

# 中兴通识技术 ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

#### http://tech.zte.com.cn

2022年6月・第3期







### 《中兴通讯技术》第9届编辑委员会成员名单

糜正琨(南京邮电大学教授)

顾问 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)

主任	<b>陆建华</b> (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	唐宏	中国电信 IP 领域首席专
陈前斌	重庆邮电大学教授、副校长	唐雄燕	中国联通研究院副院长
段晓东	中国移动研究院副院长	陶小峰	北京邮电大学教授
葛建华	西安电子科技大学教授	王文博	北京邮电大学教授、副
管海兵	上海交通大学教授	王文东	北京邮电大学教授
郭 庆	哈尔滨工业大学教授	王喜瑜	中兴通讯股份有限公司
洪 波	中兴发展股份有限公司总裁	王翔	中兴通讯股份有限公司
洪 伟	东南大学教授	王耀南	中国工程院院士
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
金石	东南大学首席教授、副校长	肖甫	南京邮电大学教授
李尔平	浙江大学教授	解冲锋	中国电信研究院教授级
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
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副
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
李少谦	电子科技大学教授	杨义先	北京邮电大学教授
李自学	中兴通讯股份有限公司董事长	叶 茂	电子科技大学教授
林晓东	中兴通讯股份有限公司副总裁	易芝玲	中国移动研究院首席科
刘健	中兴通讯股份有限公司高级副总裁	张宏科	中国工程院院士
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	张钦宇	哈尔滨工业大学(深圳
陆建华	中国科学院院士	张卫	复旦大学教授
马建国	浙江大学教授	张云勇	中国联通云南分公司总
毛军发	中国科学院院士	赵慧玲	工业和信息化部通信科
孟洛明	北京邮电大学教授	郑纬民	中国工程院院士
任品毅	西安交通大学教授	钟章队	北京交通大学教授
石光明	鹏城实验室副主任	周亮	南京邮电大学教授
孙知信	南京邮电大学教授	朱近康	中国科学技术大学教授

陈锡生(南京邮电大学教授)

谈振辉 北京交通大学教授

唐 宏 中国电信 IP 领域首席专家 唐雄燕 中国联通研究院副院长 陶小峰 北京邮电大学教授 王文博 北京邮电大学教授、副校长 王文东 北京邮电大学教授 王喜瑜 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 王 翔 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 **王耀南** 中国工程院院士 卫 国 中国科学技术大学教授 吴春明 浙江大学教授 **邬贺铨** 中国工程院院士 向际鹰 中兴通讯股份有限公司首席科学家 肖 甫 南京邮电大学教授 解冲锋 中国电信研究院教授级高工 徐安士 北京大学教授 徐子阳 中兴通讯股份有限公司总裁 续合元 中国信息通信研究院副总工 薛向阳 复旦大学教授 薛一波 清华大学教授 杨义先 北京邮电大学教授 叶 茂 电子科技大学教授 易芝玲 中国移动研究院首席科学家 张宏科 中国工程院院士 张 平 中国工程院院士 张钦宇 哈尔滨工业大学(深圳)教授、副校长 张 卫 复旦大学教授 张云勇 中国联通云南分公司总经理 赵慧玲 工业和信息化部通信科技委信息通信网络专家组组长 郑纬民 中国工程院院士 钟章队 北京交通大学教授 周 亮 南京邮电大学教授 朱近康 中国科学技术大学教授 祝宁华 中国科学院院士



中兴通讯技术 (ZHONGXING TONGXUN JISHU) 总第164 期 第28 卷 第3 期 2022 年 6 月

信息通信领域产学研合作特色期刊 第三届国家期刊奖百种重点期刊 中国科技核心期刊 工信部优秀科技期刊 十佳皖刊 中国五大文献数据库收录期刊 1995 年创刊

热点专题▶	智能超表面技术
	01 <b>专题导读</b>
	03 无线通信发展范式与RIS的赋能作用… 金梁,孙小丽,钟州,许晓明,陈如翰,张剑,邬江兴
	13 集成石墨烯的太赫兹波束成形智能超表面
	20 智能超表面的设计及应用  柯俊臣,梁竟程,程强
	27 智能反射面辅助的无线信息与能量传输研究综述庞海舰,陈健锋,张广驰,崔苗,武庆庆
	36 透射可重构超表面多天线通信系统····································
	40 宽带透射阵设计及其近场研究 ····································
	46 基于标量衍射理论的 RIS 波束码本设计 崔亦军,窦建武,刘怡平
	53 智能超表面在通信感知一体化系统中的应用
	58 智能超表面辅助通信感知一体化····································
	63 智能超表面辅助车载边缘计算····································
专家论坛▶	70 <b>智能超表面技术展望与思考</b> 马红兵,张平,杨帆,王欣晖,张建华,刘秋妍
企业视界▶	78 5G TSN 技术的创新研究
技术广角▶	84 蜂窝车联网中的物理层安全问题
	89 多元技术深度融合的物联网设备管理

2022年第1-6期专题计划及策划人 1. 新型网络技术 3. 智能超表面技术 5. 通信感知一体化 中国联通研究院副院长 唐雄燕 中兴通讯技术预研总工 赵亚军 中国科学技术大学教授 卫国 北京理工大学教授 费泽松 6. 网络内生安全 4. 多频段协同通信 2. 自然语言处理预训练模型 中国工程院院士 郑纬民 电子科技大学教授 李少谦 北京航空航天大学教授 刘建伟 中国联通研究院副院长 唐雄燕 中兴通讯首席科学家 向际鹰

## MAIN CONTENTS

### Special Topic

### Reconfigurable Intelligent Surface

	01 Editorial ······ ZHAO Yajun, FEI Zesong					
	03 Development Paradigm of Wireless Communication and Enabling Role of RIS					
	··· JIN Liang, SUN Xiaoli, ZHONG Zhou, XU Xiaoming, CHEN Ruhan, ZHANG Jian, WU Jiangxing					
	13 Graphene–Based Reconfigurable Intelligent Surface for Terahertz Wave Beamforming					
	SI Liming, TANG Pengcheng, LYU Xin					
	20 Design and Application of Reconfigurable Intelligent Surface					
	KE Junchen, LIANG Jingcheng, CHENG Qiang					
	27 Survey on Intelligent Reflecting Surface-Assisted Wireless Information Transmission and Power					
	Transfer PANG Haijian, CHEN Jianfeng, ZHANG Guangchi, CUI Miao, WU Qingqing					
	36 Multi–Antenna Communication System by Transmissive Reconfigurable Meta–Surface ·····					
	LI Bojiang, LI Zhendong, CHEN Wen					
	40 Design of Broadband Transmitarray and Its Near–Field Research					
	ZHANG Yan, ZHAO Chaochao, JIA Tianyang					
	46 RIS Code Book Design Based on Scalar Diffraction Theory					
	CUI Yijun, DOU Jianwu, LIU Yiping					
	53 Applications of Reconfigurable Intelligent Surface for Integrated Sensing and Communication ····					
	LIU Rang, LUO Honghao, LI Ming					
	58 RIS–Assisted Integrated Sensing and Communications					
	XIA Fanghao, WANG Xinyi, ZHENG Zhong					
	63 Reconfigurable Intelligent Surface–Enabled Vehicular Edge Computing					
	LIU Wenshuai, LI Bin					
Expert Forum	70 Reflections on Reconfigurable Intelligent Surface Technology					
I	MA Hongbing, ZHANG Ping, YANG Fan, WANG Xinhui, ZHANG Jianhua, LIU Qiuyan					
T	78 5C TSN Technologies and Innegation 7HANC Opping 7HENC Vingming 7HANC Showeng					
Enterprise View	76 3G ISN Technologies and Innovation ····· ZHANG Qiming, ZHENG Xingming, ZHANG Shouyong					
Technology 🕨	84 Physical Layer Security Issues in C–V2X Communication					
Perspective	SHEN Xia, ZHOU Wei, WANG Zhiqin					
	89 IoT Device Management with Deep Integration of Multiple Technologies					
	FANG Xin, MENG Xiangdong					

期刊基本参数: CN 34-1228/TN\*1995\*b\*16\*94\*zh\*P\*¥20.00\*6500\*15\*2022-06

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。

### 智能超表面技术专题导读



赵亚军 等

#### 专题策划人 >>>



赵亚军,中兴通讯股份有限公司无线研究院技术预研总工;目前主要从事5G标准化和6G技术研究;主要研究方向包括智能超表面(RIS)、频谱共享、CoMP及灵活双工等;已申请4G/5G相关发明专利200余项,其中有20余项纳入4G/5G标准。



费泽松,北京理工大学教授、博士生导师,工 业和信息化部重点学科实验室副主任; 主要研 究领域包括移动通信(5G/6G)、卫星通信、 通信感知融合、智能通信等; 先后主持国家自 然科学基金、国家科技重大专项、国家重点研 发计划等科研项目10余项; 获中国电子学会 自然科学奖二等奖1项; 发表论文100余篇。

近着无线网络容量需求的持续快速增长,无处不在的无 线连接将在未来十多年真正成为现实,但高度复杂的 网络、高成本的硬件和日益增加的能源消耗也成为未来无线 网络面临的关键问题。一直以来,"随心所欲"地调控电磁 波是人们不断追寻的梦想。麦克斯韦方程组的出现使得人类 对电磁波的掌控能力有了飞速提升,但受限于材料相对固定 的电磁参数,人们对电磁波的控制力仅局限于发射机和接 收机。

近年来,智能超表面(RIS)因其能够灵活操控信道环 境中的电磁特性,一出现就吸引了业界的广泛关注。RIS通 常由大量精心设计的电磁单元排列组成,通过给电磁单元上 的可调元件施加控制信号,可以动态地控制这些电磁单元的 电磁性质,进而实现以可编程的方式对空间电磁波进行主动 智能调控,形成幅度、相位、极化和频率可控制的电磁场。 作为超材料的二维实现,RIS天然具有低成本、低复杂度和 易部署的特性,可以应对未来无线网络面临的需求与挑战。 RIS的引入使得无线传播环境从被动适应变为主动可控,有 助于构建一个人为可控的智能无线环境。

从2020年开始,中国学术界与产业界联合开展了一系列RIS产业推进活动,极大地促进了RIS的技术研究与工程化进程。2020年6月,IMT-2030(6G)推进组无线技术组

成立 "RIS 任务组"; 同年9月, 中国通信标准化协会 (CCSA) TC5-WG6完成 "RIS 研究项目" 立项; 2021年9月 17日, IMT-2030 (6G) 推进组在6G 研讨会 RIS 分论坛上正 式发布业界首个《智能超表面技术研究报告》; 2021年9月 24日, "第一届智能超表面技术论坛" <sup>1</sup>大会召开; 2022年4 月7日, 智能超表面技术联盟 (RISTA)<sup>2</sup>成立, 成为 RIS 技 术被学术及产业界广泛认可的标志性事件。

作为未来关键技术领域中一个极具潜力的方向,RIS有 机会在5G-Advanced网络中提前落地,并可能在未来6G网 络中使能智能无线环境,带来全新的网络范式。近几年, RIS的技术研究与工程化进展迅速,在多个领域已经初步展 示其强大的性能。但在规模商用前,RIS仍在技术研究与工 程应用方面面临诸多问题与挑战。本期专题的论文从方法 论、基本原理、软硬件关键技术及应用等角度探讨RIS的研 究进展及相关成果,期望能对读者有所帮助。RIS引入无线 网络,被认为有机会给无线网络带来全新的网络范式。

邬江兴院士、金梁教授等在《无线通信发展范式与RIS 的赋能作用》中首次较为全面地阐述"改造定制无线环境" 的无线通信发展新范式,并给出对于新范式的理论探索以及 智能超表面赋能的实践规范。

太赫兹波的灵活高效调控一直是其应用的关键挑战之 一,来自北京理工大学的吕昕教授、司黎明副教授等在《集 成石墨烯的太赫兹波束成形智能超表面》中提出了一种基于 石墨烯的太赫兹 RIS,为灵活调控太赫兹波提供了新的

DOI: 10.12142/ZTETJ.202203001 收稿日期: 2022-06-06

<sup>1.</sup>智能超表面技术论坛,http://www.risforum.com

<sup>2.</sup>智能超表面技术联盟,http://www.risalliance.com

思路。

作为RIS研究领域引领性团队之一,来自东南大学的程 强教授等在《智能超表面的设计及应用》中较为系统地介绍 了智能超表面的基本概念、物理机理和设计方法,以及空间 波束赋形、非线性谐波调控和多谐波联合调控技术,进而展 示智能超表面技术的一些示范性应用。

RIS的引入对无线信息与能量同传带来了新的可能,来 自澳门大学的武庆庆等在《智能反射面辅助的无线信息与能 量传输研究综述》中全面介绍了RIS辅助无线信息与能量传 输方面的全球研究现状,并展望了物理层安全、无人机通信 和多IRS协同辅助等6个新的研究主题和研究方向。

根据对信号操作方式的不同,RIS可以被分为透射型和 反射型,来自上海交通大学的陈文教授等在《透射可重构超 表面多天线通信系统》中较为全面地介绍了基于透射RIS的 多天线系统,为B5G/6G无线收发机架构提供了新的设计思 路。来自北京航空航天大学的张岩等在《宽带透射阵设计及 其近场研究》中提出并设计了一种基于紧耦合偶极子的宽带 透射阵天线,引入等效延迟距离的概念用于设计透射阵,并 对其菲涅尔区电场进行研究。

相对于传统多输入多输出(MIMO),RIS的码本设计面临新的挑战。来自中兴通讯股份有限公司的崔亦军和窦建武等在《基于标量衍射理论的RIS波束码本设计》中研究了基于傅里叶光学中标量衍射理论的RIS物理波束调控的码本设计方法。

RIS将成为未来通感一体化的关键使能技术之一。来自 大连理工大学的李明教授等在《智能超表面在通信感知一体 化系统中的应用》中系统阐述了智能超表面辅助无线通信系 统和雷达感知系统的工作原理、性能优势和实际应用,进而 介绍了智能超表面辅助通感一体化系统的可行性、优势及应 用前景。而来自北京理工大学的郑重等在《智能超表面辅助 通信感知一体化》中针对通感一体化面临的挑战,探讨了 RIS辅助通信感知一体化系统的典型应用,并深入讨论了 RIS辅助通信感知一体化系统在联合波束设计、RIS单元模 式切换以及安全通信等方面的研究现状。

另外,来自南京信息工程大学的李斌教授等在《智能超 表面辅助车载边缘计算》中,针对障碍物遮挡对车联网中路 边单元(RSU)服务性能的影响,提出一种智能超表面辅助 的车载边缘计算(VEC)部分任务卸载方案。

本专题文章由来自中国的高校和企业中从事RIS技术研究的专家学者撰写,较为全面地反映了RIS技术创新的最新成果。在此,对各位作者的大力支持和精心撰稿表示衷心的感谢!希望本专题能对RIS技术的进一步研究和发展起到重要参考和积极推动作用。



2022年6月5日

## 无线通信发展范式与 RIS 的 赋能作用



Development Paradigm of Wireless Communication and Enabling Role of RIS

金梁/JIN Liang,孙小丽/SUN Xiaoli,钟州/ZHONG Zhou, 许晓明/XU Xiaoming,陈如翰/CHEN Ruhan, 张剑/ZHANG Jian,邬江兴/WU Jiangxing

(战略支援部队信息工程大学,中国 郑州 450002) (PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China) DOI:10.12142/ZTETJ.202203002 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220606.1637.002.html 网络出版日期: 2022-06-07 收稿日期: 2022-05-10

摘要:无线通信利用电磁波承载信息实现远距离通信,摆脱线缆束缚,推动世界经济发展和社会进步。无线通信发展范式是与无线通信技术演进相关的自然规律、理论基础和实践规范。回顾了已有无线通信发展范式的适用范围、关键技术等,并指出无论被动适应还是主动利用无线环境的发展范式均受到"空谱墙"的制约,对抗无线扰动的能力还处于"靠天吃饭"的阶段,没有从根本上改变受限于无线环境的状况,制约了无线通信服务能力的提升。针对这一瓶颈问题,提出"改造定制无线环境"的无线通信发展新范式,并探索了新范式的理论和智能超表面(RIS)赋能的实践规范。

#### 关键词:范式;无线通信; RIS

Abstract: Wireless communication uses electromagnetic waves to carry information to achieve long-distance communication, which gets rid of the shackles of cables and promotes world economic development and social progress. The wireless communication development paradigm is a natural law, theoretical basis, and practical specification related to the evolution of wireless communication technology. The scope of application and key technologies of the existing wireless communication development paradigms are reviewed, and it is pointed out that development paradigms for both passive adaptation and active use of the wireless environment are restricted by the "space spectrum wall". The ability of existing wireless communication development paradigms to resist wireless disturbances is still at the stage of "depending on heaven for food", and the situation limited by the wireless environment has not been fundamentally changed, which restricts the improvement of wireless communication service capabilities. In response to this bottleneck problem, a new paradigm of wireless communication development by "reforming and customizing wireless environments" is proposed. The theoretical exploration of the new paradigm and practical specifications based on the reconfigurable intelligent surface (RIS) are introduced.

