究院移动通信创新中心高级工程师; 主要从事5G、5G-A车联网、天地融合、通感融合的国际标准化, 以及6G通感一体化技术研究和测试验证工作。



**焦慧颖**, 中国信息通信研究院移动通信创新中心主任工程师; 主要从事移动通信无线新技术研究和5G/6G国际标准化工作。

# 5G-Advanced 技术及应用



## 5G-Advanced Technology and Applications

王伟/WANG Wei, 张诗壮/ZHANG Shizhuang,  
李晓帆/LI Xiaofan, 芮华/RUI Hua

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

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404011

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240723.1539.004.html>

网络出版日期: 2024-07-24

收稿日期: 2024-06-07

**摘要:** 提出了5G-Advanced技术的总体愿景目标、主要演进方向以及六大应用场景, 包括无缝万兆、全域通感、泛在智能、空天地一体、千亿物联、确定能力, 并详细阐述了场景需求和关键技术。无缝万兆进一步提升网络速率和降低时延, 全域通感将通信与感知功能结合, 拓展无线网络边界, 泛在智能通过AI赋能提升网络智能化水平, 空天地一体实现星地融合, 千亿物联支持高中低速全场景的物联接入, 确定能力满足工业生产的高要求。5G-Advanced技术将持续提升5G网络能力, 拓展应用场景, 引领行业走向6G。

**关键词:** 5G-Advanced; 全域通感; 空天地一体; 千亿物联

**Abstract:** The overall vision goals, main evolution directions, and six major application scenarios of 5G-Advanced technology have been proposed, including seamless 10 gigabit network, integrated sensing and communication, ubiquitous intelligence, space-air-ground integration, 100 billion-level internet of things (IoT), and deterministic capabilities. It has also elaborated on the scenario demands and key technologies. The seamless 10 gigabit network aims to enhance the network speed and reduce network latency. The integrated sensing and communication combines communication with sensing functions to expand the boundaries of wireless networks. The ubiquitous intelligence improves the level of network intelligence through AI. The space-air-ground integration realizes the integration of satellites and ground networks. The 100 billion-level IoT supports IoT access in all scenarios with high, medium, and low speeds. The deterministic capabilities meet the high requirements of industrial production. 5G-Advanced technology will continue to enhance the capabilities of 5G networks, expand application scenarios, and lead the industry towards 6G.

**Keywords:** 5G-Advanced; integrated sensing and communication; space-air-ground integrated network; 100 billion-level IoT

**引用格式:** 王伟, 张诗壮, 李晓帆, 等. 5G-Advanced技术及应用[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 69-76. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404011

**Citation:** WANG W, ZHANG S Z, LI X F, et al. 5G-Advanced technology and applications [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 69-76. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404011

### 1 5G 技术演进及驱动力

5G技术以其高速率、低时延、大连接能力成为推动全球通信网络迈向新纪元的关键力量。5G技术的成功部署不仅加快了个人消费数字化的步伐, 更为工业互联网、智慧城市等领域的深度融合提供了坚实的支撑。然而, 5G网络 and 产业发展还存在不足: 首先5G网络的覆盖范围和密度仍显不足, 且复杂的网络架构导致运维成本和能耗较高; 其次, 在技术层面5G亟需在工业控制领域实现突破, 以满足自动化和智能制造对高上行带宽、确定性时延的严格要求; 最后, 应用生态仍需完善, 在消费者领域具有广泛影响力的应用还不够多, 市场上仍缺乏能够引发生活方式变革的标志性应用。在工业领域, 5G模组和终端的成本相对较高, 限制了大规模部署物联网设备的经济效益。同时, 海量的物联网设备对网络容量和连接密度提出更高的要求。因此, 5G网

络需要向5G-Advanced演进, 通过技术创新和成本控制以应对产业发展的挑战, 在技术成熟度、国土覆盖、成本能效、应用生态等方面进一步完善。

2024年6月, 3GPP R18标准的冻结是5G技术演进的一个关键里程碑。R18版本重点增强了移动宽带网络: 一是多天线技术的演进<sup>[1]</sup>, 引入了高精度预编码, 增加正交解调参考信号(DMRS)端口数, 采用高分辨率天线等; 二是多载波技术的增强<sup>[2]</sup>, 如多频带单载波(MB-SC)、灵活频谱接入(FSA)和动态频谱共享(DSS); 三是毫米波通信的增强和扩展现实(XR)应用的优化<sup>[3]</sup>, 如分层服务质量和帧完整性传输保障等; 四是超可靠低延迟通信(URLLC)的增强, 包括灵活双工、确定性低时延和上行链路增强。同时R18也增强了RedCap设备以支持更广泛的物联网(IoT)应用<sup>[4]</sup>。此外R18还关注了网络节能、智能中继器、NR sidelink技术、移

动集成接入和回程技术 (Mobile IAB)、空口人工智能 (AI) 等关键技术, 以满足更加多样化的业务需求<sup>[5]</sup>。预计到2025年6月, R18的关键技术将首次商用。在这之前, 基于私有实现的部分关键技术将持续展开落地验证, 如图1所示。

3GPP R19将在R18基础上进一步探索新的业务场景和需求, 这包括非地面网络 (NTN) 空天地一体、通感一体、无源物联网、URLLC 高精度授时以及内生 AI 技术。未来5G-Advanced将为5G发展注入新活力, 推动5G网络向更高性能、更智能化和更灵活的方向发展, 筑牢6G发展根基。

## 2 5G-Advanced 总体愿景目标及关键技术

5G-Advanced的演进应以场景价值为核心驱动力, 通过技术创新和网络能力的提升, 满足不同领域的需求, 推动社会经济的数字化转型。5G-Advanced的新阶段将对5G最初定义的三大场景eMBB、mMTC和URLLC进行增强, 基于无缝万兆、全域通感、泛在智能、空天地一体、千亿物联、确定能力六大场景进行技术能力演进, 如图2所示。

在消费者领域, 5G-Advanced通过无缝万兆和泛在智能增强网络性能, 提升大众数智生活体验; 在企业的领域, 通过确定能力增强核心生产域业务的网络能力, 深入赋能数智行业; 在新经济领域, 通过拓展空天地一体、全域通感、千亿物联等能力支撑星网、低空、物联等业务, 助力构建数智社会。5G-Advanced的总体愿景目标是构建一个集“无缝万兆、全域通感、泛在智能、空天地一体、千亿物联、确定能力”于一体的先进网络, 进一步增强网络和终端的技术能力, 支撑数字、智慧、绿色低碳社会基础设施的构建。5G-Advanced六大方向的特性、关键技术以及应用场景如表1所示。

### 2.1 无缝万兆: 极致性能新标杆, 超高速率、超低时延的极致体验

#### 2.1.1 场景需求

5G-Advanced时代裸眼3D、云电脑、XR元宇宙、超高

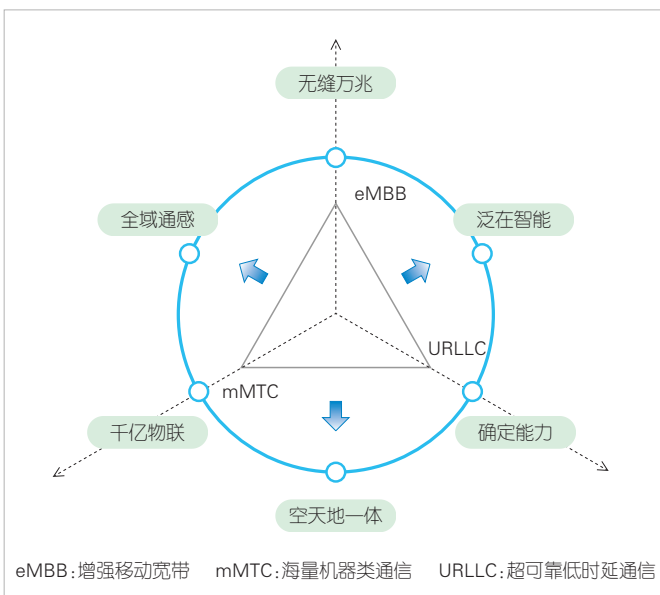
清直播、5G机器视觉等新业务形态的兴起, 驱动5G网络从千兆迈向万兆, 移动网络需要提供匹配的毫秒级时延下的无缝万兆体验。随着终端技术的持续突破和内容的加速繁荣, 预计未来沉浸交互业务的在线用户将相比现在增长100倍。用户对高质量服务体验的追求, 将推动5G-Advanced网络实现更高的网络性能, 以便为各行各业的数字化转型提供强有力的网络支撑。

#### 2.1.2 关键技术

为了实现超高的数据传输速率和超低时延, 5G-Advanced需要在频谱利用、大规模天线、灵活时隙等方面实现技术增强。

##### 1) 灵活带宽技术

频谱资源是无线通信系统的根基, 而全频谱重构将成为5G-Advanced网络持续演进发展的基础。主要表现在: 一是大带宽能力, 在6 GHz和毫米波频段推进单载波400 MHz以