Keywords: paradigm; wireless communication; RIS

、 (Paradigm)的概念和理论最初由美国著名科学哲学家托马斯・库恩在1962年提出并在《科学革命的结构》中系统阐述<sup>111</sup>。范式从本质上讲是一种理论体系、理论框架,是开展科学研究、建立科学体系、运用科学思想的坐标、参照系和基本方式。范式有3个基本特点:第一,在一定的范围内含有普适性;第二,是一种以基本的定理、原理、应用及相关装备等集成的综合体;第三,为科研与技术开发提供了可重现的成功模板。

2007年1月11日, 图灵奖得主吉姆・格雷发表了一个

名为"科学方法的革命"的演讲<sup>12</sup>,将科学研究分为4类范 式:实验/测量、理论分析、数值模拟/仿真和数据驱动。 18世纪以前,人类的科学研究主要以记录和描述自然现象 为特征,称为"实验科学"(第1范式)。以"现代科学之 父"伽利略的物理学、动力学为代表的科学发展开启了现 代科学之门。然而,由于实验/经验科学经常从主观的感觉 经验出发并且受到实验条件的限制,因此结论会带有盲目 性。18—19世纪,研究者开始在已有经验、事实、认知的 基础上尝试尽量简化实验模型,通过去除复杂干扰尽可能 抓住关键因素,并经过演绎推理,归纳出新的理论或模 型,这称为"理论科学"(第2范式)。在该范式的指导下,

**基金项目:**国家自然科学基金(61871404)

数学中的集合论、图论、数论和概率论,物理学中的牛顿 三大定律、量子理论、相对论,电磁学中的麦克斯韦理 论, 生物学中的达尔文进化论等应运而生。该范式存在的 挑战是:随着理论验证的难度和代价越来越高,科学研究 面临瓶颈。20世纪中期以后,电子计算机的发明使得研究 者们能够利用计算机对复杂的现象进行模拟仿真和相关计 算。简言之就是用计算机来做实验,这称为"计算科学" (第3范式)。该范式主要包括数值模拟、模型拟合与数据 分析、计算优化三大领域。21世纪以后,随着信息技术的 飞速发展,人类社会产生的数据呈爆炸式增长。此外,计 算机处理和存储能力也在不断提升,这使得计算机不仅能 做模拟仿真,还能对海量数据进行处理和分析总结,发现 新规律,揭示新机制,从而产生"数据驱动科学"(第4范 式)。该范式是在大数据驱动下科学知识发现模式的新变 革,而前3种科学范式则以假设为驱动,数据只是用来验 证假设的支撑。可以看出,科学研究范式是一个历史阶段 的思维视角和方法论,不是一种范式取代另外一种范式, 他们之间存在继承发展的关系。其中,经验科学是理论科 学的实践基础,理论科学能够对经验科学提供理论指导, 计算科学是对经验科学和理论科学方法的进一步优化,而 数据驱动科学是对前3类范式的补充。此外,范式的变革 往往在现有问题无法解决、科学研究面临瓶颈时才会应运 而生。

无线电应用始于1897年"无线电通信之父"马可尼的 无线电报通信实验。100多年来,无线通信的飞速发展对于 人类生活和社会进步有着重大的意义。本文根据范式的定 义,回顾和总结无线通信发展历程,给出无线通信发展范式 的思考与展望。由于任何发展范式总有其适用范围和阶段性 特点,原有无线通信范式无法解决目前无线通信中一些瓶颈 问题,本文从世界观和方法论的角度提出无线通信演进中可 预见的新范式及其实践规范,为未来无线通信变革性发展提 供理念参考。

#### 1 无线通信发展范式回顾与分析

无线通信发展范式是与无线通信技术演进相关的自然规 律、理论基础和实践规范,如同一般科学发展范式一样,也 是阶跃式发展的。

无线通信是通过电磁波在无线环境中传递信息的过程, 同时也是对抗与无线环境密不可分的广义不确定扰动的过程。其中,无线通信中的广义不确定扰动是指直接或间接利 用无线环境的不确定性和不可操控性引发的非期望事件,包 括自然因素和人为因素引发的扰动。如图1所示,自然扰动 因素包括地形/地貌/地物、天气、衰落、传播媒质、电磁弥 散等,人为扰动因素包括无意干扰、有意干扰、接入攻 击等。



▲图1 无线广义不确定扰动

从电磁波与无线环境相互作用规律的认知过程来看,无 线通信的发展历程就是一部对抗广义不确定扰动的历史。基 于世界观和方法论的视角,无线通信的发展过程可分为3种 范式:发现与使用电磁波、被动适应无线环境、主动利用无 线环境。下面我们对无线通信发展已有的3种范式进行简要 阐述,归纳各种范式实践规范的特点,并从科学范式的视角 探讨无线通信的发展与困局。

#### 1.1 无线通信发展范式1:发现与使用电磁波

1873年麦克斯韦在《电学和磁学论》中提出了电磁波 的传播机理。1887年赫兹通过实验验证了电磁波的存在, 从而为无线电通信的产生创造了条件,并为1897年马可尼 使用电磁波首次实现跨洋的无线电报通信奠定基础。这便形 成了无线通信发展的最初范式。该范式所蕴含的世界观为: 在麦克斯韦、赫兹等人的工作基础上,首次发现电磁波的存 在及传播的科学规律,认识到人类可以摆脱有线通信的束 缚、开启无线电通信的新时代;对应的方法论为:如何利用 电磁波承载信息实现远距离通信,解决无线通信的有无问 题,其中标志性技术是无线电报。无线通信发展的最初范式 仅采用增加发射功率、简单编码、重复发送等方式(如摩尔 斯码)来对抗自然扰动,还没有涉及复杂无线环境中存在的 人为扰动及安全等问题。

#### 1.2 无线通信发展范式2:被动适应无线环境

随着无线通信的发展,广义不确定扰动逐渐成为发展中 的主要矛盾。在香农提出信息论之前,人们普遍认为固定速 率信息发送的误差概率是不可忽略的,而香农从理论上证明 了当通信速率低于信道容量时,总能找到一种编码方式,以 任意低的错误率传送信息<sup>[3]</sup>,即给出了特定信道上的无差错 最大传输速率,为有效的信息传输提供了上界,为数字通信 奠定了基础。因此,第2范式所蕴含的世界观以香农信息论 和香农信道容量为代表。它阐明了无线环境带来的扰动与无 线通信质量之间存在内在联系,即要在不可靠的信道上进行 可靠的信息传输,必须要有与之匹配的传输方式。为实现上 述目标,该范式的方法论是如何适应复杂无线环境,寻找逼

在对抗自然扰动方面,该范式主要经历了模拟与数字通 信两个阶段,利用编码、调制、滤波以及波形设计等把信号 转换成适合在信道上传输的形式,从而提高信息传输的可靠 性。其中,预编码技术通过在发射端对信号进行设计使得发 送信号与信道匹配,从而降低符号间干扰,提高传输性能, 同时能够有效降低接收机处理复杂度;均衡技术在接收端对 经过信道畸变的信号进行均衡处理,通常用滤波器来校正和 补偿失真的脉冲,减少码间干扰的影响;自适应调制编码技 术根据终端反馈的信道状况来确定信道容量,从而自适应调 整调制方式和编码速率,以便数据传输适合信道变化,实现 更高的通信速率。

近无线通信能力极限的方法。

在对抗人为扰动方面,最初是主要通过对时、频等无线 公共资源进行划分与管理来实现的。世界各国都对时频等无 线公共资源进行科学合理的规划,结合不同应用领域或场景 的特点,给各类无线电业务划分专用频段并成立有关部门进 行严格监督管理<sup>[4]</sup>。随后,频分多址(FDMA)、时分多址 (TDMA)和码分多址(CDMA)技术也相继在移动通信中得 以应用,通过给不同用户分配正交的频率、时间和码块资源 来抵抗用户间干扰。然而,无线电频谱等资源是有限的资 源,无线通信对频谱的依赖性越来越大。因此,业界不断开 发新的频率资源,例如,毫米波与太赫兹通信等<sup>[5]</sup>,用来有 效解决日益紧张的频谱资源和当前无线系统容量限制的问 题。另外,为了提高频谱利用率,认知无线电技术近年来得 到了学术界的广泛关注。通过从环境中感知可用频谱,认知 无线电技术自适应改变通信参数,可实现动态频谱分配和频 谱共享。

在对抗无线安全威胁方面,该范式主要采用了扩谱、加密、认证、完整性保护等标志性技术。以移动通信为例, 1G基本上是没有采用安全防护机制的,但2G数字通信系统 开始增加了空口信息加密、身份认证鉴权和身份标识码等安全 防护手段并不断更迭演进。例如,为弥补加密算法的缺陷,移 动通信加密算法已由2GA51/A52、3GKASUMI演变为4G、5G 的高级加密标准(AES)、SNOW3G、祖冲之密码算法(ZUC) 等加密强度较高的组密钥或流密钥加密算法<sup>[6]</sup>,密钥长度也 由 2G 的 64 bit不断增加到 5G 的 256 bit。为解决 2G 因单向鉴 权机制引起的伪基站问题,3G 时代引入了能够同时鉴别用 户和移动通信网络的合法性的双向鉴权机制;为应对不法用 户截获明文传输的用户永久身份标识进行识别、定位和跟踪 等问题,5G 利用基于公钥基础设施(PKI)机制的公钥加密 方法对用户永久身份标识(SUPI)进行加密后传输<sup>四</sup>。

该范式提升了应对无线扰动的能力,但是存在以下几方 面的不足:(1)适应无线环境的能力受限于对无线环境的感 知,缺乏对"差异化"无线环境的"精细化"感知能力; (2)因存在频谱资源有限、用户间干扰等问题,通过动态频 谱分配、频谱共享等方法提高频谱利用率和系统容量会受到 "频谱墙"的制约;(3)无线通信中时/频/码域资源是公共 资源,本质上具有不可调和性,无法根本阻断干扰、消除安 全威胁,缺乏对无线环境"个性化"资源的开发利用;(4)采 用打补丁、外挂式的技术路线,基于密码学的安全手段来增 强信息层面的安全,缺乏从安全与通信共有的本源属性来探 索安全与通信一体化的内生安全机制。

#### 1.3 无线通信发展范式3:主动利用无线环境

随着通信业务的不断扩展,被动适应无线通信中时/频/ 码域的公共资源对抗扰动的方式无法满足日益增长的需求, 亟待挖掘和利用新的无线环境资源。由于电磁波传播机理可 用麦克斯韦方程及其边界条件来刻画,而差异化的无线环境 对应的边界条件决定了差异化的方程解,因此可以利用空域 资源的差异性来突破时/频/码等无线资源公共属性的束缚。 第3范式中所蕴含的理论观点是:相比于时/频/码域等公共 资源,空域资源是无线个性化资源,可以利用天然的、内在 的空域资源差异应对无线扰动。

在对抗自然扰动方面,该范式主要通过收发分集、空域 均衡/预均衡、空时编码等手段来减小衰落和噪声的影响。 标志性技术包括分集发送/接收、波束赋形、集中式与分布 式多输入多输出(MIMO)、大规模MIMO等。其中,分集技 术通过在无线信道传输同一信号的多个副本(同时在接收端 合并接收)来补偿衰落信道损耗,可有效提高通信质量,降 低发射功率;多天线技术是近年来无线通信发展较快的热点 技术之一,从3G的智能天线到5G的大规模MIMO,天线规 模不断增加,获得的功率增益、空间分集增益、空间复用增 益和阵列增益也在不断提升;空时编码是通过空间和时间二 维联合构造码字的信号编码技术,能够获得分集增益和编码 增益,有效抵消衰落。

在对抗人为扰动方面,该范式主要通过定向发送与空域 滤波来实现干扰抑制。以蜂窝化小区、空域抗干扰技术为 例:蜂窝系统在移动通信中广泛应用,即相邻小区采用不同 频率而距离较远的蜂窝则复用相同的频率,在对抗干扰的同 时可提高频谱利用率;空域抗干扰通过自适应天线设计使得 阵列接收方向图在干扰方向上形成零陷以规避干扰。

在对抗无线安全威胁方面,该范式主要利用无线信道的 随机性、多样性、时变性等内生安全属性,在物理层对抗安 全威胁,如图2所示。标志性技术是无线物理层安全技术, 例如,信道指纹加密<sup>[8-11]</sup>、信道指纹认证<sup>[12-14]</sup>、物理层安全 传输<sup>[15-18]</sup>等。其中,信道指纹加密和认证技术分别通过提取 收发双方的唯一、互易的无线信道指纹并将其用于密钥生成 和数据认证,在信号层面抵御无线主被动攻击;物理层安全 传输根据信道指纹的差异设计与位置强关联的信号传输和处 理机制,使得只有在期望位置上的用户才能正确解调信号, 而在其他位置上的信号是置乱加扰且不可恢复的。



▲图2 基于信道指纹的物理层安全技术原理

该范式选择"个性化空域资源",挖掘并利用无线环境 的差异性对抗无线扰动,但没有从根本上改变受限于无线环 境的状况。扩大空域资源自由度的解决思路是通过增加天线 阵元单位规模来提升通信容量等性能指标,但因天线孔径受 限等现实问题导致受到"空谱墙"的制约,对抗无线扰动的 能力还处于"靠天吃饭"的阶段。

#### 2 无线通信发展新范式及理论探索

#### 2.1 无线通信发展范式4:改造定制无线环境

"空谱墙"的制约使得范式3无法应对无线通信数据业务量的爆发式增长和终端的多样化服务质量需求,因此需要探索"改造定制无线环境"的无线通信发展新范式。该范式的核心观点是:无线广义不确定扰动可归因于无线环境操控的自由度;通过改造定制环境约束条件,实现通信的优化目标, 而要改造定制无线环境就必须从无线内生属性出发。因此, 该范式对应的方法论是如何挖掘无线内生属性,基于内生属 性实现内生构造,创造对抗无线扰动的最优环境。具体表现 包括以下几个方面:(1)通过对无线环境进行动态编程和按 需重构来对抗自然扰动;(2)通过塑造、拉大无线环境的差 异性来对抗人为扰动;(3)通过塑造、强化无线环境的内生 安全属性来对抗无线安全威胁。该范式由无线信道"不可操 控"向"改造定制"进化,实现从"靠天吃饭"向"天人合 一"的技术变革。

#### 2.2 无线通信的广义鲁棒控制机制——动态异构冗余(DHR) 构造

内生安全DHR构造为无线通信发展新范式提供了一种 解决广义不确定扰动问题的机制。理论与实践已经证明内生 安全DHR构造可以同时应对可靠性失效和安全攻击等广义 不确定扰动<sup>[19]</sup>,即能实现功能安全与信息安全一体化的广义 鲁棒控制功能。内生安全DHR构造提供了对抗广义不确定 扰动的实践规范。因此,如果能在无线通信中找到一种符合 DHR属性规范的构造,则也可以应对无线广义不确定 扰动<sup>[20]</sup>。

无线通信的发展也是抵抗无线广义不确定扰动方法的演 进过程。用数学模型刻画广义不确定扰动可分为两类:一类 是与自然扰动相对应的,可以用概率表述的随机过程,即已 知的未知;另一类是与人为扰动相对应的,无法用概率精确 刻画的不确定事件,即未知的未知。作为新范式的一大标志 性技术,无线内生安全技术<sup>[20]</sup>从电磁波及网络空间内源性缺 陷产生的共性和本源问题出发,探索无线网络自身构造或运 行机理中的内生安全效应及其科学规律,并基于无线环境内 生属性的利用和改造,解决无线环境中的自然扰动和人为扰 动带来的问题,提供抵御"已知的未知"和"未知的未知" 的能力。

无线内生安全理论是内生安全普遍原理和DHR构造实 践规范在无线通信中的拓展,为"改造定制无线环境"这一 无线通信新发展范式提供理论探索。如图3所示,内生安全 DHR构造<sup>[21-23]</sup>包含输入代理、功能等价异构执行体集合、多 模裁决、输出代理和负反馈控制器。其中,输入代理将输入 序列分发到多个功能等价的异构执行体,对经过执行体处理 后的输出矢量进行多模裁决;多模裁决器对多模输出矢量内 容的合规性进行判决,一旦发现非期望裁决状态就将激活负 反馈控制器,对差模输出执行体进行替换和清洗。异构冗余 构造是"相对正确公理"的逻辑表达与实现方式,能够发现 和应对不确定攻击与随机扰动,保证系统安全/稳定运行。 基于上述原理可以构造出基于迭代裁决的、多维动态重构反 馈的运行环境,能够形成"测不准"效应,变确定性为动态 性,破坏"试错攻击"的前提(即破坏扰动的时空一致性)。 内生安全DHR构造是在"构造决定论"指导下的网络安全 利剑<sup>[24-25]</sup>。

从电磁波的传播机理来看,无线环境(信道)是无线通 信的内生属性。信道源于电磁波传播过程中的直射、反射、 散射、折射等各种效应组合,是自然界中一种天然的随机 源,其产生机理决定了信道指纹具有各点异性、随机时变性 和第三方测不准特性。这就导致通信双方的信道是不可测 量、不可复制的,在其他时空坐标上发起攻击产生的扰动, 必然会破坏原有信道物理结构的完整性。因此,无线信道是 天然的DHR 异构执行体,可以作为新质内生安全属性,在 电磁波传输过程中抵御已知和未知的自然扰动和人为扰动。

如图4所示,典型无线通信系统天生具有DHR构造的 基本属性。其中,无线信道是功能等价的异构执行体,发信 机端的编码、调制、多天线发送等可起到代理作用,接收机 端的解码、解调、多天线接收等可起到裁决作用,收发链路 间的导频、功控、码本等为反馈机制。无线信道作为无线通 信的DHR异构执行体,具有不可操控性。如何改造并定制



#### ▲图3 动态异构冗余构造抽象模型



▲图4 无线通信系统的动态异构冗余构造模型

无线环境、异构执行体,即差异化信道的构造,成为无线通 信DHR构造的关键。然而,无线通信范式2和范式3分别为 "适应"和"利用"自然改变的无线环境,导致异构执行体 不可控,使得无线通信的DHR构造受无线环境限制,通信 性能受限。为解决上述问题,无线通信新范式在"利用"自 然无线环境和挖掘内生安全属性的同时,能够通过"塑造定 制"无线环境来主动改造内生安全属性,为实现可控的异构 执行体构造提供技术途径。

#### 3 RIS对无线通信新范式的作用

"改造定制无线环境"的无线通信新范式指导下的DHR 构造通过对信道环境进行人工塑造,可使异构执行体构造更 加可控,能够对抗无线广义不确定扰动。近年来各类新兴技 术的出现为改造定制无线环境提供了有效支撑。智能超表面 (RIS)作为下一代移动通信技术潜在的关键候选技术之 一<sup>[26-29]</sup>,由超材料技术发展而来,是一种由大量可编程超材 料单元排布构成的新型电磁器件。该技术能够实时控制和改 变每个粒子单元的状态,进而控制电磁波的传播方向、相 位、幅度、频率和极化等特性,具有功耗低、体积小、成本

> 低、布设方式灵活等优点。目前关于 RIS的研究通常是将其作为反射/透射 面,布设在通信双方间,以扩大信号的 覆盖范围,提升系统容量。另外,也有 研究将 RIS 与射频器件合并,形成 RIS 天线或称为动态超材料天线 (DMA)<sup>[30]</sup>。RIS 天线利用超材料在模 拟域对电磁波进行调控,增强了射频最 前端的信号处理能力,能够增加对无线 环境感知的精细程度,进而实现与多径 相匹配的细粒度编码、调制、滤波等信 号传输技术,可大大提高通信性能。

#### 3.1 RIS赋能无线 DHR 构造

RIS对电磁波的操控能力为无线信 道的人工塑造提供了可行的技术手段, 使得异构执行体由不可操控向按需改造 转变。无线通信DHR构造将不再受限 于自然信道环境。如图5所示,新范式 下无线通信的DHR构造可通过自然改 变的信道环境和人工塑造的信道环境来 实现。

RIS作为材料科学与信息科学的交



#### ▲图5 智能超表面辅助的无线通信动态异构冗余构造模型

叉融合技术,能够实现对无线环境的实时重构、动态编程,构造无线DHR中的异构执行体——差异化信道。优化设计 RIS的电磁波调控参数可达到人工塑造无线环境的效果,为 差异化的无线信道构造提供关键技术支撑。基于RIS柔性可 重构的特性和操控电磁波传播特性的能力,在无线信道天然 内生安全的基础上,进行人为可控的优化与改造,最大限度 地构造内生安全属性的安全增量,强化赋能无线内生安全。 这将促使无线内生安全技术由被动利用无线内生安全属性向 改造定制内生安全属性的方向发展。RIS技术的出现使无线 通信DHR构造不再受限于自然信道,为无线通信新范式的 实现与落地提供实践规范。

#### 3.2 RIS推动无线通信计算架构演进

从无线通信计算架构发展来看,在模拟通信阶段,当采 用模拟器件的物理特性来实现数学运算时,形成的模拟计算 架构是固化的。在数字通信阶段,人们主要采用高速数字处 理集成电路完成信号处理。此时在软件化/虚拟化技术的带 动下,基站射频拉远单元(RRU)与基带单元(BBU)分 离,形成了模拟计算、采样和数字相结合的计算架构。由于 没有改变模拟电路固化的问题,模拟计算能力受限,计算能

#### ▼表1 无线通信计算结构发展

结构	特点	效果		
模拟计算结构	模拟器件的物理特性 实现数学运算	模拟电路固化、模拟计算 能力受限		
模拟计算+采样+数	高速数字处理集成	以"大算力、大数据"为特点,规模决定论的"数字		
字计算结构	电路完成信号处理	化大时代"		
柔性模拟计算+采	基于智能超表面的数	数控模拟计算前端最大		
样+数字计算结构	控模拟计算	限度地保真信息		

力提升主要靠后端的数字处理增强。 该阶段进入一个以"大算力、大数据" 为特点,以规模决定论为指导的"数 字化大时代"。

从解决模拟电路固化问题入手, 基于 RIS 的智能化模拟计算能力,可 为移动通信提供新的模数混合柔性计 算结构。从哲学角度看,RIS 推动移动 通信计算架构按照"模拟"到"数字" 再到"增强模拟+数字"的方式螺旋式 上升;从信息论角度看,数控模拟计 算前端最大限度地保真了信息量。RIS 的模拟计算能力在现有的研究中已得 到证明<sup>[27]</sup>。在东南大学所提出的新型

无线通信发射系统中,RIS能直接对单音信号进行调制,简 化了传统发射机构架。另外,对RIS面板的单元状态进行设 计,能够实现数字卷积定理的频谱搬移能力,使得复杂的波 束调控设计大大简化。

#### 3.3 RIS促进无线通信阵列变革

众所周知,阵列天线技术在移动通信的演进中发挥了 重要作用。为提高移动通信速率和通信容量,4G、5G采用 了 MIMO、Massive MIMO技术来挖掘和利用空域资源,提 高空间自由度。然而,当前阵列形态属于同构阵列,依赖 于规模性增益。受限于天线阵列孔径,实际系统会出现 MIMO信道矩阵秩损的现象,实际自由度远小于理论自由 度,系统性能受到限制。如果依然遵循"规模决定论"的 技术路线,通过简单地增加阵列规模来实现每秒太比特的 峰值速率、20 GHz的大宽带等性能,那么6G将面临严峻 的挑战。

实现从"规模决定论"向"构造决定论"转型是应对现 有挑战的全新技术路线<sup>[31]</sup>。利用具有时空二维敏捷可重构特 性的DHR阵列是该路线的一种可行实现方式。如图6所示, 对于同一时刻,不同的阵元能够形成异构的方向图;对于同 一阵元,不同时刻也具有异构的方向图。DHR阵列与同构 阵列的本质区别在于,天线阵元具有实时可重构、动态可编 程的能力,可带来自由度的提升。

与当前以 5G 超大规模天线为代表的同构阵列相比, DHR 阵列通过动态捷变与异构构造,为改造无线环境提供 技术手段,在通信和安全性能方面均表现出明显的优越 性<sup>[32]</sup>,具体表现包括3个方面:一是在感知无线环境方面, 利用差异化的手段解析差异化的无线环境,可以精确感知到 每条多径,进而实现与每条多径匹配的细粒度编码、调制、 滤波等信号传输技术;二是在改造无线环境方面,利用空域 和时域提供的自由度,可以拉大多流信号间的差异性,实现 单 RIS 阵元的 DHR 阵列接收和发送多流信号,在提高通信 容量的同时提升波束方向的分辨率;三是在安全方面,利用 动态捷变改造信道的随机性和时变性"基因",借助异构改 造不同信道的差异性"基因",提升无线信道指纹的安全能 力。因此,这为有效对抗无线扰动,保障信息可靠和安全传 输的细粒度、精细化信号传输或处理技术的设计提供了技术 支撑。



▲图6 动态异构冗余阵列

#### 3.4 RIS 驱动电磁信息理论发展

香农信息论基于信号和统计理论,未考虑涉及信号电 磁传播特性的麦克斯韦电磁理论。单纯基于香农信息论的 系统设计理念使无线通信性能面临天花板,难以满足 B5G/ 6G对无线通信性能提出的更高要求。香农限的理论分析依 赖于无线信道的准确建模。在传统的信道模型中,输入输 出通常为连续时间信号,信道则建模为线性时不变系统。 其中,线性高斯信道模型被广泛采纳,当前无线通信赖以 生存的采样和滤波理论均建立在该模型基础上。然而,随 着通信频带的不断攀升和大尺寸天线的应用,Fraunhofer远 场区条件将不再满足,经典的信道模型与电磁波近场传输 的现实已不再相匹配。因此,为了刻画实际环境下无线链 路的特性,基于场波视角的信息传输理论引起了广泛 关注<sup>[33]</sup>。

在电磁信息理论中,信道输入与输出均为连续的时空四 维信号。由于实际收发端天线尺寸受限,输入与输出信号在 空间维度出现紧支撑。信源到信宿间的电磁传播由格林函数 完全刻画,因此电磁信道应当建模为Hilbert空间上的积分 算子。相较于经典模型,电磁信息理论不再局限于单纯改变 电磁波的幅度与相位,而是可以将发射信号视为空间上不同 的电磁分布。

显而易见,电磁信息理论解锁了发射信号的空间维度, 也将带来更大的传输自由度。需要注意的是,获取该自由度 增益的前提是发射天线具有在给定空间区域产生任意电磁分 布的能力。得益于超材料的物理性质,RIS能够同时进行电 磁波调控和数字信息处理,完成从数字编码/比特流信息到 电磁信息的映射,建立信息理论和电磁理论的桥梁,使得信 息理论和麦克斯韦电磁理论完美结合,天然地适配于电磁信 息理论,为无线通信发展带来了新的契机。

东南大学崔铁军团队首次提出了基于信息超材料的电磁信息论,把香农信息理论应用到电磁理论中,给出了 RIS数字编码与电磁波两类信息之和的上限<sup>[34-36]</sup>、数字编码 完全随机时的方向图信息,以及一定面积的信息超材料所 能辐射的正交方向图信息的理论上限值。另外,RIS能够 将数字信号处理的方法从信号域引入到电磁域<sup>[37]</sup>,利用不 同数字编码与其方向图之间的傅里叶变换关系实现方向图 搬移,即信息超材料的卷积定理。基于该定理,当RIS 面 积足够大时,2 bit数字编码即可实现上半空间无死角的波 束扫描。为了充分利用 RIS 的全息能力从而逼近无线信道 容量,需要进一步发展与完善电磁信息理论,特别是在电 磁信号的正交展开、空间采样、信道测量和天线样式设计 等方面。

#### 3.5 RIS支撑多模态无线传输环境

网络技术体系发展经历了从网络与业务紧耦合、综合 业务数字网、网络与业务相对分离到网络技术体系与支撑 环境相分离这一新范式的转变<sup>[38]</sup>。网络发展新范式下的方 法论是建立多模态网络。多模态网络是一种基于全维可定 义技术的可共生共存、动态并发、演进变革融合的多元化 网络技术架构的一体化网络支撑环境——网络之网络,它 既能保障各类业务及网络技术体系的可自持发展,又能实 现多元网络的智能、高效一体化部署和管理,拥有与具体 网络体系及相关业务无关的全维可定义的技术物理环境与 生态。

如图7所示,相比于多模态网络中的全维可定义网络支 撑环境,RIS的柔性可重构特性和操控电磁波的能力可使无 线通信技术体制与无线支撑环境相分离,能够针对各类无线 传播环境,构建全维可定义无线传输支撑环境,支撑编码、 调制、多址、组网、安全等多种模态,形成无线网络与技术



人工智能的研究主要集 中在基于计算机的机器学习 方法,如深度学习和强化学 习。与传统使用计算机平台 来实现人工神经网络的方法 不同,基于波的人工神经网 络采用3D打印光学透镜阵 列形成全光学衍射深层神经 网络<sup>[39]</sup>,利用光子的波动特 性实现并行计算,成为一类 新型的人工智能方法。但这 种基于波的人工神经网络一

▲图7 多模态网络通信与多模态无线通信

体制的无线支撑环境,也就是"环境之环境"。如图8所示, 以5G三大应用场景为例,针对增强型移动宽带(eMBB)、 大规模机器类通信(mMTC)、超可靠低时延通信(URLLC) 不同的传播环境和通信需求,利用RIS反射面、DHR阵列构 建任何通信体制的无线支撑环境,形成可匹配任何无线环境 的柔性适配层,能够屏蔽各类传播环境的差异性,使得无线 业务与自然环境解耦。



▲图8 5G多模态无线通信实例

#### 3.6 RIS助力人工智能发展

人工智能技术诞生于20世纪中叶,近年来由于算力、 学习数据量的大幅提升以及网络模型与算法的不断突破,得 以再次复兴。人工智能特别是深度学习在计算机视觉、自然 语言处理、语音识别等领域已获得巨大成功。无线通信与人 工智能技术的有机融合也将大幅度提升无线通信系统的 效能。 旦产生,自身的网络架构就会固定下来,这限制了它的功能 和应用。RIS的可编程特性为建立可重新训练的基于波的人 工神经网络提供了可能。如图9所示,文献[40]提出了一种 可编程和现场训练的人工智能机(PAIM)。PAIM采用RIS透 射面作为神经网络的网络层,进行波传感和通信,可以在波 空间进行计算和光速处理,通过切换超表面状态来实现图像 识别、自动聚焦、无线通信等不同功能和应用。基于RIS的 可编程人工智能机为人工智能在无线通信不同场景的应用提 供了新的可行技术路径。



▲图9 基于智能超表面的可编程人工智能机器[40]

#### 4 结束语

本文从思维视角和方法论的层面对无线通信发展进行思考,将现有无线通信发展归纳为三大范式,并给出了每个范 式的适用范围、阶段性特点和关键技术。针对目前发展范式 "受限于"无线环境、对抗无线扰动的能力处于"靠天吃饭" 阶段等问题,提出了"改造定制无线环境"的无线通信发展 新范式,并给出对于新范式的理论探索。文中以无线通信发 展新范式为指导,利用 RIS 构建物理(模拟)世界和信息(数字)空间的桥梁,赋能无线环境的内生构造,将被动适应无线环境的"信道编码"向主动改变无线环境的"编码信道"转型,实现改造定制无线环境的无线通信新范式。

#### 致谢

特别感谢东南大学崔铁军院士、程强教授、金石教授和中 兴通讯股份有限公司赵亚军总工等专家对本文的贡献!

#### 参考文献

- KUHN T S. The structure of scientific revolutions [M]. London: University of Chicago Press, 1962
- [2] HEY A, TANSLEY S, TOLLE K. Jim Gray on escience: a transformed scientific method [EB/OL]. [2022-04-15]. https://citeseerx. ist. psu. edu/ viewdoc/download?doi=10.1.1.205.4026&rep=rep1&type=pdf
- [3] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell system technical journal, 1948, 27(3): 379–423. DOI: 10.1002/j. 1538–7305.1948. tb01338.x
- [4] WANG L, XIE S. Radio spectrum management policy, regulation and technology [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2018
- [5] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts [J]. Science China information sciences, 2020, 64(1): 1–74. DOI: 10.1007/s11432–020–2955–6
- [6] DUNKELMAN O, KELLER N, SHAMIR A. A practical-time related-key attack on the KASUMI cryptosystem used in GSM and 3G telephony [J]. Journal of cryptology, 2014, 27(4): 824–849. DOI: 10.1007/s00145–013– 9154–9
- [7] 3GPP. Security architecture and procedures for 5G system (release 15): 3GPP TS 33.501 V15.5.0 [S]. 2019
- [8] FURQAN H M, HAMAMREH J M, ARSLAN H. New physical layer key generation dimensions: subcarrier indices/positions-based key generation
   [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(1): 59–63. DOI: 10.1109/ LCOMM.2020.3025262
- [9] EBRAHIMI N, KIM H S, BLAAUW D. Physical layer secret key generation using joint interference and phase shift keying modulation [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2021, 69(5): 2673–2685. DOI: 10.1109/TMTT.2021.3058183
- [10] LIN K, JI Z J, ZHANG Y, et al. Secret key generation based on 3D spatial angles for UAV communications [C]//Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/WCNC49053.2021.9417510
- [11] LI G Y, SUN C, JORSWIECK E A, et al. Sum secret key rate maximization for TDD multi-user massive MIMO wireless networks [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2021, 16: 968–982. DOI: 10.1109/TIFS.2020.3026466
- [12] CHEN S L, PANG Z B, WEN H, et al. Automated labeling and learning for physical layer authentication against clone node and sybil attacks in industrial wireless edge networks [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2020, 17(3): 2041–2051. DOI: 10.1109/TII.2020. 2963962
- [13] PERAZZONE J B, YU P L, SADLER B M, et al. Artificial noise-aided MIMO physical layer authentication with imperfect CSI [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2021, 16: 2173–2185. DOI: 10.1109/ TIFS.2021.3050599
- [14] XIE N, HU T X. Improving the covertness in the physical-layer authentication [J]. China communications, 2021, 18(3): 122–131. DOI: 10.23919/JCC.2021.03.010
- [15] ZHANG C W, YUE J, JIAO L B, et al. A novel physical layer encryption algorithm for LoRa [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(8): 2512– 2516. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3078669
- [16] ZHANG Y Y, SHEN Y L, JIANG X H, et al. Secure millimeter-wave ad hoc communications using physical layer security [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2021, 17: 99–114. DOI: 10.1109/