▲图2 5G-Advanced六大场景



▲图1 5G-Advanced标准及关键技术演进



▼表1 5G-Advanced 关键技术及应用场景

场景	目标或特性	关键技术	应用
无缝万兆	提供超过万兆比特每秒的无缝数据传输速率,实现高速率、低延迟的通信体验	灵活带宽技术、多天线增强技术、灵活时隙技术	XR元宇宙、超高清直播
全域通感	实现通信感知一体化的多功能网络,增强环境监测、智能交通等应用的能力	全双工、干扰消除、通信和感知波形及信号处理一体化	车流检测、低空无人机监管、海域船只监管、呼吸心跳检测
泛在智能	将智能算法和决策能力嵌入到网络的各个层面,提升网络的自适应性、自动化和智能化水平	内生智能、行业大模型	智能节能、自动化运维
空天地一体	构建空中、地面和海洋等全覆盖的一体化通信网络	星上载荷、空口协议、星间网络拓扑	智能手机和物联终端直连卫星
千亿物联	支持全场景、全类型的物联设备,满足物联网千亿级别规模部署的需求	能力裁剪、Ambient IoT极致降低连接成本	自动化盘点、游牧跟踪、资产跟踪
确定能力	提供确定性网络能力,确保工业核心生产毫秒级低时延、99.999% 高可靠的性能要求	TSC、DetNet、URLLC、5G LAN、确定性闭环保障体系	工业自动化生产、远程医疗、金融交易

DetNet:确定性网络  
LAN:局域网

TSC:时间敏感通信  
URLLC:超可靠低延迟通信

XR:扩展现实

上,工作带宽1 GHz以上的演进,以持续提升宽带能力,尤其是毫米波的频谱资源非常充裕,可提供数十甚至上百倍于传统无线通信频段的可用带宽,支持超高速率数据传输;二是频谱的资源池组化,通过高中低频资源的高效协同、按需接入,实现跨频段资源的池组化管理,基于载波聚合技术(CA),深度协同高低频多载波能力,将多个分量载波聚合起来获得更大带宽,进一步提升用户感知体验。

2) 多天线增强

多天线技术特别是超大规模天线阵列(ELAA)显著扩大了天线阵列的规模<sup>[6]</sup>,包含数百甚至上千个天线振子,形成了超大规模MIMO系统,其具备更强大的波束赋形能力,可以生成更窄、更精确的波束,提供更高的空间分辨率和更高的分集增益。这有利于在密集用户环境中实现更精准的用户定位和服务,减少干扰,并能够实现更广泛的覆盖。同时通过动态波束控制,ELAA可以更灵活地调整覆盖范围和方向,适应快速变化的网络需求,支持更高频率(如毫米波和太赫兹频段)的高效利用,以满足超高数据速率、极低时延的需求。

3) 灵活时隙技术

5G TDD系统是上下行子帧时分配置系统,存在上下行子帧配比不平衡问题,很难同时满足超低时延和上行高速率的要求。这对5G系统支持需要极致体验的某些工业场景提出了挑战。灵活时隙技术包括灵活频谱接入(FSA)和子带全双工(SBFD)技术,通过时隙级和子带级的动态资源分配优化了频谱利用率,提升了用户上行体验,降低了时延,是实现更高上行数据传输速率和更广泛5G-Advanced应用场景的关键技术。

FSA技术支持多个频段的上行发送,允许将不同的频段

资源进行自由拆分和组合,并且可以智能地在多个载波之间进行选择 and 切换,以避免拥塞和干扰。通过在时隙维度动态切换不同的上行频段,FSA技术能够显著改善用户的上行体验。SBFD技术则通过在同一频段内的不同子带上同时进行上行和下行的数据传输<sup>[7]</sup>,实现了真正的全双工通信,其支持在同一频段内多个子带的分割,分别用于上下行通信,并采用先进的射频硬件和信号处理技术,有效管理和消除自干扰。此时,网络能够根据实时通信需求,动态分配子带资源,尤其适用于对时延敏感的应用场景。FSA技术和SBFD技术为5G网络的上行链路提供了更多的性能提升空间,在需要大上行带宽和低时延的工业互联网和高清视频传输场景中具有重要应用潜力。

2.2 全域通感:通感算智新架构,扩展无线网络新边界

2.2.1 场景需求

通信感知一体化(ISAC)技术将蜂窝移动通信与感知功能相结合,赋予通信基站如同雷达般的探测与跟踪能力。在5G-Advanced阶段利用毫米波和太赫兹等高频段资源,可以实现更高精度、更高分辨率的感知能力,为各行各业开启了前所未有的应用前景,在交通领域,ISAC技术可以实时监测车道流量、车速和潜在道路危险,提升交通监管能力和安全性。在低空领域,ISAC技术实现了无人机的有效监管和低空安全的管理。在生活场景中,ISAC技术使得呼吸监测、手势识别等感知服务成为现实。在网络管理方面,ISAC技术通过感知所提供的高精度定位、成像和环境重构能力实现“感知辅助通信”,推动智慧网络的建设。在5G-Advanced时代,基于海量基站的通感算智融合基础设施将

实现全域通感覆盖, 拓宽无线网络的边界, 为消费者和各行各业带来创新服务。

### 2.2.2 关键技术

通信感知一体化通过空口及协议联合设计、软硬件设备共享, 在相同频谱资源下实现通信功能与感知功能的融合共生, 为提升频谱利用率和设备复用率带来一个全新的维度。感知与通信从松耦合到完全一体化将经历3个阶段:

第1阶段, 实现通信与感知共享硬件和频谱, 降低硬件部署的成本。系统采用双功能收发机, 基于线性调频(LFM)和正交频分复用(OFDM)波形, 以时分方式发送感知和通信信号。但通信和感知在评估指标和算法上的差异对硬件设计提出了挑战。一方面, 传统有源天线单元(AAU)的收发未隔离, 工作在半双工的状态下, 而感知信号通常需要处于自发自收的全双工状态, 会存在强自干扰。因此, 合理的射频架构和有效的自干扰消除设计是ISAC系统亟待解决的关键技术难题<sup>[8]</sup>。另一方面, 感知需要累积相干信号, 但通信的AAU由于收发切换等非理想因素, 不同时隙发送的LFM信号相位是非相干的, 该非相关相位不影响距离估计, 但会影响速度估计的相干累计, 因此感知系统对于采样抖动、频率偏移和相位噪声更为敏感。这对ISAC系统硬件同步和可靠性提出了更高的要求。

第2阶段, 实现波形和信号处理一体化。通过融合通信和感知的信息采集、传输、处理流程, 实现了对时域、频域、空域波形和信号处理技术的统一设计, 同时为感知和通信两个功能服务。传统通信和感知波形在实现双功能时存在不足, 通信信号的随机性与感知信号的确定性, 使得传统通信信号难以满足高精度感知要求。同样地, 将信息嵌入雷达波形进行通信也受到脉冲重复周期的限制, 无法满足高速传输需求。因此, 设计一体化波形需综合考虑通信和感知的功能需求与性能指标, 以实现高速率传输与高精度感知, 同时消除干扰。例如通感联合一体化波形OFDM-Chirp就是一种典型的设计, 通过频分复用将通信和感知数据分别调制到奇数子载波和偶数子载波上, 确保信号互不干扰, 同时保留通信信号的数据携带能力和LFM信号的低峰均比、低旁瓣特性<sup>[9]</sup>。这一设计为同时实现高精度感知和高效率通信提供了有效方案。

第3阶段, 实现跨层、跨模块、跨节点的深度融合, 以及通信与感知的完全一体化。将感知功能融入通信网络将形成大规模通感协同网络, 实现感知能力与通信能力的融合共生。一方面, 多ISAC基站将协同工作, 通过不同方位的观测获取目标多维信息, 提升感知灵敏度, 并扩大感知范围,

实现感知连续覆盖。另一方面, 基站间可共享感知数据, 通过对无线环境的感知与识别实现更精确的定位、更高效的频谱利用和更强的信号覆盖。未来多目标的实时感知、目标识别和复杂的通感数据交互处理, 将对系统架构设计和算力需求提出挑战。系统将集成通信、感知、计算和智能功能, 形成深度融合的通感算智超级无线基础设施平台<sup>[10]</sup>。

## 2.3 泛在智能: 引领通信智能化变革, 赋能绿色高效运维

### 2.3.1 场景需求

随着5G网络规模不断扩大, 业务场景日益丰富, 使得网络功能和管理变得愈加复杂。当前网络面临的挑战主要包括: 业务需求的多样化与传统网络策略之间的不匹配、基站能耗的精细化管理难题、海量关键性能指标(KPI)的及时处理以及网络隐患的智能识别等, 这些挑战推动了无线网络智能化的不断演进, 亟需智能决策和自动化技术来提升网络运维的效率。

### 2.3.2 关键技术

在5G-Advanced时代, 泛在智能聚焦于三大核心能力: 一是支撑业务智能化运营, 通过内生智能提高网络通信性能和用户体验; 二是通过智能节能技术促进绿色可持续发展, 减少运营成本; 三是实现网络部署运维的高度自动化。

#### 1) 业务智营

3GPP R17和R18持续扩展了网络数据分析功能(NWDAF)<sup>[11]</sup>。作为核心网智能化的核心网元, NWDAF通过数据采集、AI/ML模型训练和分析推理, 对网络的上下行带宽、时延、抖动等多维度指标进行综合分析, 并精准识别用户业务状态, 进而启用相应的网络侧保障机制, 确保用户体验的持续优化。此外, 随着R19版本的推进, 核心网和RAN的联合智能化将成为研究重点, 进一步提升网络的整体性能和用户体验<sup>[12]</sup>。