TIFS.2021.3054507

- [17] CRIBBS M R, ROMERO R A, HA T T. Alternative codes and phase rotation extensions for alternating space-time coding-based physical layer security [J]. IEEE open journal of the communications society, 2021, 2: 1123–1143. DOI: 10.1109/OJCOMS.2021.3075910
- [18] CHOI J, JOUNG J, CHO Y S. Artificial-noise-aided space-time line code for enhancing physical layer security of multiuser MIMO downlink transmission [J]. IEEE systems journal, 2022, 16(1): 1289–1300. DOI: 10.1109/JSYST.2021.3075721
- [19] 邬江兴. 网络空间内生安全发展范式 [J]. 中国科学(信息科学), 2022, 52(2): 189-204
- [20] JIN L, HU X Y, LOU Y M, et al. Introduction to wireless endogenous security and safety: Problems, attributes, structures and functions [J]. China communications, 2021, 18(9): 88–99. DOI: 10.23919/JCC.2021.09. 008
- [21] 邬江兴. 网络空间拟态防御导论-上册 [M]. 北京: 科学出版社, 2017
- [22] 邬江兴. 网络空间内生安全-下册: 拟态防御与广义鲁棒控制 [M]. 北京: 科学 出版社, 2020
- [23] WU J X. Cyberspace mimic defense [M]. Cham: Springer, 2020
- [24] 关于内生安全拟态防御 [EB/OL]. (2020-07-20)[2022-04-15]. https://www.aqniu.com/vendor/68666.html
- [25] 我国网络内生安全试验场正式开通上线. [EB/OL]. (2019-05-23)[2022-04-15]. https://baijiahao.baidu.com/s?id=1634283791171509738
- [26] LIANG Y C, CHEN J, LONG R Z, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for smart wireless environments: channel estimation, system design and applications in 6G networks [J]. Science China information sciences, 2021, 64(10): 1–21. DOI: 10.1007/s11432–020–3261–5
- [27] 崔铁军. 电磁超材料: 从等效媒质到现场可编程系统 [J]. 中国科学(信息科学), 2020. 50(10): 1427-1461
- [28] TANG W K, CHEN M Z, DAI J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: new paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(2): 180–187. DOI: 10.1109/MWC.001.1900308
- [29] DAI L L, WANG B C, WANG M, et al. Reconfigurable intelligent surfacebased wireless communications: antenna design, prototyping, and experimental results [J]. IEEE access, 2020, 8: 45913–45923. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977772
- [30] SHLEZINGER N, ALEXANDROPOULOS G C, IMANI M F, et al. Dynamic metasurface antennas for 6G extreme massive MIMO communications [J]. IEEE wireless communications, 2021, 28(2): 106–113. DOI: 10.1109/ MWC.001.2000267
- [31] 金梁, 楼洋明, 孙小丽, 等. 6G 无线内生安全理念与构想 [EB/OL]. (2021-06-08)[2022-04-15]. https://doi.org/10.1360/SSI-2021-0095
- [32] JIN L, LOU Y M, XU X M, et al. Separating multi-stream signals based on space-time isomerism [C]//Proceedings of 2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). IEEE, 2020: 418–423. DOI: 10.1109/WCSP49889.2020.9299669
- [33] GRUBER F K, MARENGO E A. New aspects of electromagnetic information theory for wireless and antenna systems [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2008, 56(11): 3470–3484. DOI: 10.1109/ TAP.2008.2005468
- [34] WU H T, BAI G D, LIU S, et al. Information theory of metasurfaces [J]. National science review, 2020, 7(3): 561–571. DOI: 10.1093/nsr/nwz195
- [35] MA Q, CUI T J. Information metamaterials: bridging the physical world and digital world [J]. PhotoniX, 2020, 1: 1. DOI: 10.1186/s43074-020-00006-w
- [36] CUI T J, LIU S, LI L L. Information entropy of coding metasurface [J]. Light: science & applications, 2016, 5(11): e16172. DOI: 10.1038/lsa.2016. 172
- [37] LIU S, CUI T J, ZHANG L, et al. Convolution operations on coding metasurface to reach flexible and continuous controls of terahertz beams [J]. Advanced science, 2016, 3(10): 1600156. DOI: 10.1002/advs. 201600156
- [38] 邬江兴, 胡宇翔. 网络技术体系与支撑环境分离的发展范式 [J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(8): 1-11. DOI: 10.12267/j.issn.2096-5931.2021.08. 001
- [39] LIN X, RIVENSON Y, YARDIMCI N T, et al. All-optical machine learning using diffractive deep neural networks [J]. Science, 2018, 361(6406): 1004–1008. DOI: 10.1126/science.aat8084
- [40] LIU C, MA Q, ZHANG J, et al. Programmable artificial intelligence machine for wave sensing and communications [EB/OL]. [2022–04–15]. https://assets. researchsquare.com/files/rs-90701/v1\_covered.pdf? c=1646851710. DOI: 10.21203/rs.3.rs-90701/v1

#### 作者简介



金梁, 战略支援部队信息工程大学教授、博士生 导师; 主要研究领域为移动通信及无线内生安全; 先后主持承担国家"863"计划重大项目、国家 科技重大专项、国家自然科学基金、国家重点研 发计划项目、装发预研等10余项,主持制定移动 通信安全领域国家技术标准、国家军用标准各1 项; 获得国家科技进步奖一等奖1项、国家级教学 成果奖一等奖1项、军队科技进步奖一等奖2项;

发表论文150余篇,申请发明专利30余项,出版译著1部。



**孙小丽**,战略支援部队信息工程大学助理研究员; 主要研究领域为无线通信及安全;先后参与基金 项目3项,获科研成果奖3项;发表论文20余篇。



钟州,战略支援部队信息工程大学副教授;主要 研究领域为无线通信及安全;先后主持和参与基 金与重大项目10余项;获军队科技进步奖一等 奖、国家保密局保密科学技术奖三等奖;发表论 文40余篇,获授权专利14项,出版著作2部。



许晓明,战略支援部队信息工程大学副研究员; 主要研究领域为无线通信及安全;先后主持和参 加基金与重大项目10余项;发表论文20余篇, 获授权专利5项,出版译著1部。



**陈如翰**,战略支援部队信息工程大学在读博士研究生;主要研究领域为信息论、格码及其在无线 通信中的应用。



**张剑**,战略支援部队信息工程大学教授、博士 生导师;主要研究领域为无线内生安全和无线 光通信。



\$P\$12, 战略支援部队信息工程大学教授、博士 生导师,中国工程院院士;长期从事计算技术、 网络安全、通信网络等领域的科学技术研究工 作;曾获国家科技进步奖创新团队奖1项、一等 奖3项、二等奖4项;2018年以来出版中英文专 著4部。

## 集成石墨烯的太赫兹波束成形 智能超表面



**司黎明/SI Liming,汤鹏程/TANG Pengcheng,吕昕/LYU Xin** (北京理工大学毫米波与太赫兹技术北京市重点实验室,中国 北京,

100081) (Beijing Key Laboratory of Millimeter Wave and Terahertz Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China) DOI:10.12142/ZTETJ.202203003 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220607.1132.002.html 网络出版日期: 2022-06-07 收稿日期: 2022-05-16

摘要:提出了一种基于石墨烯的太赫兹智能超表面(RIS)。通过调节化学势能,该智能超表面能够实现对线极化太赫兹波的反射相位动态控制, 进而实现太赫兹波束成形。为了获得超单元360°的反射相位调控范围,设计了工字形金属谐振器集成石墨烯的超单元结构,这种集成结构加强 了超表面的局部电场,拓展了反射相位动态调控范围。基于异常反射和编码超材料原理,该智能超表面可具备近场波束偏转和远场波束分裂等波 束成形功能,为灵活调控太赫兹波提供了新的思路,有望运用到6G无线通信、太赫兹遥感、空间态势感知等领域。

关键词:太赫兹;智能超表面;石墨烯;异常反射;编码超材料;波束成形

Abstract: A graphene-based reconfigurable intelligent surface (RIS) is proposed for terahertz beamforming. By adjusting the chemical potential energy, the reflection phase of linearly polarized incident electromagnetic wave can be controlled. In order to obtain the 360° reflection phase control range, a Gong-shaped metal resonator integrated graphene structure is designed. The Gong-shaped metal resonator strengthens the local electric field of metasurface, widening the regulation range of reflection phase. According to the principle of anomalous reflection and coding metasurface, the deflection of near-field beam and splitting of far-field beam are realized, which could be a new idea for flexible regulation of terahertz beamforming. The results show that the proposed graphene-based terahertz RIS can be expected to play a key role in 6G communication, terahertz remote sensing, and space situational awareness.

Keywords: terahertz; reconfigurable intelligent surface; graphene; anomalous reflection; coding metasurface; beamforming

林兹 (Terahertz, THz) 波是指频率在0.1~10 THz之间 的电磁波。相较于微波和毫米波,太赫兹波能够为无 线通信提供更宽的绝对频谱带宽<sup>[1]</sup>。太赫兹技术有望成为未 来6G通信和空间态势感知的关键技术。近年来,研究者们 提出利用智能超表面 (RIS)来动态传输和接收电磁波,实 现波束成形<sup>[2]</sup>。集成有源器件使得由亚波长人工电磁结构二 维周期排布形成的超表面,具备主动调控电磁波的功能。 RIS对电磁波的主要调控功能包括波束偏转、波束分裂、极 化变换、轨道角动量调控、幅度和相位控制等,旨在以智能 方式重新配置无线环境,将在非视距通信场景中得到广泛应 用,可以有效弥补无线通信中的一些不足,有利于实现无线

#### 信号的多用户覆盖。

受限于较低的截止频率和较高的损耗,传统有源器件难 以高效率地工作于太赫兹波段。研究者们探索了集成肖特基 二极管、互补金属氧化物半导体(CMOS)晶体管、光活性 半导体材料、二氧化钒等可调谐器件和材料在太赫兹可重构 超表面上的应用<sup>[3]</sup>。石墨烯作为一种新兴的二维晶格结构材 料,拥有载流子迁移率高、机械强度大、可调谐性能强等优 点,可以高效调节电磁波,具有巨大的应用潜力<sup>[4]</sup>。电磁特 性可以通过改变化学势能来实现轻松调谐,因此石墨烯越来 越多地被运用于衰减器、可调谐天线、吸波器等可重构射频 器件的设计和制作中<sup>[5]</sup>。相位是电磁波的一个重要基本属 性,是RIS实现波束调控和波束成形的核心参数。在集成石 墨烯太赫兹智能超表面的研究方面,MIAO Z. Q.等所设计的 具有栅极调控功能的反射型石墨烯超表面实现了 243°的动 态相位调控范围<sup>[6]</sup>, ZHANG Z.等提出的石墨烯-金属杂化超

基金项目: 国家重点基础研究项目(2019-JCJQ-349); 国家重点研发计划 (2018YFF0212103); 国家自然科学基金(61527805); 高等学校学科创新引智 计划项目(B14010); 北京理工大学国际合作项目(BITBLR2020014)

表面在 4.5 THz 实现了 295°的动态相位调控范围<sup>(7)</sup>,但是这些成果都没有实现 360°的动态相位调控范围。

本文提出一种集成石墨烯太赫兹智能超表面,其特点是 能够实现更宽的动态相位调控范围(可达到360°),可以更 灵活有效地调控太赫兹反射相位。更宽的动态相位调控范围 是应对各种复杂波束成形需求的前提。基于所设计的超单元 (Meta-Atom),本文探究了太赫兹波束成形 RIS 前端设计思 路,实现了对太赫兹电磁波的近场和远场波束调控。本文的 结构安排如下:首先对所设计的超表面的结构和可重构机制 进行阐述,随后讨论基于所设计的集成石墨烯智能超单元实 现的电磁波近场波束偏转和远场波束分裂功能,最后对文章 内容进行总结。

#### 1 集成石墨烯智能超表面结构设计

智能超表面由二维周期排列的超单元所构成。本文设计的集成石墨烯超表面及单元结构如图1所示。超单元沿着 x 轴和 y 轴周期分布,由高度为 h 的 TOPAS(指环烯烃类共聚物)介质基板支撑。TOPAS(相对介电常数为2.34,损耗角 正切为0.000 07)在太赫兹频段上能够保持稳定的介电常数,并且拥有较低的吸收损耗,是理想的太赫兹介质基板材料<sup>[8]</sup>。最上层是厚度为 t 的工字形金属谐振器,介质基板和工字形谐振器之间为石墨烯条带,最下层为金属地板。工字形谐振器和金属地板均为 Ag(电导率为4.56 × 10<sup>7</sup> S/m)材质。超单元的具体结构参数如表1 所示。该超表面可以采用先进微制造工艺进行加工制造。首先在 SiO<sub>2</sub>衬底上沉积一层厚的金薄膜,在顶部旋涂 TOPAS;然后通过湿法转移石墨 烯层,并使用光刻和等离子体刻蚀技术对石墨烯进行蚀刻,



▲图1集成石墨烯太赫茲智能超表面和超单元结构

得到条带结构;最后,使用光刻和剥离工艺对金结构进行图

▼表1集成石墨烯太赫茲智能超表面结构参数

参数	а	b	С	d	W	р	h	t
数值/μm	100	84	20	8	110	120	78	0.2
a:工字形谐振器沿x轴方向的长度 c:工字形谐振器末端加载的长度 h:介质基板的高度 t:工字形谐振器的金属厚度			b:工字形谐振器连接臂的长度 d:工字形谐振器的金属宽度 p:超单元的晶格长度 w:石墨烯条带的宽度					

案化处理。

本文所设计的超表面的可重构特性源于选用的石墨烯材 料导电特性可调。单层石墨烯的厚度很薄,仅为0.35 nm。 为了便于计算和分析,我们通常选用复电导率面模型表征。 石墨烯的导电特性由载流子带内跃迁和带间跃迁共同产生, 可以由Kubo公式来描述<sup>[9]</sup>:

$$\sigma_g = \sigma_{intra} + \sigma_{inter}, \tag{1}$$

$$\sigma_{intra} = \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}} \frac{e^2}{\pi\hbar^2} \cdot 2k_B T \cdot \ln\left[2\cosh\left(\frac{\mu}{2k_B T}\right)\right],\tag{2}$$

$$\sigma_{\rm inter} = i \frac{e^2}{4\pi\hbar} \ln \left[ \frac{2|\mu| - (\hbar\omega + i\tau^{-1})}{2|\mu| + (\hbar\omega + i\tau^{-1})} \right], \tag{3}$$

其中, $\omega$ 表示角频率, $\tau$ 表示弛豫时间,e表示基本电荷常数, $\hbar$ 表示普朗克常数, $k_B$ 表示玻尔兹曼常数,T表示温度,  $\mu$ 表示化学势能。

根据 Pauli 不相容原理, 红外线频率以下波段上石墨烯的 导电特性主要由带内跃迁产生。如果 $\mu >> k_BT$ 且 $\mu < \hbar \omega/2$ , 公式(2)可以继续简化为 Drude模型:

$$\sigma_s = \frac{\mathrm{i}e^2\mu}{\pi\hbar^2(\omega + \mathrm{i}\tau^{-1})_{\circ}} \tag{4}$$

石墨烯的化学势能由载流子密度 n<sub>s</sub>决定,如公式(5) 所示:

$$n_{s} = \frac{2}{\pi \hbar^{2} v_{f}^{2}} \int_{0}^{\infty} \varepsilon \left[ f_{d} (\varepsilon - \mu) - f_{d} (\varepsilon + \mu) \right] \partial \varepsilon, \qquad (5)$$

其中, $\varepsilon$ 表示电子(空穴)的动力学能量, $f_d(\varepsilon)$ 表示费米狄 拉克分布函数, $v_i$ 表示电子速度。

偏置电压 $E_{\text{bias}}$ 对石墨烯载流子密度的影响可由公式(6) 描述:

$$n_s = \frac{E_{\text{bias}}\varepsilon_r \varepsilon_0}{eh},\tag{6}$$

其中, $\varepsilon_r$ 表示绝缘层的相对介电常数, $\varepsilon_0$ 表示真空介电常数,h表示绝缘层的厚度。

当施加于石墨烯的偏置电压改变时,载流子密度会随之 发生变化,因此可以进一步推导得出偏置电压*E*<sub>bias</sub>和化学势 能*µ*之间关系:

$$\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \pi \hbar^2 v_f^2}{2eh} E_{\text{bias}} = \int_0^\infty \varepsilon \left[ f_d(\varepsilon - \mu) - f_d(\varepsilon + \mu) \right] \partial \varepsilon$$
(7)

如图1(a)所示,沿着y轴方向延伸的石墨烯条带将超单元分成了一排排子阵。石墨烯条带的宽度为w。在石墨烯条带的末端设置一系列独立的金属电极,并在金属电极和地板之间构造偏置电路。当对每一列超单元施加不同的栅极电压 V<sub>i</sub>(*i*=1,2,3…)时,同一列中石墨烯的化学势将同时被对应调整<sup>[10]</sup>。选用条带形石墨烯可以有效减小相邻超单元子阵之间的耦合。

#### 2 超单元反射特性研究

我们使用CST 微波工作室的频域求解器,对本文提出的 集成石墨烯超单元的反射幅度和相位进行仿真计算。激励为 沿着-z轴方向垂直入射的y轴方向线极化电磁波。在仿真过 程中,超单元的x和y方向均设置为单元边界,以模拟二维 周期排布的情形。石墨烯的弛豫时间设置为1ps,温度为 293 K,化学势能范围为0~0.6 eV。

图2描绘了不同化学势能条件下,超单元在0.5~1.5 THz 频段上的反射幅度和反射相位。图2(a)显示,当化学势 能为0 eV时,0.85 THz和1.3 THz附近超单元的反射幅度较 低。这说明超单元在这两个频点上,对电磁波的吸收能力较 强,并产生了谐振。随着化学势能的提高,低频点处的吸收 峰发生蓝移,吸收带宽变窄,吸收峰值变高,高频点处的吸 波峰逐渐消失。超单元的谐振特性会对反射相位特性产生影 响,反射幅度的变化趋势同样体现在反射相位上。由图2(b) 可知,当化学势能为0 eV,反射相位在0.85 THz附近发生接 近 360°的陡峭变化,在1.3 THz附近发生微扰。随着化学势 能的提高,低频点处相位陡峭变化的范围缩小,斜率变大, 并发生蓝移,同时高频处的相位扰动消失。超单元的谐振频 点不断偏移,使得1 THz频点处反射相位经历了接近 360°的 非线性变化。

图3(a)对比了1THz频点处,传统石墨烯条带和本文 提出的集成石墨烯超单元在化学势能0~0.6 eV变化区间归一 化的相位变化特性。传统石墨烯条带的反射相位变化范围为 0°~251°。复合金属谐振器的集成石墨烯超单元的反射相位 变化范围为0°~360°,相位变化范围相较于前者拓宽了 43%。图3(b)和图3(c)展示了石墨烯复合金属超表面 xoz横截面的电场分布,可以看出,相邻的超单元之间产生 了较强的局部电场。图3(d)和图3(e)表明石墨烯条带 超表面的电场主要集中在石墨烯层和地板之间。石墨烯复合 金属超表面中的工字形谐振器引入新的金属谐振模式,拓宽 了超表面反射相位的变化范围。

#### 3 RIS 实现太赫兹波束成形

RIS的总辐射场可以被看作构成它的超单元的辐射场总和。因此,对每个单元的散射特性独立控制,便可以实现对 波束的自由调控,即波束成形。常见超表面波束调控原理包 括异常反射原理、编码超材料原理等。

#### 3.1 太赫兹波近场调控

异常反射原理首先由美国哈佛大学的F. CAPASSO教授团队于2011年在《科学》期刊上提出<sup>[11]</sup>。在媒质分界面利



▲图2 超单元反射特性热力图



#### ▲图3 超单元在1 THz 频点的反射相位及电场分布

用金属平面谐振器可实现电磁波的相位跳变,突破传统光学 元件依靠光程差积累逐渐相位变化的设计框架限制。相位的 不连续性为电磁波的波束设计提供了极大的灵活性。在媒质 分界面上引入成线性变化的传播相位,能够实现对电磁波束 前进方向的控制。相位梯度和角度偏转之间存在的对应关系 可以用广义斯涅尔定律来描述:

$$n_r \sin \theta_r - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}x}, \qquad (8)$$

其中, $\theta_i$ 和 $\theta_i$ 分别表示反射角和入射角(与超表面法线方向的夹角), $n_i$ 表示介质的折射率, $d\varphi/dx$ 表示单位长度上反射相位的变化, $\lambda_0$ 表示工作频率上电磁波对应的真空中的波长。

如果以等相位周期的排布方式形成梯度相位超表面,一 旦周期长度确定,则可以根据公式(9)计算出反射角度。

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{\lambda_0}{L}\right),\tag{9}$$

其中, *L*表示一个反射相位变化周期(360°)对应超单元的 排布长度。在实际过程中, *L*不能小于波长, 否则将会产生 表面波。由于超表面是由具有离散反射相位的超单元构成 的,所以*L* = *np*,其中*p*表示单元的晶格长度, *n*表示一个 反射相位变化周期对应的单元个数。

由公式(9)反推,根据需要的反射角度,可以计算超 单元反射相位梯度(相邻单元反射相位差)。

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi p}{\lambda_0} \sin \theta_r \tag{10}$$

例如,在1 THz频点处,当反射波发生10°、20°和30° 的近场波束偏转时,对应的相位梯度可以由公式(10)计算 得出,约为25°、50°、72°。如果沿着 x轴方向,将超材料 子阵顺序标号,根据图2(b)仿真出的化学势能与超单元 反射相位的对应关系,可以得到不同编号子阵对应的需要设 置的化学势能,如图4所示。需要注意的是,图4仅给出一 个反射相位变化周期内超表面子阵的化学势能设置情况。

按照计算得出的化学势能排布顺序可实现 28×28规模的超表面构建。激励设置为沿-z轴方向入射的y方向线极化 平面波,y极化反射电磁波的近场电场瞬时值可通过仿真获 得。图5展示了仿真结果。反射电磁波的等相位面分别发生 9.8°、19.5°和 30.1°的偏转,与理论值相符。反射波之所以 为非均匀平面波,是因为随着化学势能的改变,在反射相位 发生变化的同时,反射幅度也发生了变化。

近场波束偏转可以有效解决非视距通信发生的信号衰减 问题。多个可重构智能超表面相互配合,将使得空间电磁环 境的调控自由度变得更大。

#### 3.2 基于1 bit 编码原理的太赫兹波远场调控

编码超材料的概念由崔铁军院士在2014年首次提出<sup>[12]</sup>。 超材料的数字编码表征能有效建立起超材料物理世界和数字 世界之间的桥梁。由于超单元结构的亚波长特性,超材料可 以由连续的等效媒质参数来描述。类比于电路,具有连续媒 质参数的超材料可以称为模拟超材料。模拟超材料的缺点在 于当系统结构变得复杂时,分析和设计难度会变得很大。用 数字编码的思路来表征超材料的电磁特性,和通过改变数字 编码的空间排布来控制电磁波,有利于后续与可编程器件 (例如FPCA)的结合。





▲图4 不同偏转角度需求下,智能超表面化学势能的设置情况

编码超表面的远场调控原理可以用天线阵列原理来解释。对于垂直入射的平面电磁波,散射场远场函数为:

$$f(\theta,\varphi) = f_e(\theta,\varphi) \sum_{m=1}^{N} \sum_{n=1}^{N} \exp\left\{-i\left\{\psi(m,n) + KD\sin\theta\left[\left(m - \frac{1}{2}\right)\cos\varphi + \left(n - \frac{1}{2}\right)\sin\varphi\right]\right\}\right\},$$
(11)



▲图5 反射电磁波近场电场瞬时值

式中, $\theta$ 表示俯仰角, $\varphi$ 表示方位角, $f_e(\theta,\varphi)$ 表示反射幅度 (假设每个单元的反射幅度相等), $\psi(m,n)$ 表示每个单元的 反射相位,D表示单元间距,K表示相位常数。

反射相位相差为180°的两种超单元(以数字"0"和 "1"表示),通过编码构成阵面。该类超表面被称为1 bit编码 超表面。数字编码0和1排列组合方式有2<sup>n</sup>种,理论上可以实 现2<sup>n</sup>种散射方向图。这里我们将化学势能分别为0.15 eV和 0.33 eV条件下的本文所设计的超单元映射为数字编码"0" 和"1"。图6展示了1 bit编码超单元的反射特性曲线。其



▲图61bit编码超单元的反射特性

中,1 THz频点处编码0和编码1单元反射相位相差182°,反射幅度接近,分别为0.61和0.6。

4 组 超表面子阵可以组成更大的子阵。对此按照000000、010101和001011的编码方式设置化学势能,并构成24×24规模的超表面。仿真得到1 THz频点超表面的远场散射方向图如图7所示。其中,000000对应的阵面实现了单波束反射,010101对应的阵面实现了双波束反射,001011对应的阵面实现了四波束反射。

基于编码超材料思想的远场波束分裂有利于实现空间维 度上多用户接入。实际实现中,通常提前将不同电磁响应的 编码序列存储于控制单元。通过加载切换序列,可完成多种 不同功能的切换。

#### 4 结束语

本文所设计的集成石墨烯的太赫兹智能超表面具备反射 相位360°的动态相位调控范围,可以应用于太赫兹波束成 形。利用该特性,本文将该单元应用于梯度相位超表面和



▲图7 编码超表面排布方式及散射远场图

1 bit 编码超表面的设计中。在不同化学势能条件下,梯度相 位超表面对应的反射波的偏转角度动态可调,1 bit 编码超表 面的远场散射方向图可以在单波束、双波束和四波束之间自 由切换。数值仿真与理论计算结果一致性较好,证明了该设 计方案的有效性。集成石墨烯的智能超表面对太赫兹波近场 和远场均具有优异的动态调控性能,是一种有效的太赫兹 RIS构筑方法,有望运用到6G无线通信、太赫兹遥感、空间 态势感等领域。

#### 参考文献

- [1] LIU K X, JIA S, WANG S W, et al. 100 Gbit/s THz photonic wireless transmission in the 350 GHz band with extended reach [J]. IEEE photonics technology letters, 2018, 30(11): 1064–1067. DOI: 10.1109/ LPT.2018.2830342
- [2] LI L L, TIE J C, JI W, et al. Electromagnetic reprogrammable codingmetasurface holograms [J]. Nature communications, 2017, 8: 197. DOI: 10.1038/s41467-017-00164-9
- [3] YANG F Y, PITCHAPPA P, WANG N. Terahertz reconfigurable intelligent surfaces (RISs) for 6G communication links [J]. Micromachines, 2022, 13(2): 285. DOI: 10.3390/mi13020285
- [4] ZHU W R, RUKHLENKO I D, SI L M, et al. Graphene-enabled tunability of optical fishnet metamaterial [J]. Applied physics letters, 2013, 102(12): 121911. DOI: 10.1063/1.4799281
- [5] RYZHII V, OTSUJI T, SHUR M. Graphene based plasma-wave devices for terahertz applications [J]. Applied physics letters, 2020, 116(14): 140501. DOI: 10.1063/1.5140712
- [6] MIAO Z Q, WU Q, LI X, et al. Widely tunable terahertz phase modulation with gate-controlled graphene metasurfaces [J]. Physical review X, 2015, 5 (4): 041027. DOI: 10.1103/physrevx.5.041027
- [7] ZHANG Z, YAN X, LIANG L J, et al. The novel hybrid metal-graphene metasurfaces for broadband focusing and beam-steering in farfield at the terahertz frequencies [J]. Carbon, 2018, 132: 529–538. DOI: 10.1016/j. carbon.2018.02.095
- [8] ZHANG Y, FENG Y J, ZHAO J M. Graphene-enabled tunable multifunctional metamaterial for dynamical polarization manipulation of broadband terahertz wave [J]. Carbon, 2020, 163: 244–252. DOI: 10.1016/j. carbon.2020.03.001
- [9] HANSON G W. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene [J]. Journal of applied physics, 2008, 103(6): 064302. DOI: 10.1063/1.2891452
- [10] WANG Y, WANG Y, YANG G H, et al. All-solid-state optical phased arrays of mid-infrared based graphene-metal hybrid metasurfaces [J]. Nanomaterials (Basel, Switzerland), 2021, 11(6): 1552. DOI: 10.3390/ nano11061552
- [11] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. Science,

2011, 334(6054): 333-337. DOI: 10.1126/science.1210713

[12] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. Light: science & applications, 2014, 3(10): e218. DOI: 10.1038/lsa.2014.99



#### 作者简介

**司黎明**,北京理工大学副教授、博士生导师,集 成电路与电子学院副院长;主要从事电磁场与微 波技术的教学和研究工作,研究领域包括超材料/ 超表面、新型天线技术、太赫兹技术与应用、人 工智能与优化算法、雷达仿真与目标识别等;主 持和参与国家重点基础研究发展计划("973" 计划)、国家高技术研究发展计划、国家自然科

学基金、GF预研及横向科研项目数十项;发表论文80余篇。



汤鹏程,北京理工大学在读博士研究生;主要研究领域为电磁场与微波技术、超材料技术。



吕昕,北京理工大学教授、博士生导师,中国电 子学会会士,中国电子学会学术委员会委员,中 国电子学会微波分会副主任委员,中国测试计量 学会副主任委员;主要从事电磁场与微波技术的 教学和研究工作,研究领域包括毫米波太赫兹技 术与系统、毫米波太赫兹集成电路、射频微波集 成电路等;主持"高灵敏度毫米波太赫兹波双频 共口径联合相参云雷达仪"等多项重点项目,长

期开展太赫茲器件、太赫茲成像、太赫茲通信系统的研制工作,相 关成果已经成功应用在太赫茲高速通信系统上;发表学术论文100 余篇,拥有多项国家专利。

## 智能超表面的设计及应用



### Design and Application of Reconfigurable Intelligent Surface

#### 柯俊臣/KE Junchen,梁竟程/LIANG Jingcheng, 程强/CHENG Qiang

(东南大学,中国 南京 210096) (Southeast University, Nanjing 210096, China)

#### DOI:10.12142/ZTETJ.202203004 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220620.1712.010.html 网络出版日期: 2022-06-21 收稿日期: 2022-05-23

摘要:通过对智能超表面(RIS)基本概念、方法和应用的介绍,展现了其采用数字编码方式调控电磁波各种物理特性的独特能力。深入讨论了 RIS在时空域调控中的关键技术以及这些技术所衍生的示范性应用,包括成像、感知、通信与雷达等多个领域。充分展示了RIS在相关行业内的 应用前景。

关键词: RIS; 波束赋形; 非线性谐波调控; 全息成像; 无线通信

Abstract: Through the introduction of the basic concepts, methods, and applications of the reconfigurable intelligent surface (RIS), the unique ability of RIS to regulate various physical characteristics of electromagnetic waves is shown. The key technologies of RIS in space-time manipulation are discussed in detail, as well as some iconic applications derived from these technologies in the field of imaging, perception, communication, radar, etc., which fully demonstrates the application prospect of reconfigurable intelligent surface in related industries.

Keywords: RIS; beamforming; nonlinear harmonic manipulation; holography; wireless communication

**5**G技术目前正处于快速商用的时期,同时6G技术也在紧 锣密鼓地研发之中。万物互联带来的人与人、人与物、 物与物之间的海量数据传输,对现有网络的可靠性、实时 性、传输速率、网络容量、流量密度等方面提出了全新挑 战。在众多新兴技术中,具有智能感知、操控能力的智能超 表面(RIS)技术逐渐引起了全球通信领域学者的密切关 注<sup>[1]</sup>,成为6G无线通信的关键使能技术之一。

超表面是一种由亚波长尺度单元(典型值为1/10~1/3个 波长)按特定空间排布形成的人工电磁结构,具有轻质量、 低剖面、易集成、易共形等特点<sup>[2]</sup>。传统的超表面在设计制 造完成后,其电磁波响应及电磁功能就被固化了,无法再根 据实际需求进行改变。但为应对复杂电磁系统的需求,超表 面的电磁特性往往需要灵活调节,因此可编程超表面的概念 应运而生。2014年崔铁军教授首次提出了数字编码与可编 程超表面的概念<sup>[2]</sup>,将超表面单元的反射和透射响应的不同 状态用二进制数值0/1来表示,并将预先设计的二进制编码

基金项目:国家重点研发计划(2017YFA0700201、2017YFA0700202、2017YFA0700203);国家自然科学基金(61631007、61571117、61138001、61371035、61722106、61731010、11227904);高等学校学科创新引智计划(111-2-05);江苏省前沿引领技术基础研究专项(BK20212002);中央高校基本科研业务费专项资金(2242022R10053)

序列输入至超表面控制器,实现对整个超表面阵列电磁特性的编程,进而实现特定的电磁功能。数字编码与可编程超表面的提出为超表面设计提供了全新的思路,简化了超表面设计与优化流程,并可与数字信号处理器件相结合形成更为先进的RIS。

通过加载特定的调控器件,如PIN管(P-I-N型二极管)、变容管和微机电系统(MEMS)开关等,RIS可以对 电磁波的幅度、相位、频率、极化等特性进行实时可编程 调控<sup>[3-5]</sup>,进而控制电磁波在自由空间中的传播行为,突破 传统无线信道无法主动调控的局限,构建智能可编程无线 环境的新范式<sup>[6]</sup>。同时,基于RIS的无线通信收发机硬件架 构具有架构简单、功耗低、成本低等特点<sup>[7]</sup>,仅使用RIS和 基带模块即可完成信息调制与传输,省去了信号混频、上 变频、放大等过程,为下一代无线通信提供了新的解决 方案。

#### 1 RIS对电磁波的操控原理

#### 1.1 空间波束赋形

图1(a)展示了一种由二进制数字"0"或"1"单元 构成1bit反射式RIS。其中,RIS在不同工作状态下的幅相 响应如图1(b)所示:单元在两种状态下的反射相位差为 180°。我们规定0°相位为编码"0",180°相位为编码"1"。 通过在RIS上输入不同的编码序列,实现对散射波束不同的 调控效果,如图1 (c)和 (d)所示。