#### 2) 智能节能

基于AI业务场景的深度识别, 通过对历史话务数据、节能策略、配置信息数据训练分析, 一站一策地生成小区级节能策略, 实现符号关断、通道关断、小区关断、深度休眠、自动启停等多种节能功能在网络中的深度部署<sup>[13]</sup>, 实现低负荷时最低能耗, 高负荷时最高能效, 为能效优化场景赋能, 提升系统的自智能力

#### 3) 智能运维

大模型驱动的智能运维技术为网络运维带来了革命性的变化, 利用通信级行业语料增强的电信行业大模型能够理解并处理大量的网络日志、告警信息、配置文件等文本数据,

快速识别网络故障, 预测性能瓶颈, 提供优化建议<sup>[14]</sup>。此外, 大模型还能协助生成和解释复杂的网络配置指令, 简化网络管理过程, 甚至自动编写修复脚本, 显著提升网络运维的效率和准确性<sup>[15]</sup>。

AI 技术的集成和大模型的爆发式发展对算力的需求提出了前所未有的挑战。将计算能力与网络技术深度融合, 实现计算资源与网络资源的统一管理和优化调度, 构建算网一体新型基础设施, 是 5G-Advanced 演进中不可或缺的一环。算网一体还能够支持新兴的业务应用, 如 XR、云游戏等, 对于提升通信服务智能化水平具有重要意义。

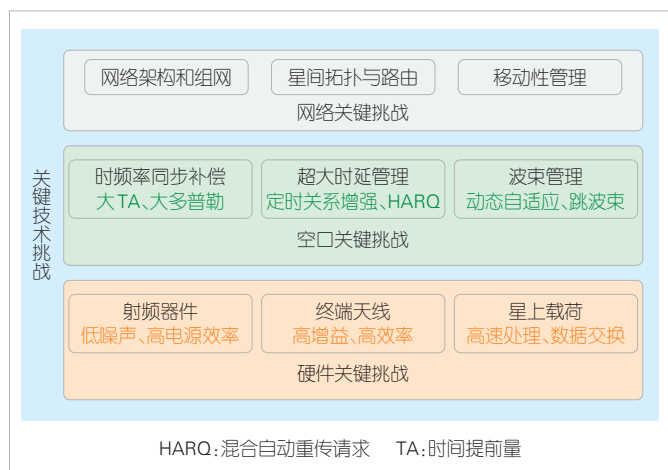
## 2.4 空天地一体: 星地融合, 泛在连接

### 2.4.1 场景需求

全球通信地面网络已取得显著成就, 但海域和偏远地区的仍面临覆盖难题。卫星通信以其独特的覆盖优势, 成为打破僵局的关键技术。众多领军企业如 SpaceX、AST SpaceMobile 和 OneWeb 等正积极研究卫星通信技术。然而, 现有卫星通信方式存在局限性, 专用卫星电话的庞大终端和高昂成本限制了其普及。非地面网络 (NTN) 将卫星的覆盖优势与移动通信标准融合, 实现空天海地无处不在的连接, 让智能手机和物联网终端可以直接连接卫星, 支撑应急通信、广域物联等应用, 开启“消费级”卫星通信时代。

### 2.4.2 关键技术

5G NTN 技术的主要目标是实现地面与卫星通信网络的融合, 形成统一的空口传输标准和组网架构, 并通过 IoT NTN 和 NR NTN 两个技术方向分别满足广域物联和无缝宽带服务的需求, 提供无处不在的网络连接。这涉及硬件设备、空口技术、网络技术等多个层面的关键挑战, 如图 3 所示。



▲图3 非地面网络(NTN)关键技术挑战

5G-Advanced 阶段将持续探索创新性的解决方案来克服这些挑战, 最终实现 5G 通信系统对空天海地多场景的统一。

#### 1) 硬件关键挑战

由于卫星距离地面较远, 信号在传输过程中会产生较大的路径损耗。对于轨道高度确定的卫星, 其最大传输距离也可以确定。例如, 低地球轨道 (LEO) 卫星不同频率下自由空间路径损耗范围约为 141.4~165.9 dB, 而地球静止轨道 (GEO) 卫星路径损耗则高达 191 dB<sup>[16]</sup>。为了弥补这种损耗, 射频器件需要配备更高发射功率的天线和达到更高的增益。但是提高天线增益通常需要增加天线的尺寸, 提高发射功率也会引起高能耗和散热问题。这对移动终端是一个挑战, 要求终端天线和射频器件能够在低功率下实现有效的信号接收和发射。这意味着射频器件在设计和制造过程中会变得更加精细和复杂。

3GPP 定义了透明转发和星上再生两种模式。透明转发模式下, 卫星仅对接收信号进行简单的放大, 并完成波束控制和频率转换, 处理流程简单, 成本较低, 但地面站的位置和数量会影响覆盖范围。星上再生模式需要复杂的星上处理<sup>[17]</sup>, 主要包括星载收发机和相控阵天线两大关键部分。其中, 星载收发机完成射频中频处理、基带调制解调以及链路层协议处理; 相控阵天线则实现快速波束成形和灵活的波束管理, 利用高增益的多点波束来有效降低干扰, 提高通信容量和覆盖范围。星上载荷在宇航空间环境中必须承受发射震动的考验, 还需要抵抗在轨辐照、真空及高低温循环交变。传统宇航级器件不仅价格高昂、制作周期长, 而且技术水平往往落后于商用现货 (COTS) 器件。因此, 在采用严格的可靠性保障措施的基础上, 将地面商用现货器件应用于空间环境, 将为卫星互联网提供低成本且可持续的运营支持<sup>[18]</sup>。

#### 2) 空口关键挑战

对于 GEO 卫星, 其轨道高度为 35 786 km, 单向信号传输时延至少需要 119 ms, 而 600 km 的 LEO 透明转发时延达到 14.2 ms<sup>[19]</sup>。由此可见, 超大时延对 5G 系统的定时关系提出了挑战。此外, 低轨卫星的高速运动将引起多普勒和定时变化, 终端将经历几万赫兹甚至兆赫兹级别的多普勒频移<sup>[20]</sup>, 严重影响帧同步。因此, 时频率的同步补偿将是星地空口融合传输技术的重中之重。

3GPP 标准针对 NTN 系统的超大时延和超高频偏问题, 提出了一系列针对性的解决方案, 涉及上行时间提前量 (TA) 调整、混合自动重传请求 (HARQ) 进程管理、增强的频率补偿等多个方面。具体包括: 1) 上行时间提前量 (TA) 调整, 配置全球导航卫星系统 (GNSS) 的设备可以利用卫星的已知轨道参数和 UE 的位置信息, 预测信号传播



的时间,并据此调整TA。方案同时引入上行时间同步参考点,基站可以指定用户设备补偿包括终端到卫星的服务链路和卫星到地面网关的馈电链路在内的所有时延,或者仅补偿服务链路时延。此外,为了补偿LEO移动引起的大定时漂移,基站可以向终端广播定时漂移信息<sup>[21]</sup>。2)引入可容忍时延的HARQ重传机制,支持动态调整HARQ超时时间,并引入处理长延迟的时序偏移,扩展物理下行共享信道(PDSCH)到HARQ的反馈时延以及上行调度到物理上行共享信道(PUSCH)传输时延;将HARQ进程数量扩展至16或32个,以确保任意时刻都有足够的HARQ进程可用,在UE缓存能力受限的情况下,可以关闭HARQ功能。此外,方案还引入预先确认机制。基站在发送数据之前,先发送一个预先确认信号给终端,以缩短终端等待确认的时间。3)实现增强的频率补偿,网络侧进行波束专用的公共频偏预补偿,UE利用位置信息、星历信息以及下行参考信息做频偏估计,并在UE侧完成上行专用频偏补偿。

### 3) 网络关键挑战

星间组网面临着多项挑战,其中星间拓扑和路由尤为关键。卫星在轨道上的高速移动会导致网络拓扑结构频繁变化,因此路由算法需要具备高度的动态性和自适应性,以确保数据包的可靠传输。同时为了满足全球无缝覆盖的通信需求,卫星网络的拓扑结构需要具有足够的冗余和连通性,以满足不同地区的通信需求。此外还需要建立高速可靠的星间通信链路,解决星间链路的建立、切换和故障恢复等问题。与传统的射频通信相比,激光通信具有更高的带宽、更低的功耗和更强的抗干扰能力,是实现星间高速数据传输和可靠连接的关键技术方案。

## 2.5 千亿物联:高中低速全场景应联尽联

### 2.5.1 场景需求

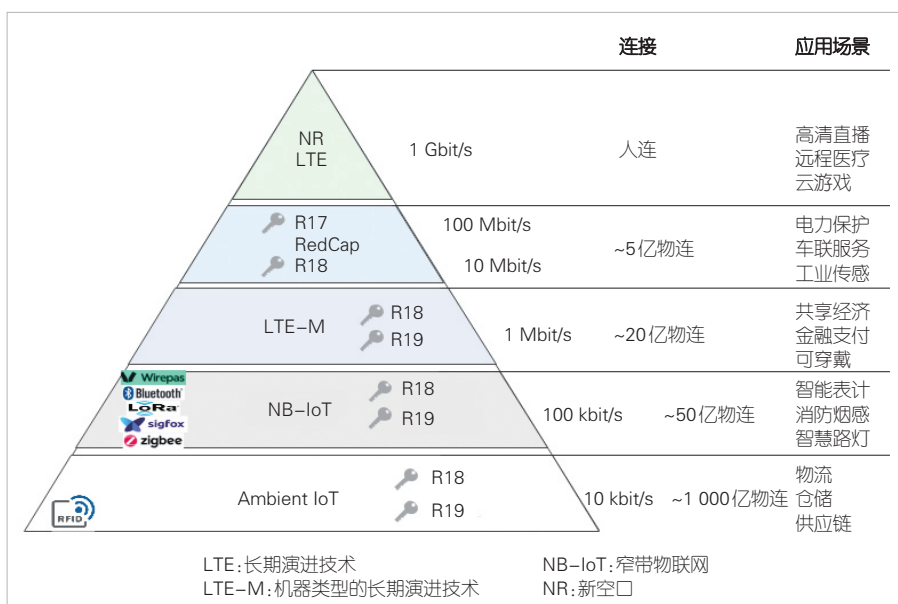
万物互联需要不同速率等级的物联技术,只有全场景、全类型的物联能力才能满足全行业的数智化转型需求,如图4所示。目前基本形成了窄带物联网(NB-IoT)、4G和5G多网协同发展的格局。5G-Advanced新引入了RedCap技术和无源物联网技术。其中,RedCap适配中高速物联需求,应用于工业传感、视频监控、可穿戴设备等领域<sup>[22]</sup>;无源物联网则凭借其无需供电和极低成本的独特性,开启一个千亿连接的新时代。

它支持自动化货物读取和追踪及仓储管理等。5G-Advanced的全面布局将进一步促进高中低速全场景应联尽联。

### 2.5.2 关键技术

RedCap与无源物联网作为未来物联发展的双引擎,分别针对不同场景展开广泛应用。其中RedCap是为了支持中高速物联网(IoT)场景而设计的<sup>[23]</sup>,其包括3个核心特性:一是低成本与低功耗设计,减少终端所需带宽和天线数量,优化数据传输机制减少不必要的网络交互,简化终端复杂度,在保持通信效率的同时显著降低能耗;二是继承5G网络的大带宽与低时延网络切片等核心特性,虽然简化了能力,但仍具备高速数据传输和实时响应的能力;三是与5G系统共存兼容,简化网络部署,实现平滑升级与互操作性。RedCap技术通过其成本效益、低功耗、继承5G核心特性和灵活的网络配置等关键特性<sup>[24]</sup>,为中高速物联场景提供了一个高效、经济的解决方案,推动了5G网络在物联网领域的广泛应用。

环境物联网(Ambient IoT)是一种极低成本的物联网技术,可以从环境中提取能量,并将其转换为可用的电能以支持设备的运行<sup>[25]</sup>。3GPP划分了3种能力的无源标签:Device A完全依赖散射通信,无能量储存能力,无独立信号生成能力,功耗小于1  $\mu$ W或小于10  $\mu$ W;Device B完全依赖散射通信,有储能能力和信号放大能力,但无独立信号生成能力,功耗约为100  $\mu$ W;Device C有储能能力和独立信号生成能力,复杂度比NB-IoT低很多,功耗约为1~10 mW<sup>[26]</sup>。针对传统射频识别(RFID)面临的挑战,Ambient IoT设计



▲图4 全场景全类型物联技术

基本原则是在不显著增加标签的成本、功耗、复杂度、体积的基础上,增加通信距离,降低读写器间干扰,支持低成本大规模组网,支持对标签的高精度定位。Ambient IoT关键技术包括:

1) 极简空口与信令设计:超低复杂度波形和调制,超低功耗、低复杂度前向纠错码,极简标签协议栈,必选信令仅有数十条,复杂度相比NB-IoT终端大幅简化,可支持蜂窝网空口数据收发。

2) 联合干扰抑制,提升通信距离:通过站间资源协同与联合调度优化,规避读写器间干扰,设计集中式收发与分布式激励,降低读写器激励信号对接收器的自干扰,同时借鉴蜂窝通信的多天线波束赋形、正交载波和编码等技术,提升接收灵敏度。

3) 蜂窝无源物联网架构设计: Ambient IoT设备支持局域网和广域网,需要设计端到端的网络架构,拓展蜂窝系统支持无源物联能力,实现广域标签定位与传感信息采集。目前3GPP Study Item阶段Ambient IoT就连接拓扑和频谱方面已达成了初步共识。

## 2.6 确定能力:确定性网络助力工业核心生产

### 2.6.1 场景需求

5G技术在工业核心生产流程的深入应用,对网络的确定性能力需求日益增长。工业领域需要低时延、低抖动和高可靠性的网络服务,传统的“尽力而为”网络服务模式已无法满足这些苛刻的需求。因此,行业迫切需要一种具备确定能力的5G-Advanced网络技术,提供毫秒级低时延、99.999%高可靠及微秒级抖动的极致确定性能力。

### 2.6.2 关键技术

5G在确定性网络技术上的演进分为3个发展阶段:阶段1聚焦5G与工业时间敏感网络(TSN)的融合(R16引入)。5G TSN在园区范围内,协助移动化终端接入工业TSN,使终端摆脱线缆束缚,实现灵活移动<sup>[27]</sup>;阶段2聚焦5G网络支持时间敏感通信(TSC)技术(R17引入)。TSC技术通过强化5G网络的时间同步精度、数据包传输的确定性等,使得5G无须依赖外部TSN即可构建独立的确定性服务专网,从而简化部署流程<sup>[28]</sup>。阶段3聚焦5G与确定性网络(Det-Net)技术的集成(R18引入),实现广域范围内的确定性数据传输保证。集成DetNet后,5G工业专网不仅能够实现本地高效协同,还能与全球范围内的工业网络无缝对接,促进产业链上下游的紧密合作<sup>[29]</sup>。除了TSN、TSC、DetNet这三项

核心技术外,构建全面的5G确定性网络还需整合多种通信技术,如URLLC、5G局域网(5G LAN)、网络切片、服务质量(QoS)保障机制,以及承载层的Flex-E、专线、多协议标签交换流量工程(MPLS TE)、Ipv6段路由(SRv6)等技术。这些技术的融合与协同是构建端到端确定性服务的基础。

5G-Advanced的网络将形成服务等级协议(SLA)确定性闭环保障体系<sup>[30]</sup>,即通过5G-Advanced网络对业务特征的智能感知,跨网络域协同调度保障、低时延高可靠的空口传输技术、SLA度量反馈可以形成闭环的保障体系。首先SAL业务保障平台自动识别业务流特征,然后基于匹配业务及网络特征完成RAN+核心网的联合编排与智能调度,通过灵活带宽配置适配业务带宽需求,通过灵活时隙配置降低业务时延,并通过保守调度和冗余传输机制来提供高可靠的数据传输能力。最后系统进行SLA测量反馈,包括用户体验数据速率、端到端时延、包可靠性等精确的度量指标。网络根据测量结果进行闭环调整。这种确定性闭环保障体系,在引入闭环反馈机制后,避免了传统“切片+5G服务质量标识符(5QI)”静态配置方式中的资源浪费,以最少的网络资源满足不同业务的差异化体验需求,实现业务体验及网络资源效率的双优。

## 3 结束语

作为5G到6G承上启下的关键阶段,5G-Advanced将在现有5G成果的基础上,基于无缝万兆、全域通感、空天地一体、泛在智能、千亿物联、确定能力六大场景,持续提升能力。同时,5G-A的六大场景也将平滑地衔接6G网络,为6G网络打下坚实基础,为构建一个更加智能、高效、互联的未来社会提供强有力的技术支撑。

### 参考文献

- [1] CHEN W S, LIN X Q, LEE J, et al. 5G-advanced toward 6G: past, present, and future [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2023, 41(6): 1592-1619. DOI: 10.1109/JSAC.2023.3274037
- [2] LIN X Q. An overview of 5G advanced evolution in 3GPP release 18 [J]. IEEE communications standards standards magazine, 2022, 6(3): 77-83. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2200001
- [3] GAPEYENKO M, PETROV V, PARIS S, et al. Standardization of extended reality (XR) over 5G and 5G-advanced 3GPP new radio [J]. IEEE network, 2023, 37(4): 22-28. DOI: 10.1109/MNET.003.2300062
- [4] CHEN W S, MONTJOJO J, LEE J, et al. The standardization of 5G-advanced in 3GPP [J]. IEEE communications magazine, 2022, 60(11): 98-104. DOI: 10.1109/MCOM.005.2200074
- [5] CHEN W, JAIN P. 3GPP release 18 overview: a world of 5G-advanced [Z]. 2023
- [6] WANG C, LI C, ZHONG Z M, et al. Characteristics of 5.3 GHz MIMO