#### 1.2 非线性谐波调控

在时间编码 RIS 提出之前,大多数研究工作只关注 RIS 的空间编码分布<sup>[8]</sup>,而忽视了其在时间维度上的应用。时间 编码 RIS 是一种利用时态参数来实现电磁波频谱调控的时变 器件。当 RIS 单元的电磁特性是时间函数时,它将变成一个 时变系统,并会产生非线性现象。文献[4]提出了时域 RIS 的 基础理论与设计方法。通过在时间域上对 RIS 的反射系数进 行周期性调制,反射波中将会产生非线性谐波分量,如图 2 (a)所示。此时,反射波的频谱相当于 RIS 的反射系数的频 谱被搬移到入射波频率处。那么对反射系数频谱的调控即可 简单地等效为对反射波频谱的调控。这意味着时间编码 RIS 拥有调控电磁波频谱的能力。

然而经进一步的研究发现,根据文献[4]提出的方法产

生的谐波的相位在幅度调节的过程中也发生了变化。为了解 除谐波幅度和相位之间的固有耦合,文献[9]提出了一种简 单高效的方法来实现谐波的幅度和相位的独立控制,如图2 (b)所示。由傅里叶变换理论可知,时间延迟的引入可以在 保持振幅的同时为频谱分量带来额外的相移。因此谐波幅度 和相位可以通过设计时间编码的相位差和时移来实现独立的 控制。

一个nbit的空间编码RIS包含2n种编码单元。RIS的比特数越高,其相位量化误差就越小,同时对电磁波的操控也更精准,但是过高的比特数会造成单元结构和控制线路与系统的设计非常复杂。文献[10]提出了一种基于时间编码来实现多比特相位的设计方法,具体如图2(c)所示。该方法利用一种矢量合成分析法来设计任意多比特的可编程相位,解决了多比特RIS设计的难题。通过设计时间编码序列,将原向量进行矢量叠加,可以实现任意的新向量。通过不同时间编码调制的反射波等效相位和幅度,相位覆盖率几乎可以达到预期的360°。在这种时空编码策略的支持下,可以用



1.3 多谐波联合调控

个任意多比特 RIS<sup>[11]</sup>。

文献[12]提出了时空编码RIS,通过在 空间域和时间域对RIS进行编码,可以实 现RIS在空、时、频域上对电磁波的多维 度调控<sup>[12-13]</sup>。如图2(d)所示,时空编码 RIS由加载了可调谐器件的单元构成,其 中每个单元可由周期性的时间编码独立控 制。通过将不同的控制信号加载到单元上, 时空编码RIS的状态在空域和时域上共同 编码,实现反射波波前和频谱的同时操控。 由于在空间编码的基础上引入了时间调制, 时空编码RIS可以在基波频率和谐波频率 下分别实现高精度的波束成形。

简单的单元结构和控制线路系统来实现一

为了实现灵活和连续的谐波波前控制, 参照空间域的卷积定理(即在一个 RIS上 进行傅里叶运算),文献[14]提出了非线性 散射方向波束偏转的方法。该方法可以将 谐波的散射波束偏折到任意方向,如图 2 (e)所示。文中将时间延迟 $t_0$ 引入时变反 射系数 $\Gamma(t)$ 中,因此在第k阶谐波频率上 将有一个额外的相位因子 $e^{-2\pi i f_0}$ 。通过动态 刷新单元之间的时延梯度,可以实时地调

#### ▲图1 RIS的空间波束赋形原理

热点专题



<sup>▲</sup>图2 RIS在非线性谐波调控中的应用

整 RIS上谐波的相位分布。将谐波的初始编码与预设的波束 偏转编码做卷积,就可以将谐波波束偏转到指定的角度。

#### 2 RIS的应用

#### 2.1 可编程全息成像系统

全息成像是一种通过对空间中电磁波/光的特征参数进行编码来实现成像的技术。基于超表面的全息成像具有高效率、高分辨率以及低噪声等特性,在过去的十几年中,科研工作者们相继提出了适用于各个电磁波频段的超表面全息技术。然而,其中大多数工作都是基于无源超表面实现的,它们对电磁波/光的幅度/相位等特征参数的编码是固定的,因此仅能用于重建静态的全息图像,应用场景受限。为了打破这一限制,文献[15]提出了基于1bit相位编码RIS的可编程微波全息成像系统<sup>[15]</sup>。

图3(a)是基于 RIS 的动态全息成像示意图。在不同偏 压下,加载 PIN 二极管的 RIS 单元具有不同的电磁性能,因 此可以通过改变偏压来动态调控其相位特性:当偏压分别为 3.3 V/0 V时,二极管的状态为"ON"/"OFF",单元分别工 作在"0"/"1"两种状态(7.8 GHz)。利用改进的 Gerchberg-Saxton 算法,可以计算出不同全息图像所需的编 码图案,并将其转换为电压编码序列预存在现场可编程门阵 列(FPGA)中。通过这些电压序列对20×20的 RIS 亚胞阵 列(每个亚胞包含5×5个单元)进行馈电。在平面波的照 射下, RIS 形成特定的1 bit 相位分布,从而在空间中实现了 一组动态全息图效果。实测的全息图像如图3(a)所示, 得到的全息影像清晰,且具有较高的分辨率和信噪比。另 外,通过设计幅度和相位独立可调的RIS,可以提高该成像 系统的性能。此外,该方法也可以向更高频段拓展。

#### 2.2 自适应智能感知

对于大多数数字编码和 RIS 而言,其丰富的电磁波调控 功能都是依靠预先编写好的 FPGA 控制程序来实现的,因此 人工干预的步骤必不可少。这使得一方面,基于超表面的系 统一直是一个开环系统,不利于复杂环境中的多系统协调运 作;另一方面,这些系统不包含传感和反馈组件,难以建立 具有自动决策功能的闭环智能系统。解决这个问题的关键在 于将传感器集成到可编程超表面中,从而构建具有自适应功 能的 RIS。

为了具体展示自适应RIS的应用,文献[16]预设了一个 RIS在卫星通信中的应用场景,如图3(b)所示。当飞机绕 地球飞行时,其飞行姿态将发生变化,RIS可以感知该变化 并自适应地调节波束辐射方向,从始至终聚焦于卫星来进行 稳定的通信。这种自适应RIS的特点是在超表面的背面集成 一个陀螺仪传感器、微控制器单元(MCU)和FPGA:传感 器可以检测RIS及其环境的空间姿态和运动状态,并将相应 的角度数据信息实时反馈并发送到FPGA;MCU和FPGA处 理这些数据并按预设的反馈算法产生相应的RIS波束赋形编 码序列。在这种机制下,RIS无需人工操作即可执行自主决 策功能,自动实现自适应波束转向,其波束随方位角的变化 情况如图3(b)所示。这种自适应智能感知模式在未来可 以与人工智能(AI)、大数据等先进技术相结合,从而进一





步扩展其对周围环 境的高精度感知、 学习和记忆等高级 功能。

#### 2.3 新体制无线通 信系统

在无线通信领 域中,传统的通信 系统需要利用数 模/模数转器、 调器以及射频器、 混 制/解因射频组件 等制和发射,其系 统架构繁杂,各组 件的成本也比较昂贵。RIS能够根据编码序列形成动态的远场辐射方向图/近场图案,而不同的方向图/近场图案可以表征不同的信息。基于这一思想,文献[17]、[18]提出了一种基于 RIS 的新体制无线通信架构,称之为直接数字调制(DDM)系统。DDM系统主要由 FPGA、RIS 和接收器组成,图4(a)展示了信息调制在远场辐射方向上的DDM系统的通信机制示意图;图4(b)展示了待传输的原始图像和接收到的图像,该结果证明了该系统的有效性。

近几年,科研人员在时域编码和时空编码 RIS 的理论研究中取得了丰硕的成果<sup>[4],19-14]</sup>。时域编码和时空编码 RIS 能够 便捷、精确地控制信号幅度谱和相位谱,这使得基带信息的 调制可以直接在 RIS 界面上进行,无需经过数模转换、混 频、射频发射等过程。基于时域编码 RIS 理论,文献[4]提出 了一个二进制频移键控(BFSK)无线通信系统。图4(c) 为 BFSK 系统的示意图,图4(d)展示了接收端恢复出来的 图像信息,该结果证明了 BFSK 通信系统高效传输信息的能 力。系统在3.6 GHz的载波频率下工作,其数据传输速率为 78.125 kbit/s。为了提高通信系统的数据传输速率,文献[19] 进一步提出了基于 RIS的正交相移键控(QPSK)无线通信 系统<sup>[19]</sup>,系统的数据传输速率可达到1.6 Mbit/s,实现了流 畅、无损的视频传输。图4(e)展示了电影的无线传输场 景实物图。此后,文献[7]、[20]、[21]基于 QPSK通信架构进 一步地开发了基于 RIS的八进制相移键控(8PSK)、正交幅 度调制16QAM、256QAM的高阶调制体制无线通信方案,其 中文献[21]甚至推广到了毫米波领域应用,使得基于 RIS的 新体制无线通信架构得到了广泛推广。

在5G和6G移动通信中,服务于多用户场景的多信道无 线通信技术一直备受重视。解决多信道无线通信的一条重要 技术途径是信道复用技术。文献[22]提出了一种基于时空编 码 RIS 的空间-频率分集复用的多通道无线通信系统,它实 现了为多个不同位置的用户以不同频率独立地传输多个信息 源的功能,系统示意图如图4(f)所示:从图中可以看出,



不同的数据流可以直接 路由到位于不同方向的 指定用户,每个指定用 户都有自己独立的接收 频道和空间信道,而位 于其他信道的"无关" 用户则无法接收到正确 的信息。另外, 文献 [23]、[24] 提出了将 MIMO 技术融入到基于 RIS的新体制无线通信 系统的多用户通信解决 方案,可进一步发挥 RIS在多用户通信系统 中的巨大应用潜力,为 将来更先进的低成本的 超大规模 MIMO 系统提 供了一种很有潜力的实 现方案。

#### 2.4 波达方向(DOA) 估计

波达方向估计技术 是无线通信、雷达和声 呐探测领域内的一项关

<sup>▲</sup>图4 RIS在新体制无线通信系统中的应用

键技术。通过处理接收到的来波信号来估测、定位待测目标 的距离、方位等重要信息,该技术有助于构建智能无线网 络。RIS能够在一定的孔径面上同时、准确地感知和操控空 间电磁波,这为构建新型DOA估计系统提供了有力支持。 最近,文献[25]提出了一种基于RIS的DOA估计方案:作为 一个"随机电磁采样接收器",RIS生成一系列随机的辐射 方向图来感知、接收入射信号,随后通过压缩感知(CS) 和正交匹配追踪(OMP)算法对信号进行处理,从而恢复出 DOA信息。系统原理图如图5(a)所示。更进一步地,文献 [26]所提出的系统将DOA概念和方法应用在毫米波测向应用 中,利用时空编码RIS在毫米波频段实现了DOA估计,并且 可以根据不同的来波方向产生不同的电磁功能。系统原理图 如图5(b)所示。上述两种新型DOA估计系统为高精度电磁 波探测和操控铺平了道路,也促进了先进成像、雷达和无线 通信系统的开发。

#### 3 结束语

本文首先系统地介绍了 RIS 的基本概念、物理机理和设 计方法,展现了其在时-空-频等多维度内对电磁波进行调 控的能力,如空间波束赋形、非线性谐波调控与多谐波联合 操控。其次,展示了 RIS 的一些突破性应用,包括全息成 像、智能感知、无线通信与波达方向估计。作为超表面领域 的里程碑之一,RIS 将会为扩展超表面的应用领域,激发新 的活力,并且在未来更先进的系统中发挥重要作用。

#### 致谢

本文得到了东南大学信息科学与工程学院戴俊彦老师和

#### 在读博士生汪正兴的帮助和支持,在此表示感谢!

#### 参考文献

- [1] BASAR E, DI RENZO M, DE ROSNY J, et al. Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE access, 2019, 7: 116753-116773. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2935192
- [2] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. Light: science & applications, 2014, 3 (10): e218. DOI: 10.1038/lsa.2014.99
- [3] CUI T J, LIU S, ZHANG L. Information metamaterials and metasurfaces [J]. Journal of materials chemistry C, 2017, 5(15): 3644–3668. DOI: 10.1039/ c7tc00548b
- [4] ZHAO J, YANG X, DAI J Y, et al. Programmable time-domain digitalcoding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems [J]. National science review, 2018, 6(2): 231–238. DOI: 10.1093/nsr/nwy135
- [5] DEBOGOVIC T, PERRUISSEAU-CARRIER J. Low loss MEMSreconfigurable 1-bit reflectarray cell with dual-linear polarization [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(10): 5055-5060. DOI: 10.1109/TAP.2014.2344100
- [6] DI RENZO M, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2450–2525. DOI: 10.1109/JSAC.2020. 3007211
- [7] TANG W K, DAI J Y, CHEN M Z, et al. Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter [J]. Electronics letters, 2019, 55 (7): 417-420. DOI: 10.1049/el.2019.0400
- [8] LIU S, CUI T J, ZHANG L, et al. Convolution operations on coding metasurface to reach flexible and continuous controls of terahertz beams [J]. Advanced science, 2016, 3(10): 1600156. DOI: 10.1002/advs. 201600156
- [9] DAI J Y, ZHAO J, CHENG Q, et al. Independent control of harmonic amplitudes and phases via a time-domain digital coding metasurface [J]. Light: science & applications, 2018, (7): 90. DOI: 10.1038/s41377-018-0092-z
- [10] ZHANG L, WANG Z X, SHAO R W, et al. Dynamically realizing arbitrary multi-bit programmable phases using a 2-bit time-domain coding metasurface [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 68 (4): 2984–2992. DOI: 10.1109/TAP.2019.2955219
- [11] KE J C, DAI J Y, CHEN M Z, et al. Linear and nonlinear polarization syntheses and their programmable controls based on anisotropic time– domain digital coding metasurface [J]. Small structures, 2021, 2(1): 2000060. DOI: 10.1002/sstr.202000060



<sup>▲</sup>图5 RIS在波达方向估计中的应用

- [12] ZHANG L, CHEN X Q, LIU S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces [J]. Nature communications, 2018, 9(1): 4334. DOI: 10.1038/ s41467-018-06802-0
- [13] DAI J Y, YANG J, TANG W K, et al. Arbitrary manipulations of dual harmonics and their wave behaviors based on space-time-coding digital metasurface [J]. Applied physics reviews, 2020, 7(4): 041408. DOI: 10.1063/5.0017885
- [14] ZHANG C, YANG J, YANG L X, et al. Convolution operations on timedomain digital coding metasurface for beam manipulations of harmonics [J]. Nanophotonics, 2020, 9(9): 2771–2781. DOI: 10.1515/nanoph-2019– 0538
- [15] LI L L, TIE J C, JI W, et al. Electromagnetic reprogrammable codingmetasurface holograms [J]. Nature communications, 2017, (8): 197. DOI: 10.1038/s41467-017-00164-9
- [16] MA Q, BAI G D, JING H B, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions [J]. Light: science & applications, 2019, (8): 98. DOI: 10.1038/s41377-019-0205-3
- [17] CUI T J, LIU S, BAI G D, et al. Direct transmission of digital message via programmable coding metasurface [J]. Research (Washington, D C), 2019, 2019: 2584509. DOI: 10.34133/2019/2584509
- [18] WAN X, ZHANG Q, CHEN T Y, et al. Multichannel direct transmissions of near-field information [J]. Light, science & applications, 2019, (8): 60. DOI: 10.1038/s41377-019-0169-3
- [19] DAI J Y, TANG W K, ZHAO J, et al. Wireless communications through a simplified architecture based on time-domain digital coding metasurface [J]. Advanced materials technologies, 2019, 4(7): 1900044. DOI: 10.1002/ admt.201900044
- [20] DAI J Y, TANG W K, YANG L X, et al. Realization of multi-modulation schemes for wireless communication by time-domain digital coding metasurface [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 68 (3): 1618–1627. DOI: 10.1109/TAP.2019.2952460
- [21] CHEN M Z, TANG W K, DAI J Y, et al. Accurate and broadband manipulations of harmonic amplitudes and phases to reach 256 QAM millimeter-wave wireless communications by time-domain digital coding metasurface [J]. National science review, 2021, 9(1): nwab134. DOI: 10.1093/nsr/nwab134
- [22] ZHANG L, CHEN M Z, TANG W K, et al. A wireless communication scheme based on space- and frequency-division multiplexing using digital metasurfaces [J]. Nature electronics, 2021, 4(3): 218–227. DOI: 10.1038/s41928-021-00554-4
- [23] TANG W K, DAI J Y, CHEN M Z, et al. MIMO transmission through reconfigurable intelligent surface: system design, analysis, and implementation [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2683–2699. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007055
- [24] CHEN X Y, KE J C, TANG W K, et al. Design and implementation of MIMO transmission based on dual-polarized reconfigurable intelligent surface [J].

IEEE wireless communications letters, 2021, 10(10): 2155-2159. DOI: 10.1109/LWC.2021.3095172

- [25] LIN M T, XU M, WAN X, et al. Single sensor to estimate DOA with programmable metasurface [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8 (12): 10187–10197. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3051014
- [26] DAI J Y, TANG W K, WANG M T, et al. Simultaneous in situ direction finding and field manipulation based on space-time-coding digital metasurface [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2022, (99): 1. DOI: 10.1109/TAP.2022.3145445

者简介

ľΈ



**柯俊臣**,东南大学信息科学与工程学院在读博士 生;主要研究方向为可编程超表面、阵列天线和 基于智能超表面的无线通信系统;发表论文2篇。



**梁竟程**,东南大学信息科学与工程学院在读博士 研究生;主要研究方向为智能超表面设计;发表 论文2篇。



程强,东南大学信息科学与工程学院教授,2008年 和2010年担任南京超材料国际研讨会副主席;主要 研究方向为超材料的物理机理、设计理论及其在通 信、雷达和天线中的应用;获2010年《New Journal of Physics》最佳论文奖、2010年中国科学 十大进展奖、2014年国家自然科学奖\_\_等奖;发表 论文100余篇,被引用2000余次。

## 智能反射面辅助的无线信息与 能量传输研究综述



Survey on Intelligent Reflecting Surface–Assisted Wireless Information Transmission and Power Transfer

 庞海舰/PANG Haijian<sup>1</sup>,陈健锋/CHEN Jianfeng<sup>1</sup>, 张广驰/ZHANG Guangchi<sup>1</sup>,崔苗/CUI Miao<sup>1</sup>, 武庆庆/WU Qingqing<sup>2</sup>
 (1. 「东工业大学,中国「东 510006;

2. 澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室,中国 澳门 999078)
 (1. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;
 2. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City, University of Macau, Macau 999078, China)

DOI:10.12142/ZTETJ.202203005 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220620.1541.004.html 网络出版日期: 2022-06-21 收稿日期: 2022-06-10

摘要:智能反射面(IRS)是6G的关键技术之一。优化IRS的被动反射波束赋形,能够对无线信息传输(WIT)与无线能量传输(WPT)进行 辅助,从而大幅提高频谱效率。全面介绍了IRS的研究现状。首先,对IRS辅助WIT的研究现状进行了归纳分析,表明IRS对提升系统通信性能 起到关键作用;然后,对IRS辅助WPT的研究进行了梳理,揭示了IRS在大幅提升能量传输效率方面的潜能;随后,重点叙述了IRS辅助无线 携能通信的研究现状,并展望了物理层安全、无人机通信和多IRS协同辅助等6个新研究主题和方向。

#### 关键词: IRS; WIT;WPT;无线携能通信

Abstract: With the ability to assist and greatly improve the spectrum efficiency of wireless information transmission (WIT) and wireless power transfer (WPT), intelligent reflecting surface (IRS) is envisioned as a key technology for future 6G communications. A comprehensive overview of the domestic and international research status of IRS-assisted WIT and WPT is proposed. First, the research on IRS-assisted WIT is summarized and analyzed, which shows that IRS plays an essential role in improving the performance of various WIT systems. Second, the research on IRS-assisted WPT is discussed, which reveals the great potential of the IRS in enhancing energy transfer efficiency. Then, the research on IRS-assisted simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT) is emphatically described, and six future research directions of IRS-assisted SWIPT are prospected, including physical layer security, unmanned aerial vehicle (UAV) communication, multi–IRS cooperative assistance, and so on.

Keywords: IRS; WIT; WPT; simultaneous wireless information and power transfer

前,5G无线通信系统正在全球范围内迅速部署和应用。互联网新兴产业的出现以及传统业务的更新迭代,均对无线通信的服务质量提出了更高的要求,即需要更高的频谱效率、更高的能源效率以及更可靠的链接服务。为了满足上述需求,近年来出现了许多面向5G系统的新技术<sup>[1]</sup>,例如增强型移动带宽(eMBB)和大规模多输入多输出

(Massive MIMO)等。然而,目前技术的应用仍存在着能源 消耗多、硬件实现成本高以及信号处理复杂等缺点。近年 来,作为一种能够以低成本的方式重构无线信道、有效提升 信道质量的新技术,智能反射面(IRS)被提出,并获得了 业界的关注<sup>[2]</sup>。

随着未来异构无线网络和智慧城市的发展,预计到 2025年,全球的物联网设备数量将增加到220亿。数量如此 庞大的无线设备要求无线通信系统不仅能提供更广泛的覆盖 和更稳健的链接,还要提供永久的能量供应。为此,基于射 频传输的远场无线能量传输(WPT)已成为一种实际可行且 具有巨大潜能的用于物联网设备无线供电的技术<sup>[3]</sup>。但是, 由于无线信道的路径损耗、阴影和多径衰减,以及长距离传

基金项目: 广东省科技计划项目 (2021A0505030015、2020A050515010); 广 东特支计划项目 (2019TQ05X409); 智慧城市物联网国家重点实验室 (澳门大 学) 开放课题 (SKL-IoTSC (UM) -2021-2023/ORPF/A04/2022); 澳门科学 技术发展基金项目 (SKL-IOTSC (UM) -2021-2023、0119/2020/A3、0108/ 2020/A); 广东省自然科学基金 (2021A1515011900)

输等原因,WPT通常运行在低能效的状态下。因此,如何 提高WPT效率是应对未来无线网络设计的一个关键且具有 挑战性的问题。IRS在辅助无线信息传输(WIT)方面具有 优越性。WIT和WPT均工作在射频频段上,因此,可以预 见IRS将成为有效提高WPT效率的重要技术之一。

#### 1 IRS辅助WIT技术

IRS由大量低成本无源元件组成(通常被称为反射单元),可通过软件进行配置和编程。反射单元的几何和物理特性受到偏置电压的影响,因此它们能够独立地控制入射信号振幅和相移<sup>[4]</sup>。IRS可以使入射信号以指定方向反射或传输,从而增加通信链路和优化自由度。图1显示了一个典型的IRS辅助WIT系统。系统包含1个无线接入点(AP)、1个IRS以及K个终端信息接收用户(IU)。AP下行向用户发送信息。IRS通过反射创建新的链路;通过控制反射信号的相位,使有用信号同相叠加,无用信号反相抵消,从而提高通信性能。



▲图1 典型的IRS 辅助无线信息传输系统

#### 1.1 IRS辅助单用户WIT

对于IRS辅助WIT技术,业界首先研究了单用户系统, 代表性研究有以下两个。

(1) IRS能辅助提高信息传输的频谱效率。当AP距离 用户较远时,两者之间的信道会有较严重的路径损耗,AP 需要增大发射功率以确保用户通信的服务质量。通过部署 IRS,通信系统能够建立高质量反射链路;通过有效叠加反 射链路与直射链路,能有效改善AP与用户之间的信道质量, 提高通信频谱效率。相关研究主要围绕联合优化 AP 的主动 波束赋形和 IRS 的被动波束赋形展开。文献[5]提出 IRS 辅助 单用户多输入单输出(MISO)系统通过联合优化主动/被动 波束赋形,在满足用户的最小信干噪比条件下最小化 AP 的 发射功率。与没有 IRS 的传统设置相比, IRS 能够显著提高 链路质量和覆盖率。另外, IRS 还能辅助基于正交频分复用 (OFDM)的 WIT。文献[6]对 IRS 辅助单用户 OFDM WIT系统 的研究表明, IRS 能够有效提高 OFDM 传输的频谱效率,且 每一个反射单元对每一个 OFDM 子载波具有相同的反射相 位。此外, IRS 还能有效辅助轨道角动量(OAM)通信。基 于 OAM 的通信系统十分依赖发射和接收均匀圆阵之间的直 射链路,当其被阻塞时,传输很可能面临中断。文献[7]的 研究表明,当OAM 通信系统的发射端和接收端被阻断时, IRS 能够通过建立高质量的虚拟直射链路,并通过发射功率 分配和 IRS 被动波束赋形维持系统的高速通信。

(2) IRS能辅助提高信息传输的安全性。在信息传输的 物理层安全方面,当窃听信道的信道增益优于合法通信的信 道增益时,传统的物理层安全技术(如人工噪声)难以保障 合法通信的信息安全,而通过部署IRS可以有效解决这类 问题。文献[8]提出,通过联合优化AP主动波束赋形和IRS 的被动波束赋形,可以最大化安全速率。另外,IRS可以 辅助实现信息的隐藏传输,防止合法通信信号被窃听者检 测到。文献[9]提出,通过联合优化AP主动波束赋形和IRS 被动波束赋形,可以实现合法通信的隐蔽通信速率最 大化。

#### 1.2 IRS 辅助多用户 WIT

业界进一步研究了IRS辅助多用户WIT系统,有如下3 个代表性研究。

(1) IRS辅助的多址接入。业界对IRS辅助的正交多址 接入(OMA)和非正交多址接入(NOMA)系统均进行了研 究。通过研究IRS辅助OMA系统和NOMA系统的速率最大 化,文献[10]比较了两种系统的性能。结果显示,IRS辅助 NOMA系统允许多个用户共享同一个资源块,可以获得比 OMA系统更高的频谱效率。文献[11]研究了多用户正交频分 多址接入(OFDMA)系统的资源分配问题,通过联合优化 AP的功率分配、IRS的被动波束赋形和时频资源块分配,实 现用户总速率的最大化。文献[11]进一步研究了IRS的部署 位置对系统性能的影响。多用户系统不仅需要关注频谱效 率,还需要确保用户之间的公平性。文献[12]考虑了一个下 行多用户的速率分割多址接入(RSMA)系统,利用基于连 续凸近似方法交替优化主动/被动波束赋形,以最大化多个 热点专题

用户之间的最小传输速率,保证各用户的公平性。

(2) IRS辅助的干扰信道。干扰信道(IFC)模型是一 个经典的通信模型,它模拟了从一个发射机传输到其相应接 收机的信息干扰其他发射机-接收机对的通信情况。对于即 将到来的6G无线网络,密集部署的微基站(BSs)将产生更 复杂的链路间干扰,这将会消耗大量资源。IRS作为新的干 扰管理方法,通过反射入射信号来增强有用信号的同时也抑 制了其他干扰信号。文献[13]研究了IFC下多IRS辅助多对收 发机的资源分配问题,在满足AP最大发射功率和IRS的模 一约束条件下,通过联合优化主动和被动波束赋形,最大化 了系统的速率区域。文献[14]研究了两个用户向AP发送独立 信息的系统容量区域,并提出分布式和集中式的IRS部署方 式。研究表明,在实际信道设置下,集中式部署优于分布式 部署,且当用户速率不对称时,容量增益最为显著。

(3) IRS 辅助的认知无线电通信。虽然认知无线电 (CR)通信系统允许次用户(SU)与主用户(PU)共享频 谱,但当它们位于同一热点中时,由于存在强交叉链路干 扰,可实现的速率变得非常有限。IRS通过动态调整反射信 号的相位来改变无线传播环境,从而减少SU与PU链路之间 的相互干扰,显著提高共存系统的频谱效率,最终实现高速 率的数据传输。文献[15]研究了一个IRS 辅助的CR 通信系 统,通过联合优化次用户发射机的波束赋形和IRS的被动波 束赋形,在满足总发射功率约束和主用户的干扰约束下,最 大化次用户的可实现速率。文献[16]进一步考虑了IRS 不同 部署位置对系统性能的影响,并证明了在没有IRS 的传统 CR 系统中,采用IRS来提高SU速率的有效性及其在处理强 干扰场景方面的优势。

#### 1.3 更符合实际的系统模型

(1)离散的反射相移。由于硬件的限制,IRS对信号反射的相移一般是离散的。因此,有必要进一步研究离散反射相移条件下IRS辅助WIT的性能。文献[17]研究了单/多用户MISO系统下连续相移与离散相移的性能对比,认为具有离散相移的IRS在反射单元数量渐大的情况下,可以实现连续相移相同的平方功率增益。文献[18]分别分析了连续和离散相移的IRS辅助NOMA系统的性能,结果显示当每个反射单元的相移控制在4 bit以上时,离散相移IRS与连续相移IRS几乎具有相同的通信性能。已有结果表明,即使IRS只具有离散的反射相移,仍然能够取得较高的性能增益,且当IRS反射单元的相移控制比特数越高,性能越接近连续相移的情况。

(2) 基于非完美信道状态信息(CSI)的鲁棒优化设计。

由于IRS通常是被动的,不具备信号解码能力,因此对IRS 相关的无线信道进行估计难度较大,且估计误差不可避免。 在IRS辅助WIT系统中,基于非完美CSI的鲁棒优化设计研 究变得尤为重要。文献[19]研究了在单用户MISO系统中, 直射信道和反射信道的CSI为不完美的情况,并联合设计了 具有高鲁棒性的发射机主动波束赋形和IRS的被动波束赋 形,以最小化均方误差。文献[20]研究多个IRS辅助多用户 MIMO系统下的高鲁棒性传输方案。与文献[19]不同,它考 虑系统存在随机CSI误差,提出通过联合优化发送预编码 器、接收均衡器和IRS被动波束赋形,最小化均方误差。

(3)多IRS辅助的系统。如果系统只有一个IRS,在多 障碍物环境下(如办公室、工厂生产线等),发射机与IRS 或IRS与接收机之间的信道可能由于被遮挡而具有较大的路 径损耗,影响通信性能。增加系统中的IRS数量,可增加反 射信道的冗余,降低通信被阻挡的概率。因此,针对多IRS 辅助WIT系统的研究不断涌现。文献[21]研究了一个多IRS 协同辅助通信的系统,通过利用多个选定IRS对信号进行连 续反射,在AP和远程用户之间建立多跳级联的视距链路。 研究提出了最佳 AP主动和IRS被动波束赋形设计,以及最 佳IRS选择和波束路由解决方案,利用图论使级联视距信道 功率最大化。结果表明,在优化路由设计中,在最小化端到 端路径损耗和最大化协作无源波束赋形增益之间存在一个基 本折衷。其中,当IRS反射单元的数量小/大时,前者/后者 具有更大的主导作用。

#### 1.4 基于机器学习的优化方法

在IRS辅助WIT系统的性能优化研究初期,我们主要采 用数学优化方法。由于IRS的反射单元数量大,系统优化设 计的复杂度高,数学优化方法在一些场景中难以应用。随着 机器学习技术的发展,强化学习、深度学习等方法被逐步应 用于IRS辅助WIT的性能优化研究中。

(1) 深度学习方法。在IRS辅助的无线通信系统中,信 道估计需要巨大的训练开销,且系统优化涉及变量数极大。 为了降低开销,优化复杂度,人们开始使用深度学习的方法 来应对这一关键挑战。利用深度学习工具,文献[22]提出如 何直接从采样的CSI中预测最佳IRS被动波束赋形,认为在 不了解IRS阵列几何结构的情况下,可以获得接近最优的数 据速率。文献[23]研究了在太赫兹无人机通信网络中,借助 IRS进行主动切换和波束选择的问题,并提出了一种基于递 归神经网络的新型深度学习解决方案。该方案可以根据事先 对无人机位置/波束轨迹的观察,主动预测基站和IRS服务无 人机的波束。结果表明,所提出的深度学习解决方案在主动 切换和波束选择方面具有较高的精度。在波束训练较少的情况下,深度学习算法的精度可以进一步提高。

(2) 强化学习方法。强化学习是机器学习最重要的研究 方向之一, 它使智能体通过"不断探索"学习到最优动作策 略。深度强化学习则利用深度神经网络的优势来训练学习过 程,提高强化学习算法的学习速度和性能。文献[24]考虑了 一个IRS辅助的认知无线电系统,提出了使用深度确定策略 梯度(DDPG)和SAC(Soft Actor-Critic)两种深度强化学 习的算法来使次用户的信息速率达到最大。这两种算法均取 得了与非凸优化算法相似的性能,但是计算复杂度更低。文 献[25]提出使用DDPG算法求解IRS辅助的单用户MISO系统 中的接收信噪比最大化问题。与基于半定松弛的方法相比, 基于DDPG的算法可以在更短的运行时间内获得可比的接收 信噪比性能。文献[26]考虑了IRS辅助的安全协作网络系统, 提出了一种基于多智能体深度强化学习方法的优化算法来最 大化系统总安全速率。该算法采用分布式框架来解决IRS反 射系数的优化问题,能够利用共享累积梯度来代替共享训练 数据,极大降低了无线设备的计算量。

#### 2 IRS辅助WPT技术

不同于传统的基于电感应或磁共振耦合的近场无线充电 技术,WPT扩展了近场无线充电的距离,使得远场无线充 电成为可能。为了最大限度地提高WPT的端到端传输效率, 目前业界已有相当多关于高效射频硬件组件的研究,如电 路、天线和整流器等,然而这类方法不适用于传播介质时刻 变化的无线信道。因此,业界提出了将先进的无线通信技术 和信号处理技术应用于WPT<sup>[27]</sup>的方法。然而,此类技术在实 践中都可能会产生较高的应用成本,且仍无法解决长距离传 输和无线信道损耗所造成的严重功率损耗问题<sup>[28]</sup>。考虑到上 述问题,目前业界仍需开发新的低成本技术,从而能够以更 节能的方式提高WPT的效率和性能。