- channels with an extremely large antenna array in urban macro scenarios [C]//Proceedings of IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring). IEEE, 2022: 1–5. DOI: 10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860785
- [7] WEI X G, LI J, LIANG C L, et al. Performance analysis of subband full duplex for 5G-advanced and 6G networks through simulations and field tests [J]. IEEE open journal of the communications society, 2023, 4: 2451–2467. DOI: 10.1109/OJCOMS.2023.3322592
- [8] 李萍, 郭晓江. 通感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] 陈大伟, 向际鹰, 陈诗军, 等. 5G-A 通感一体化的场景、挑战及关键技术 [J]. 邮电设计技术, 2022, (8): 23–8
- [10] 段向阳, 杨立, 夏树强, 等. 通感算智一体化技术发展模式 [J]. 电信科学, 2022, 38(3): 37–48. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022039
- [11] HE X W, YANG Z M, XIANG Y, et al. NWDAF in 3GPP 5G advanced: a survey [C]//Proceedings of 3rd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science (EIECS). IEEE, 2023. DOI: 10.1109/eiecs59936.2023.10435433
- [12] 李爱华, 吴晓波, 陈超, 等. 5G 网络大数据智能分析技术 [J]. 电信科学, 2022, 38(8): 129–139. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022052
- [13] BHAT Z A, SOFI I B, MASOODI I S. Smart energy-saving solutions based on artificial intelligence and other emerging technologies for 5G wireless and beyond networks communications [M]//Energy Systems in Electrical Engineering. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 77–95. DOI: 10.1007/978-981-99-8771-9\_5
- [14] NIKBAKHT R, BENZAGHTA M, GERACI G. TSpec-LLM: an open-source dataset for LLM understanding of 3GPP specifications [J]. arXiv e-prints, 2024: arXiv: 2406.01768. DOI: 10.48550/arXiv.2406.01768
- [15] ZHOU H, HU C M, YUAN Y, et al. Large language model (LLM) for telecommunications: a comprehensive survey on principles, key techniques, and opportunities [EB/OL]. [2024-06-15]. <http://arxiv.org/abs/2405.10825>
- [16] 李文娜. 小卫星通信系统关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012
- [17] SAAD M M, TARIQ M A, KHAN M T R, et al. Non-terrestrial networks: an overview of 3GPP release 17 & 18 [J]. IEEE Internet of Things magazine, 2024, 7(1): 20–26. DOI: 10.1109/IOTM.001.2300154
- [18] 曹舟. 采用 COTS 器件的低轨星载收发信机设计与实现 [J]. 电讯技术, 2020, 60(8): 890–895. DOI: 10.3969/j.issn.1001-893x.2020.08.005
- [19] 廖德山, 柴丽, 孙建成, 等. 5G NTN 关键技术与演进展望 [J]. 电信科学, 2022, 38(3): 10–21. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022056
- [20] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望 [J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25–36
- [21] 叶向阳, 单单, 韩春娜, 等. 5G NTN 定时提前调整策略分析 [J]. 邮电设计技术, 2023(9): 58–62. DOI: 10.12045/j.issn.1007-3043.2023.09.011
- [22] VARSIER N, DUFRÈNE L A, DUMAY M, et al. A 5G new radio for balanced and mixed IoT use cases: challenges and key enablers in FR1 band [J]. IEEE communications magazine, 2021, 59(4): 82–87. DOI: 10.1109/MCOM.001.2000660
- [23] ANBALAGAN S N, CHIUMENTO A, HAVINGA P. Fine grained vs coarse grained channel quality prediction: a 5G-RedCap perspective for industrial IoT networks [C]//Proceedings of IEEE 20th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). IEEE, 2024: 1–7. DOI: 10.1109/WFCS60972.2024.10540787
- [24] VEEDU S N K, MOZAFFARI M, HÖGLUND A, et al. Toward smaller and lower-cost 5G devices with longer battery life: an overview of 3GPP release 17 RedCap [J]. IEEE communications standards magazine, 2022, 6(3): 84–90. DOI: 10.1109/MCOMSTD.0001.2200029
- [25] BUTT M M, MANGALVEDHE N R, PRATAS N K, et al. Ambient IoT: a missing link in 3GPP IoT devices landscape [J]. IEEE Internet of Things magazine, 2024, 7(2): 85–92. DOI: 10.1109/IOTM.001.2300198
- [26] 黄伟, 谭俊杰, 简荣灵, 等. 面向蜂窝化的反向散射通信综述: 关键技术与标准化研究 [J]. 移动通信, 2023, 47(8): 46–59. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.20230623-0002
- [27] 张强, 王卫斌, 陆光辉. 工业互联网场景下 5G TSN 关键技术研究 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(6): 21–26. DOI: 10.12142/ZTETJ.202006006
- [28] MANNWEILER C, GAJIC B, ROST P, et al. Reliable and deterministic mobile communications for industry 4.0: key challenges and solutions for the integration of the 3GPP 5G system with IEEE [C]//Proceedings of Mobile Communication – Technologies and Applications; 24. ITG-Symposium. VDE, 2019: 1–6
- [29] ABUIBAID M, GHORAB A, SARUHAN A A, et al. Integration of DetNet/TSN reliability functions in 5G systems: a case study and measurements [C]//Proceedings of IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). IEEE, 2023: 369–375. DOI: 10.1109/CSCN60443.2023.10453205
- [30] 中兴通讯. 5G 工业现场网白皮书 [R]. 2023

## 作者简介



王伟, 中兴通讯股份有限公司无线产品资深专家; 主要研究方向为无源物联网、非地面网络、智能超表面、太赫兹等, 以及相关技术的原型系统研发。



张诗壮, 中兴通讯股份有限公司无线研究院副院长; 主要研究方向为 5G/6G 应用场景和系统架构设计。



李晓帆, 中兴通讯股份有限公司无线算法资深专家; 主要研究方向为 5G-A 及 6G 关键技术, 涵盖通信感知一体化、人工智能增强的无线通信、无线网络数字孪生等。



芮华, 中兴通讯股份有限公司算法预研资深专家、6G 智能与未来科技实验室负责人; 主要研究领域为数字孪生、AI-RAN、通信大模型、毫米波通感一体、下一代卫星网络、无源物联网等。



# 高阶自智网络关键技术及应用



## Key Technologies and Applications of High Level Autonomous Networks

孙方平/SUN Fangping, 钱铮铁/QIAN Zhengtie

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

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404012

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240725.1228.002.html>

网络出版日期: 2024-07-25

收稿日期: 2024-06-05

**摘要:** 探讨了自智网络在通信业界的普及与演进, 并着重分析了两种推动自智网络向高阶发展的关键驱动力: 大模型 (LLM) 和数字孪生技术。大模型在通信网络中的应用展现了其不可替代的优势, 并且持续演进的新技术如检索增强生成 (RAG) 正逐步提升其适配通信网络场景的能力。在实际应用中, 大小模型的结合以及多 AI 智能体的协同工作, 为处理复杂场景分析和执行任务提供了有效手段。数字孪生技术则为高阶自智网络的发展提供了控制风险的重要工具, 其深化应用需关注的技术焦点包括特征网络模型的精准构建、高效的数据管理技术以及分布式数字孪生系统的完善。大模型和数字孪生技术的融合, 不仅有助于网络深入理解用户意图, 实现自主决策和执行任务, 更为自智网络迈向高阶阶段提供了坚实的技术支撑。

**关键词:** 自智网络; 大模型; 数字孪生

**Abstract:** The popularity and evolution of autonomous network in the communication industry are introduced, focusing on the analysis of large language model (LLM) and digital twins as key driving forces for advancing autonomous network to a higher level. The application of LLM in communication networks demonstrates their irreplaceable advantages, and evolving technologies such as retrieval-augmented generation (RAG) are gradually enhancing their adaptability to communication network scenarios. In practical applications, the combination of large and small models, along with the collaborative work of multiple AI Agents, provides effective means for handling complex scenario analysis and task execution. Digital twin technology offers an important tool for risk control in the development of high-level autonomous networks, with technical focuses including the precise construction of feature network models, efficient data management techniques, and the refinement of distributed digital twin systems. The integration of LLM and digital twin technology not only helps networks deeply understand user intentions, make autonomous decisions, and execute tasks, but also provides solid technical support for autonomous network to move towards a higher stage.

**Keywords:** autonomous network; large language model; digital twin

**引用格式:** 孙方平, 钱铮铁. 高阶自智网络关键技术及应用 [J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 77-82. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404012

**Citation:** SUN F P, QIAN Z T. Key technologies and applications of high level autonomous networks [J]. ZTE technology journal, 2024, 30(4): 77-82. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404012

随着通信网络的不断发展, 运营商移动通信网络的总体规模不断扩大, 多频多制式的引入使得网络结构越发复杂。同时, 各种新兴业务层出不穷, 面向客户 (ToC) 和面向业务 (ToB) 的需求各异, 各种类型、能力不同的终端接入也增加了网络的多样性。这些问题给网络的运维和优化带来了巨大的挑战。传统的网络建设和运维模式下, 网络自动化水平较低, 网络生命周期各阶段存在断裂, 导致“规划、建设、维护、优化”等环节之间的人力成本高昂, 运营支出 (OPEX) 成为运营商日常开支的重要组成部分。因此, 运维高度复杂化是通信网络发展面临的主要挑战之一<sup>[1]</sup>。

为了应对上述挑战, 自动化和智能化成为未来网络建设

和运维的重要发展方向。2019年, 国际电信管理论坛 (TMF) 提出了自智网络 (AN) 的概念, 旨在构建网络全生命周期的自动化、智能化运维能力。TMF定义了自智网络的等级划分, 并将网络自智能能力由低到高划分为L0至L5级, 如图1所示。

中国移动于2021年就提出了“2025年达到L4级高阶自智网络”的目标并在全网启动实践。中国移动认为, L4分级特征为“核心场景自动化率达95%, 网络弹性供给、体验主动保障、资源动态孪生、能效全局优化、作业一键执行、运维融智赋能”<sup>[2]</sup>。

尽管当前用于指导通信运营商规划和部署高阶自智网络

自智网络等级	L0 人工运维	L1 辅助运维	L2 部分自智网络	L3 条件自智网络	L4 高度自智网络	L5 完全自智网络
执行	P	P/S	S	S	S	S
感知	P	P/S	P/S	S	S	S
分析	P	P	P/S	P/S	S	S
决策	P	P	P	P/S	S	S
意图/体验	P	P	P	P	P/S	S
适用性	不涉及	选定场景				所有场景

注：P指人(手工)，S指系统(自主)

▲图1 国际电信管理论坛(TMF)对自智网络等级的定义

仍需要进一步细化和完善，但向更高阶自智能能力的演进已是大势所趋。根据TMF的调研，全球91%的通信服务提供商有建设自智网络的愿景，70%的通信服务提供商将投资网络基础设施，以实现自动化。除了中国移动、AIS、中国电信、中国联通、MTN集团、Orange集团等也设定了在2025年达到L4高阶自智网络的目标<sup>[3]</sup>。

人工智能和数字孪生技术作为通信网络向更高阶自智能能力演进的技术手段已成为业界共识。随着ChatGPT的发布，大模型（LLM）的语言理解和泛化能力拓展了人工智能技术在自智网络领域应用的广度和深度，其准确度也随着检索增强生成（RAG）技术的引入不断提升。同时，随着网络内生智能和感知能力的提升，数字孪生从局部网络扩展到整体网络，并逐步应用于精准规划、配置模拟、网络故障预测等诸多场景，降低现网风险。

## 1 大模型

面对日益复杂的通信网络和层出不穷的用户需求，以人工为中心的运维模式难以为继。自2010年以来，人工智能技术在通信网络中已经逐步应用于“规、建、维、优、营”各个阶段，典型的场景如故障预测、智能节电、流量预测、数据中心温度调节等。这些基于机器学习和专家经验的人工智能技术在基于预定义的规则执行逻辑推理任务等场景表现较好，但对自然语言的处理能力有所欠缺，且其泛化推理能力较弱，制约了人工智能技术在通信网络中应用的深度和广度。

自2006年HINTON提出通过逐层无监督预训练解决深层网络训练难题以来，深度学习在多个领域取得突破，经历了从标注数据监督学习到预训练模型，再到大模型的转变。大模型通常是指具有大规模参数和复杂计算结构的机器学习模型。这些模型通常由深度神经网络构建而成，拥有数十亿

甚至数千亿个参数。当训练参数不断扩大，达到一定临界规模后，机器模型就会表现出更复杂的能力特性，如从原始训练数据中自动学习并发现新的、更高层次的特征和模式，这种能力被称为“涌现能力”。2022年底，OpenAI发布的ChatGPT引发了广泛关注，展现了大模型在多场景、多用途、跨学科任务处理的能力。大模型被认为是未来人工智能领域的关键基础设施。

大模型应用于通信网络，通过千亿级别通信领域数据的充分预训练，利用更多参数和更复杂的结构准确表达通信领域数据分布和复杂特征，并利用其高效精调和少样本学习模式快速适配复杂场景化需求，为自智网络的用户意图理解、网络状态分析、问题根因识别、解决方案生成等难点提供了可行的解决方案。

### 1.1 大模型的缺陷及改进

尽管大模型在许多任务上表现出色，但目前应用于通信网络仍存在一些缺陷，其中较为突出的是幻觉和知识实时性更新难题。解决和减轻这些缺陷问题对于大模型在通信领域的应用尤为重要。

1) 幻觉：幻觉是指在生成事实类文本时，生成的信息与现有来源相冲突（内在幻觉），或无法通过现有来源验证（外在幻觉）。幻觉会误导大模型生成非预期的输出，并且在大部分时候会降低模型性能。通信网络对准确性要求极高，一个错误的输出往往会带来灾难性后果。因此，如何减轻和消除幻觉问题对于大模型在通信网络的应用是一个关键研究方向。

2) 知识实时性：在需要使用比训练数据更新的知识处理任务时，大模型通常会遇到困难。一个直接的方法是定期将新数据更新至大模型中，但增量训练成本较高，且可能会导致知识遗忘问题。现有的研究已探索一些利用外部知识源补充大模型的方法，如ChatGPT使用检索插件来访问最新的信息源<sup>[4]</sup>。通信网络的技术变更极快，大模型需要能够快速低成本地获取新知识。

大模型的幻觉和知识实时性问题可通过增量预训练方法缓解，但这种方法存在明显缺点：成本较高且不够灵活，外部插件形式又过于冗杂。文献<sup>[5]</sup>提出了一种更为灵活的RAG技术。该研究将生成模型与检索模块结合起来，能够从易于更新的外部知识源中获取额外信息。RAG技术在解决大模

型幻觉和知识实时性问题方面更加有效。它会重定向大模型,从权威的、预先确定的知识来源中检索相关信息,组织更好的文本输出,并且使用户可以深入了解大模型如何生成响应。

RAG 的工作原理为:在用户输入提示词和问题后,首先在知识库中对问题进行检索。该知识库包含训练数据集之外的新数据(通常称为外部数据),存储向量化的文档,并建立索引以优化检索效率。检索过程中,用户问题将被转换为向量形式,并基于语义或关键词与知识库内数据进行匹配。完成检索后,系统将检索得到的内容作为原始问题的增强语料信息,与问题一同注入到大模型的提示词中,引导模型生成准确答案。RAG 通过外部知识库引入特定领域知识,当外部数据过时,可通过更新向量知识库来更新知识,无须对模型进行调整<sup>[6]</sup>,如图2所示。

相比于模型预训练或精调,RAG 技术能够有效减少幻觉问题,提高回答准确性。在中兴通讯自主研发的基于 RAG 的产品告警故障问答模型中,问题检索准确率可达 90% 以上,同时避免了新知识引入时需要频繁训练模型的问题。

## 1.2 大模型技术在自智网络中的应用

在向高阶自智网络演进过程中,为实现更高度的智能化和闭环能力,大模型在通信领域的应用具备以下特点:

### 1) 向 AI Agent (AI 智能体) 发展

AI Agent 是一种能够感知环境、自主决策和执行动作的智能实体。目前大模型与人类之间的交互仍是被动式的,即模型基于 Prompt 输入产生输出。而 AI Agent 可以基于用户给出的目标,详细拆解出每一步的计划步骤,依靠来自外界的反馈和自主思考,自主创建 Prompt 来实现目标。这种具备独立思考和决策并逐步完成给定目标的能力,是 Agent 与传统人工智能的最大区别。

基于不同的智能体数量, AI Agent 架构可分为单智能体和多智能体两种架构,如图3所示。单智能体由一个语言模型驱动,独立完成所有的推理、规划和工具执行。多智能体架构涉及两个或更多的智能体,每个智能体可以使用相同或不同的语言模型,可以访问相同或不同的工具。多智能体架构拥有广泛的组织形式,从任务分配模式维度来看,多智能体架构可分为水平架构和垂直架构<sup>[7]</sup>。

- 垂直架构:在该结构中,一个智能体充当领导者并分配任务,其他智能体负责向其报告。

- 水平架构:在该结构中,所有智能体是平等的,智能体不需要由领导智能体分配任务,可以自发完成特定任务或调用工具。

在通信网络向高阶自智演进过程中,跨域场景和高度综合性任务逐渐增加,多智能体架构应用前景广阔。

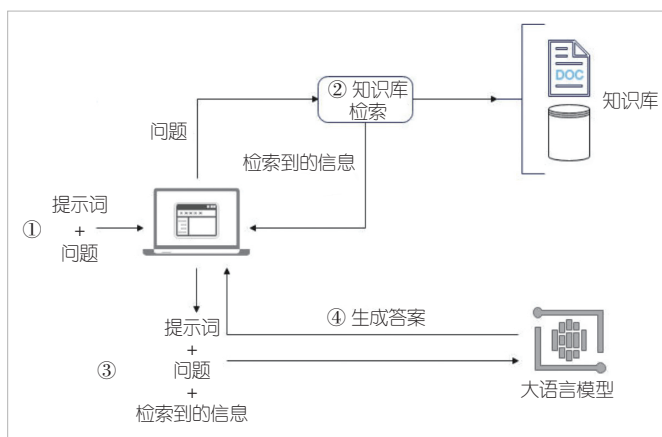
### 2) 大小模型结合

基于机器学习的小模型(参数量小于 10 亿的机器学习模型)已在单域自智网络的网络规划、网络优化、故障预测等多个领域应用。这类模型针对特定场景的处理能力强、可靠性高、规模小容易部署。小模型与大模型的复杂问题求解能力和泛化能力具有互补性,通常先采用小模型完成特定任务,再将结果推送至大模型,分级处理复杂场景问题。

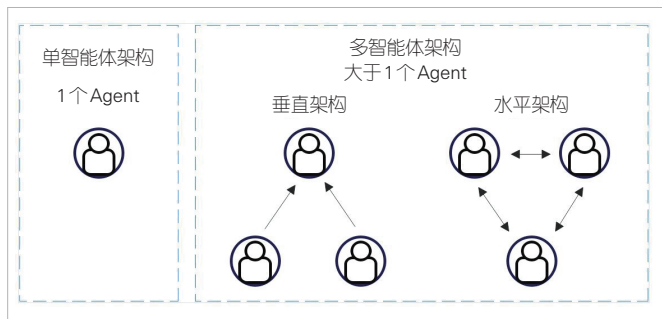
### 3) 按场景逐步推进

根据场景对准确度和风险影响程度的要求,大模型在自智网络中的应用需要逐步推进。在初级阶段,大模型主要应用于精度要求低、风险不高、实时性要求低的非核心业务,例如知识问答、文案生成、客户投诉辅助等场景,为网络运维人员提供知识指引。当前,大模型在初级阶段的应用比较多。

在扩展应用阶段,大模型逐步向数据多模态、高可靠性、实时、高精度场景扩展,例如工单生成、故障处理、网络变更、网络配置、网络事件处置等场景。该领域应用目前还处于探索阶段,为确保安全,一般需要专家审核或随时介入接管,成熟应用少,技术演进较快。



▲图2 检索增强生成(RAG)工作流程<sup>[6]</sup>



▲图3 AI Agent 架构



通信网络投诉处理和用户咨询服务是关键的客户服务环节,传统的方式存在一些痛点:手动处理投诉工单和用户咨询需要大量人力资源和时间,容易导致处理效率低下和耗时过长;由于人工处理的主观性,可能存在分类不准确、处理不规范等问题,影响服务质量和用户体验;另外,传统的问题响应和排障流程通常依赖于专家的经验 and 能力,响应速度慢、效率低下,无法及时满足用户需求,进一步降低了服务水平。中国信息通信研究院基于通信领域大模型,借助自然语言识别,意图识别能力实现了投诉工单的自动分类,同时提供了对应分类的应用程序编程接口(API)调用能力,为后续处理流程提供了支持。基于预训练模型驱动的数字专家系统,为专家提供了问题响应、排障和定制化问题服务的智能支持,提高了问题响应速度和客户满意度,全面提升了运维效率和服务质量。

在通信网络故障检测场景中,中兴通讯利用星云通信大模型的Function call和API映射能力,在故障发现和故障分析环节,对结构化数据模型进行协同编排。利用可预测模型快速完成异常检测、告警关联汇聚,大模型根据结果输出,再进行二次分析,总结生成故障摘要。在故障处置方案推荐、方案执行、质检闭环等环节,通过大模型的RAG能力检索历史故障案例,生成处置方案;人机交互完成意图识别和转交、执行故障自愈指令;然后进行交互质检,自助查询告警状态,最后通过大模型完成关联知识抽取,实现知识回收。中兴通讯探索实践大小模型协同,可进行复杂故障事件的综合分析,准确率达到85%以上,实现1 min故障发现、7×24 h自主监控值守。在重大活动保障场景中,重保专家Agent、重保助理Agent、监控专家Agent、故障专家Agent等多个智能体协同工作,使人力投入减少30%。

大模型的应用不仅解决了通信领域传统服务中的诸多痛点,还为基于意图的自智网络建设提供了更加智能和便捷的解决方案。未来,随着技术的不断进步和应用场景的不断扩展,大模型在通信领域的作用将变得更加重要,为行业的数字化转型和智能化发展注入强大动力。

## 2 数字孪生

数字孪生技术是一种利用数字化模型和仿真技术来创建现实世界实体或系统的虚拟副本的方法。该技术在通信领域的应用为数字孪生网络,即通过创建物理网络的虚拟镜像,构建与物理网络相同的网元、拓扑、数据,并提供网络配置验证、新技术验证等功能。数字孪生网络可以大大降低现有网络风险,减少误配置导致的网络故障。例如,在配置生成和优化任务执行过程中,数字孪生可以帮助网络运营商评估

各种配置方案的风险和影响,从而指导决策和行动。

数字孪生网络通过物理网络和虚拟网络的实时交互,帮助网络进行低成本试验、智能决策和高效创新,进而帮助网络实现极简智能运维<sup>[9]</sup>。

### 2.1 数字孪生网络的关键原则

面向高阶自智网络的数字孪生,是一种包含新技术设计和验证、网元开发和部署、网络规划和建设、网络性能和运维等多维度、全网络生命周期的网络。构建通信网络数字孪生结构重点关注以下原则<sup>[9]</sup>:

1) 解耦:将物理对象和数字孪生对象解耦,以实现操作灵活性。整体架构应符合分层架构模式,分为不同的系统和层。每个系统和层都以自操作模式运行,并隐藏域内详细信息。

2) 极简网络:极简网络将网络功能分解为微服务,使网络运行在以微服务为中心的架构上。极简网络和数字孪生网络之间的接口应提供简化的交互能力,用于交换感知数据和信息、映射数字空间和实时反馈。

3) 内生智能:内生智能是极简网络和数字孪生网络内部模型的核心原则。基于内生智能,极简网络和数字孪生网络可以引入更多的实时感知组件和AI推理能力,以提高对资源、服务和周围环境的可观测性或数字感知能力。

4) 分布式:具有分布式机器学习能力的数字孪生系统可以提高模型性能和模型准确性,并支持更大的数据输入。

5) 自智:自智网络可以被划分为多个功能完备的子域,子域之间可以进行跨域协同。数字孪生技术也应支持这种架构,具备单域的独立自管理能力,也可以进行域间协同。

6) 自动闭环:自动闭环是网络自动化的监督者。在意图驱动自智网络中,意图用于控制闭环自动化,这意味着意图可以转换为策略和管理任务来执行闭环自动化。

基于以上原则的数字孪生网络,可以更精确地定位原生物理网络,且有更高效的数据交互、意图沟通和意图闭环能力,更适用于面向未来的6G端到端网络。

### 2.2 数字孪生网络关键技术

为了实现基于以上原则的数字孪生网络,应重点关注以下技术:

1) 特征网络模型构建:数字孪生网络除了反映物理网络的实时状态外,还可以构建具有网络特定特征的数字孪生网络模型。不同业务场景所需的网络特征具有可变性,在孪生网络中创建、验证和优化时,往往需要具有不同特征的网络状态,不一定是网络的实时状态<sup>[10]</sup>。基于网络模型描述构

建特征网络模型将是6G数字孪生网络的关键技术。

2) 高效数据管理技术: 在数字孪生网络中, 数据是公认的重要元素。数字孪生网络的数据复杂庞大, 数据的全生命周期管理涉及采集、传输、存储、使用和销毁等。因此, 数据元素的准确使用关系到数字孪生网络的成功与否<sup>[11]</sup>。数字线程<sup>[12]</sup>、Data Fabric<sup>[13]</sup>等技术可能在未来的研究中被用于解决数字孪生网络数据管理问题。

3) 分布式数字孪生系统: 数字孪生网络是实时监控通信网络全域状态的虚拟数字网络, 包括用户、接入网、传输网、核心网、管理系统等。基于庞大的数据集构建数字孪生网络将是一项挑战。为了应对这一挑战, 可以采用分布式孪生模型架构。通过划分物理区域和功能域来构建分布式小型数字孪生系统, 可大大减少数字孪生系统的设备数量和信息数量。同时物理网络的信息采集和物理网络与孪生信息的同步将更加实时, 数字孪生网络的运行效率也将进一步提高。

### 2.3 数字孪生技术在自智网络中的应用

数字孪生技术能够通过模拟真实网络的运行状态和行为, 实现对网络的实时监测、预测和优化, 从而提高网络的可靠性、智能化水平和服务质量。此外数字孪生技术与通感一体化、微服务、算网一体架构等相互融合, 能够为数字孪生提供数据、通信、算力等全方位保障, 进一步增强了其在通信领域的应用效果。

在故障排查领域, 中国移动通过数字孪生系统准确地发现了某省服务网关(SGW)缺省承载建立成功率下降的问题, 提前预警告知客户并定位设备问题, 从而有效缩短了问题排查时间。此外, 中国移动基于数字孪生平台, 实现了对IP端承载网端口故障、城域网上联单边聚合链路中断等多类告警跨域定界的功能, 协助某省在短时间内完成了多项故障预警<sup>[14]</sup>。

在无线基站资产生命周期管理过程中, 站点勘察、信息校准、资产管理自动化率低等问题长期制约着无线基站资产管理的效率。针对以上痛点, 中兴通讯利用数字孪生技术进行无线

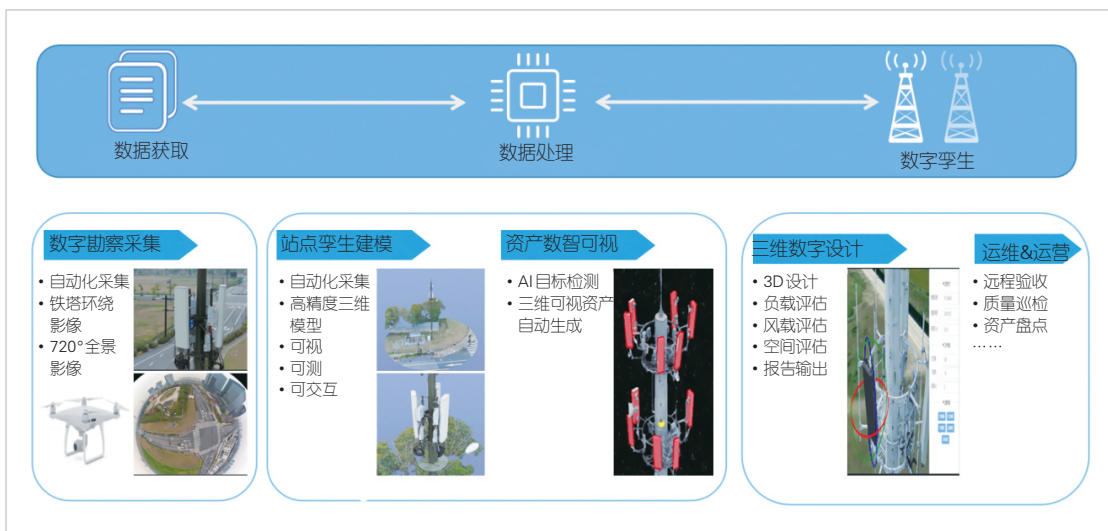
基站资产管理。如图4所示, 该方案基于无人机自动飞行控制技术构建站点的三维模型, 并借助图像识别技术构建特征模型, 对三维模型进行单体化识别、分割和设备匹配, 生成相应的数字资产。这些数字资产能够支持站点设计中的空间评估、承载评估和辐射评估等工作, 从而显著提升无线基站资产管理的效率和精度。

### 2.4 大模型和数字孪生技术的结合

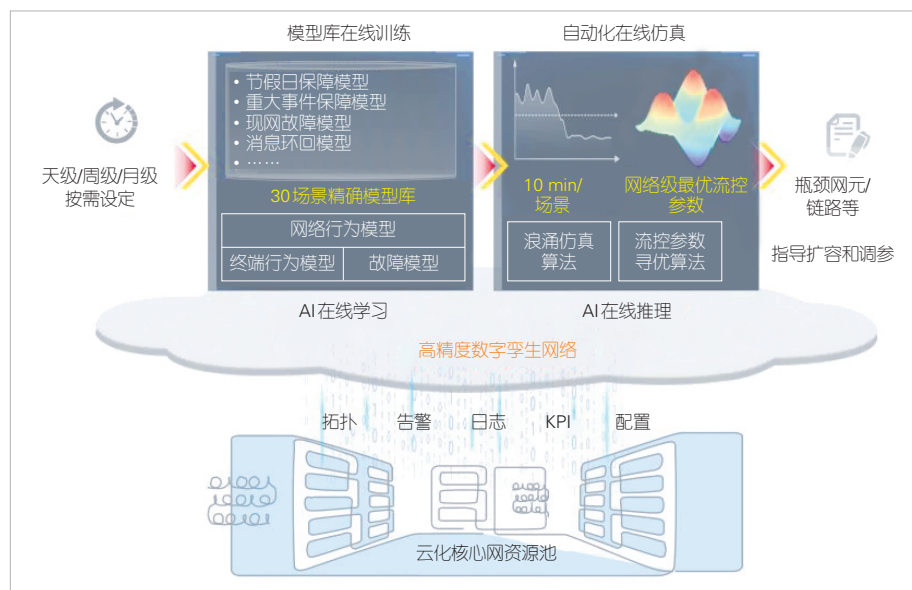
大模型和数字孪生技术的组合应用逐步成为高阶自智网络演进的新技术方向。为解决大模型生成结果的概率性偏差和通信网络方案实施准确性要求之间的矛盾, 业界已经开始利用数字孪生系统对大模型生成实施方案的仿真和校验, 以减少或消除大模型生成结果的偏离直接实施于通信网络带来的风险。

在智能运维场景中, 中国移动通过大模型对网络行为的学习和训练, 构建不同场景下的自动容灾策略, 基于数字孪生系统, 在不影响现网的情况下进行在线仿真, 将容灾评估时长由两周缩短至10 min, 从而提高网络系统容灾评估效率, 降低运维成本, 如图5所示。在防汛通信保障场景中, 中国移动利用数字孪生技术构建空间孪生地图, 实现灾情监控, 并结合大模型的分析能力, 自动制定可执行的抢修策略及安置点位置推荐, 辅助指挥调度决策, 使灾情研判调度效率由天粒度缩短至小时粒度, 灾情恢复质量评估时长由6 h起缩短至30 min左右, 显著提升保障效率<sup>[15]</sup>。

未来, 在通信领域中, 数字孪生技术与大模型的结合应用将更加多样化, 如基于大模型的生成能力辅助构建通信网络的数字孪生系统, 降低构建数字孪生系统的成本和时间。



▲图4 数字孪生重塑站点资产生命周期管理



▲图5 基于大模型+数字孪生的智能容灾方案<sup>[5]</sup>

### 3 结束语

自智网络向高阶的演进将是一个巨大的飞跃。本文探讨了自智网络的主要关键技术,其中大模型和数字孪生等技术通过其强大的语义理解能力和实时仿真技术,为自智网络应对迈向高阶的挑战提供了重要支持。它们可以帮助通信网络理解用户意图、自主决策和执行任务,从而提升通信网络在规、建、维、优、营各阶段的效率和服务质量。新技术在自智网络中的应用逐步成熟,必将推动通信网络实现自动化和智能化。

### 参考文献

- [1] LIU G Y, LI N, DENG J, et al. The SOLIDS 6G mobile network architecture: driving forces, features, and functional topology [J]. Engineering, 2022, 8: 42–59. DOI: 10.1016/j.eng.2021.07.013
- [2] 中国移动. 中国移动自智网络白皮书(2023) [R]. 2023
- [3] TM Forum. Autonomous networks: empowering digital transformation [R]. 2023
- [4] OpenAI. ChatGPT plugins [EB/OL]. [2024–06–15]. <https://openai.com/index/chatgpt-plugins/>
- [5] LEWIS P, PEREZ E, PIKTUS A, et al. Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive NLP tasks [EB/OL]. [2024–06–15]. <http://arxiv.org/abs/2005.11401>
- [6] BULB. Retrieval-augmented generation (RAG): from theory to langchain implementation [EB/OL]. [2024–06–15]. <https://www.bulbapp.io/p/46eb00e7-c08e-447c-9bc6-283edae5e889/retrieval-augmented-generation-rag-from-theory-to-langchain-implementation>
- [7] MASTERMAN T, BESEN S, SAWTELL M, et al. The landscape of emerging AI agent architectures for reasoning, planning, and tool calling: a survey [EB/OL]. [2024–06–15]. <https://arxiv.org/abs/2404.11584>
- [8] YAKLAF S K A, TARMISSI K S, SHASHOA N A A. 6G mobile communications systems: requirements, specifications, challenges, applications, and technologies [C]//Proceedings of IEEE 1st

International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering MI–STA. IEEE, 2021: 679–683. DOI: 10.1109/MI–STA52233.2021.9464470

- [9] SHU M, SUN W F, ZHANG J, et al. Digital-twin-enabled 6G network autonomy and generative intelligence: architecture, technologies and applications [J]. Digital twin, 2022, 2: 16. DOI: 10.12688/digitaltwin.17720.1
- [10] WANG D, SUN T, SUN X, et al. Study on digital twins in network lifecycle management [J]. Telecommunication science. 2022; 38(4): 138–145. DOI: 10.11959/j.issn.1000–0801.2022063
- [11] ZHANG M, TAO F, HUANG B Q, et al. Digital twin data: methods and key technologies [J]. Digital twin, 2022, 1: 2. DOI: 10.12688/digitaltwin.17467.1
- [12] YANG B, WANG S L, LI S, et al. Digital thread-driven proactive and reactive service composition for cloud manufacturing [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2023, 19(3): 2952–2962. DOI: 10.1109/TII.2022.3171338
- [13] Gartner. Top trends in data and analytics for 2021: data fabric is the foundation [EB/OL]. (2021–02–16) [2024–06–15]. <https://www.gartner.com/en/documents/3996983>
- [14] 中国移动. 支撑通信运维大模型及自智网络的通信系统端到端网络数字孪生系统 [R]. 2024
- [15] TM Forum. Digital twin for network operations – phase II [EB/OL]. (2021–02–16) [2024–06–15]. <https://www.tmforum.org/catalysts/projects/C23.0.530/>

### 作者简介



孙方平, 中兴通讯股份有限公司高级副总裁, 高级工程师; 主要研究方向为信息通信网络、工程技术创新及应用、产业数字化转型; 主编《ODN产品及工程施工规范白皮书》《NetMAX能看见的网优》等技术论著, 担任《数字卓越工程师能力评价规范》《国际项目经理能力评价》等团标/国标起草人。



钱铮铁, 中兴通讯股份有限公司资深技术总监; 主要研究方向为通信网络建设和运维的数字化转型、自智网络等; 申请相关专利4项。



# 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** (按姓名拼音排序)

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

### 刊物相关信息



投稿须知



投稿平台



过刊下载



论文索引与  
引用指南

# 中兴通讯技术

(ZHONGXING TONGXUN JISHU)

## 办刊宗旨：

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

## 产业顾问（按姓名拼音排序）：

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

双月刊 1995 年创刊

第 30 卷 总第 177 期

2024 年 8 月 第 4 期

主管：安徽出版集团有限责任公司

主办：时代出版传媒股份有限公司

深圳航天广宇工业有限公司

出版：安徽科学技术出版社

编辑、发行：中兴通讯技术杂志社

总编辑：王喜瑜

主编：王利

执行主编：黄新明

编辑部主任：卢丹

责任编辑：徐烨

编辑：杨广西、朱莉、任溪溪

设计排版：徐莹

发行：王萍萍

编务：王坤

《中兴通讯技术》编辑部

地址：合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室

邮编：230061

网址：tech.zte.com.cn

投稿平台：tech.zte.com.cn/submission

电子信箱：magazine@zte.com.cn

电话：(0551) 65533356

发行方式：自办发行

印刷：合肥添彩包装有限公司

出版日期：2024 年 8 月 8 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