当前,已有众多学者对各种场景下 IRS 辅助的无线通信 系统进行了深入研究,验证了在无线网络中部署 IRS 的优越 性。在传统的 WPT 系统中部署 IRS,可以创建精确的无源能 量波束对齐目标,从而补偿长距离传输导致的信号高衰减, 为热点区域的无线设备提供增强的无线充电区。同时,这还 有利于显著扩展 WPT 的覆盖范围。此外,对于非视距通信 链路(NLoS)环境中受到严重阻塞的 WPT 系统,部署 IRS 可以使发射端和接收端通过 IRS 建立新的视距通信链路以绕 过障碍物,从而提高 WPT 系统的性能。因此, IRS 辅助的 WPT 是一种为无线网络供能的有效解决方案<sup>[29-30]</sup>。

图2显示了一个经典的IRS辅助WPT系统,其中包含一

个无线 AP、一个 IRS 以及 K个能量收集用户(EU)。WPT系统的高效工作依赖于 AP 和能量收集用户之间的高质量传输链路。然而,当 AP 与能量收集用户之间的链路存在阻挡物时,发射信号将受到严重损耗,从而导致 WPT 传输低效,能源浪费。而通过灵活部署 IRS,如图 2 所示,可以创建额外的能够有效绕开阻挡物的传播链路,从而避免信号的高损耗,增强能量收集用户的接收信号强度。通过协作调整 IRS 反射单元的相位,改变反射信号的相位,可以实现在接收端的相干叠加,使无源波束形成增益。



▲图2 典型的IRS辅助无线能量传输系统

IRS辅助WPT的典型应用场景是IRS辅助无线供电通信 网络 (WPCN), 该网络主要基于"先收集后发送"协议。 用户首先通过下行链路收集混合无线接入点(HAP)发送的 能量,然后利用该部分能量通过上行链路向HAP发送信息。 由于上行链路的通信性能取决于从下行链路中收集的能量, 因此下行链路和上行链路存在折衷关系。与此同时,WPCN 网络存在"双重远近"的现象<sup>[31]</sup>,即距离HAP较远的用户 下行链路和上行链路均具有较大的路径损耗。IRS能辅助补 偿该现象,实现下行链路和上行链路的平衡。文献[32]考虑 了在具有单天线 HAP 和多个用户的 WPCN 系统中部署 IRS。 为了使系统的总速率达到最大, 文献[32]联合优化了上行链 路和下行链路的时间调度,并优化了IRS的相位设计以增强 上行链路和下行链路。文献[33]考虑了HAP是多天线的情 况。相比于单天线 HAP,多天线 HAP 具备空分复用的能力, 在上行链路传输信息阶段能够有效处理用户间的信息干扰。 文献[34]考虑了上行链路的NOMA与TDMA混合多址接入方

式。通过使用 NOMA 的串行干扰消除(SIC)机制以及 TDMA 的时间分配,该方式实现了复杂度和传输性能的 折衷。

尽管IRS的能耗远低于用户的能耗,但仍不应被忽视。 IRS的功耗取决于其反射单元的类型和特性。例如,对于分 辦率为3 bit 的相位反射单元,每个反射单元的电路功耗值 为1.5 mW, 而分辨率为5 bit 的反射单元的功耗值更是达到 了6 mW<sup>[35]</sup>。IRS的反射单元数量通常很大,因此其电路功耗 不可忽略。随着 IRS 在 WPCN 中的应用,出现了一种新的形 式——自维持IRS,即IRS需要通过下行链路从HAP获取能 量,才能在后续的上行信息传输中正常工作。对自维持IRS 的充能方式主要有3种:一是分阶段充能<sup>[36]</sup>,也称时间开 关,即IRS在某一时段停止工作,利用全部反射单元进行能 量收集,而在其他时段利用收集到的能量进行信号反射工 作;二是分元件充能<sup>[37]</sup>,即IRS上的部分反射单元停止工作 以进行能量收集,其余反射单元正常工作;三是功率分 割<sup>[38]</sup>,即通过调整IRS反射单元的幅值,部分入射信号被反 射到用户, 而剩余信号被用于IRS反射单元的能量收集。此 外,也有基于时间开关和功率分割的混合充能方案<sup>[39]</sup>。已有 研究工作表明,自维持IRS更符合实际,有助于自维持物联 网的实现。

#### 3 IRS辅助SWIPT技术

部署 IRS 能为无线携能通信(SWIPT)提供新的路径, 并增加新的优化自由度。主动和被动波束赋形的联合优化, 不仅能提高信息和能量传输效率,而且有效扩大了系统的服 务覆盖范围。本节主要叙述 IRS 辅助 SWIPT 的研究现状。图 3 显示了一个典型的 IRS 辅助 SWIPT系统。该系统包含 1 个 AP、K个IU和L个EU。AP下行向用户同时发送信息和传输 能量,IRS通过自适应动态调整反射信号的相移,AP到用户 之间创建出高质量虚拟视距链路,进一步提高信息和能量传 输的性能。

#### 3.1 提升 SWIPT 的信息传输速率和能量传输效率

业界对IRS辅助MISO SWIPT系统有如下研究。文献[40] 提出一种基于惩罚算法的低复杂度算法,在满足用户服务质 量约束和IRS模一约束条件下,联合优化主动/被动波束赋 形,以实现AP发射功率的最小化。在保障各用户性能的公 平性上,文献[41]研究最大加权能量的优化问题,同时证明 AP只需要发射信息波束赋形就能够满足同时存在信息接收 用户和能量收集用户的服务质量需求。业界还进一步考虑了 AP和用户同时配备多天线的场景,即研究IRS辅助MIMO



▲图3 典型的IRS辅助无线携能通信系统

SWIPT。文献[42]研究了能源效率最大化问题。为了进一步 提高能效,提出了一种新的基于定价的性能度量,称为网络 效用。通过联合优化发送预编码矩阵和相移矩阵,使网络效 用函数实现最大化,同时限制了AP处的发射功率、每个能 量收集用户处所需的最小收获能量。为确保多用户间的公平 性,文献[43]考虑了信息接收用户的加权和速率最大化问 题,提出一种基于块坐标下降的算法,用于交替优化AP处 的发送预编码矩阵和IRS的相移矩阵。已有研究表明,IRS 能提高SWIPT的信息传输速率和能量传输效率。

#### 3.2 基于非完美CSI的鲁棒优化设计

基于不完美CSI设计鲁棒SWIPT传输方案是重要的研究 方向。文献[44]将IRS到能量收集用户和信息接收用户的信 道建模为非完美信道,即存在信道误差。通过联合优化主 动/被动波束赋形,可以最大化信息接收用户的最小速率。 研究进一步对比了理想信道和非理想信道的性能表现,且在 求解理想信道的优化问题时推导出了封闭表达式。

#### 3.3 数据解码和能量收集的同步

在物联网应用中,接收机通常需要同时解码数据、收集 能量<sup>[45-46]</sup>。文献[45]研究了带有功率分裂方式的接收机的 IRS SWIPT系统性能,并与解码转发中继系统进行了比较。 文献[46]研究了一个IRS辅助下行SWIPT的MISO系统。在该 系统中,AP同时向用户发送信息并传输能量,用户采用功 率分裂的方式来解码数据并获取能量。通过联合优化AP的 波束赋形、功率分裂因子和IRS处的反射相移,可以使 AP 的发射功率最小化。

#### 3.4 非线性能量收集模型

初始的研究一般假设收集到的能量与接收功率呈线性关系。实际上,两者是非线性关系,只在有限范围内才具有线性关系。因此,非线性的能量收集模型更具有实际和普遍意义。文献[47]研究了多用户MISO系统的资源分配问题。系统所考虑的大型IRS被划分为多个块,每个块的相移元素被联合设计,以实现不同的传输模式。在满足非线性能量收集用户和信息接收用户的服务质量条件下,联合优化AP处的波束赋形和IRS的传输模式,以实现AP发射功率的最小化。 文献[48]研究了IRS辅助太赫兹SWIPT系统的波束赋形问题,并考虑级联信道的CSI不完备。文献[48]还提出了一种鲁棒的波束赋形设计,通过采用半正定规划和伯恩斯坦型不等式,在满足中断概率约束下,联合优化AP的发射波束赋形和IRS的相移,实现AP的发射功率最小化。

#### 4 IRS 辅助 SWIPT 的新研究主题

随着通信技术的不断发展以及多种应用场景的不断涌现,出现了多个备受关注的IRS辅助SWIPT的研究主题和方向。

#### 4.1 IRS辅助SWIPT技术的物理层安全通信

在没有部署 IRS 的传统 SWIPT 系统中,如何实现信息安 全传输是一个关键挑战。具体而言,通常能量收集用户会部 署在靠近发射端的位置,而信息接收用户部署在距离发射端 较远的位置,因此能量收集用户比信息接收用户具有更好的 信道,从而可以很容易地窃听发射端发送给信息接收用户的 信息,成为潜在窃听者<sup>[49]</sup>,如图 3 所示。然而,对于当前常 用的物理层安全技术如人工噪声与发射波束赋形等,如果能 量收集用户的信道和信息接收用户的信道具有较大的相干系 数,或能量收集用户与信息接收用户的距离较近且信息接收 用户不能消除人工噪声 (AN)信号引起的干扰,则难以保 证信息接收用户的信息安全。上述问题可以通过在信息接收 用户或能量收集用户附近部署 IRS 并适当优化 IRS 的反射波 束赋形来有效解决<sup>[50]</sup>。

在SWIPT安全通信系统中引入IRS,可以提升安全通信性能,并更好地利用IRS中增强有用信号和抑制有害信号的优点。文献[51]考虑了IRS辅助的MISOSWIPT安全通信系统,通过优化发射机的波束赋形与人工噪声、IRS的反射波束赋形,信息接收用户和能量收集用户的可到数据速率之差

大于给定阈值,系统的能量效率可实现最大化。文献[52]和 [53]进一步对不完美CSI,甚至在无法得知CSI情况下的IRS 辅助SWIPT的安全通信系统进行了研究。

#### 4.2 无人机与 IRS 共同辅助的 SWIPT

得益于高机动性、灵活性和按需部署等优点,无人机目 前已在无线通信领域发挥了重大作用<sup>[54]</sup>。在SWIPT系统中, 无人机可以部署为AP,这样能够充分利用其高机动性和部 署灵活性,从而缩短发射端和接收端之间的距离,有效避免 信号因长距离传输造成的严重损害[5]。然而,当无人机需要 为广泛分布的大量用户提供服务时,为了提高SWIPT效率, 无人机需要充分靠近每一个接收端。但是频繁的移动不仅会 导致无人机消耗过多的能源,也会出现复杂的路径规划问 题。为了应对这个问题,在无人机通信系统中部署IRS是一 种有效的解决方案。IRS具有增强SWIPT效率的能力,因此 通过在密集的用户群附近部署IRS, 无人机无须飞近用户就 可以实现同等的传输效果,如图4(a)所示。此外,传统 的IRS大多部署在固定的位置,只有固定的半空间反射覆盖 范围,因此可能无法与所有用户建立有效的LoS链路。将 IRS 安装在无人机等空中平台上,可以利用无人机的机动 性,灵活变更或扩大IRS的覆盖范围,如图4(b)所示。

#### 4.3 多 IRS 协同辅助 SWIPT

在许多应用场景下,能量收集用户和信息接收用户的位 置比较分散。随着用户数目的增加,IRS反射信道被遮挡的 概率也会增大。对于部署单个IRS的系统,当其与IRS相关 的信道被遮挡时会产生较大的路径损耗,从而导致系统性能 大幅下降,IRS的作用大大减弱。因此,有必要研究部署多 个IRS的同辅助的SWIPT。文献[56]考虑了在发射机和用户 之间部署多个IRS的情况,发射机发送的信号以多跳IRS反 射的方式到达接收机,以实现接收机收到的信号功率最大 化。已有的研究表明,多IRS协同的通信增加了新的优化自 由度,因此能进一步激发系统的性能。然而,随着IRS数目 的增加,优化变量变得高度耦合,优化难度也大幅提升。针 对多IRS协同辅助SWIPT的场景,一方面可考虑增加调度的 策略,在所有IRS中选取一部分进行协同辅助通信;另一方 面,可考虑研究复杂度较低的算法,降低优化难度。

#### 4.4 新型多址接入方式下的IRS 辅助 SWIPT

IRS应用的一个重要挑战是CSI的获取。速率分拆多址 接入(RSMA)是一种新型的多址接入方式。无论是完美或 是不完美的CSI,通过RSMA都能对数据流进行预编码。因


▲图4 无人机与IRS共同辅助的无线携能通信系统



▲图5 多IRS协同辅助无线携能通信系统示意图

此RSMA是一种对不完美CSI具有鲁棒性的多址接入方式<sup>[57]</sup>。 通过在IRS系统中应用RSMA,能有效弥补IRS系统中获取 完美CSI方面的不足。虽然相关研究已经证明了RSMA在多 用户SWIPT方面的优势<sup>[58]</sup>,但均未考虑IRS的部署。在基于 RSMA的SWIPT系统中应用IRS,RSMA特有的公共波束设 计将会对SWIPT系统的性能产生怎样的影响?系统设计复 杂度如何?这些问题都仍有待进一步讨论。此外,RSMA特 有的公共波束能够充当干扰信号或噪声信号以增强SWIPT 系统的安全通信性能。然而,IRS的部署是否会增强或削弱 该公共波束在安全通信方面的作用,也值得进一步研究。

#### 4.5 有源 IRS 辅助的 SWIPT 系统

目前大多数IRS的研究考虑的均为无源IRS,即对应的 反射单元只具有相位调整功能。在全双工模式下,无源IRS 对信号进行相位处理时不会引入额外的噪声以及自干扰。然 而,由于经过IRS反射的信号会产生距离累乘的高损耗,因 此在长距离传输时,无源IRS将会使系统性能受限。为解决 此问题,业界开始研究有源IRS。有源IRS由多个有源反射 单元组成,它们能够使IRS放大反射信号的功率。值得注意 的是,有源IRS与传统的中继不同,它使用低功耗的反射型 放大器,并以全双工的方式直接反射信号<sup>[59-60]</sup>。文献[60]在 多种场景下对有源IRS和无源IRS的性能表现进行了对比, 揭示了两种IRS在部署位置和反射单元个数等方面的区别。 目前,关于有源IRS辅助的WPT与SWIPT的优化设计的研 究还不多,特别是当有源IRS需要通过WPT的方式获取能量 供应时,该如何对系统进行优化设计,仍有待研究。

#### 4.6 基于机器学习方法的IRS 辅助 SWIPT 优化设计

已有的IRS辅助SWIPT优化设计研究大多基于数学优化 方法,但它们依赖于特定的信道和系统模型,需要根据不同 应用场景进行特定设计,且可能面临较高的算法复杂度。机 器学习的方法更多依赖于数据而非数学模型,因此在求解更 复杂的优化设计问题方面比数学优化方法更具优势。目前, 应用机器学习的方法求解IRS辅助SWIPT的优化设计问题的 研究尚处于起步阶段,在多IRS部署、鲁棒优化设计等方面 仍有待充分研究。

#### 5 结束语

本文对IRS辅助的WIT和WPT的研究现状进行了综述。 在IRS辅助WIT方面,针对不同系统配置介绍了IRS的设计 与优化,并讨论了更接近实际情况的系统。在IRS辅助WPT 方面,着重讨论了两个主要分支——WPCN和SWIPT。 WPCN不仅能够利用IRS的高反射增益和全双工的特点来提 升性能表现,还能够利用WPT技术实现IRS的自维持工作, 为实现自维持物联网提供了性能优异的方案。IRS辅助的 SWIPT能够同时兼顾信息传输速率的提升和能量传输效率的 提升,为IRS的应用提供了更广阔的应用场景。

#### 参考文献

- [1] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be? [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2014, 32(6): 1065–1082. DOI: 10.1109/JSAC.2014.2328098
- [2] LIASKOS C, NIE S, TSIOLIARIDOU A, et al. Realizing wireless communication through software-defined hyperSurface environments [C]// Proceedings of 2018 IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM). IEEE, 2018: 14– 15. DOI: 10.1109/WoWMoM.2018.8449754
- [3] ZHANG R, HO C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2013, 12(5): 1989–2001. DOI: 10.1109/TWC.2013.031813. 120224
- [4] LIASKOS C, NIE S, TSIOLIARIDOU A, et al. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces [J]. IEEE communications magazine, 2018, 56(9): 162–169. DOI: 10.1109/ MCOM.2018.1700659
- [5] WU Q Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(11): 5394–5409. DOI: 10.1109/ TWC.2019.2936025
- [6] YANG Y F, ZHANG S W, ZHANG R. IRS-enhanced OFDM: power allocation and passive array optimization [C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2019: 1–6. DOI: 10.1109/ GLOBECOM38437.2019.9014204
- [7] LI Y Q, JIANG M, ZHANG G C, et al. Achievable rate maximization for intelligent reflecting surface-assisted orbital angular momentum-based communication systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(7): 7277-7282. DOI: 10.1109/TVT.2021.3089021
- [8] CUI M, ZHANG G C, ZHANG R. Secure wireless communication via intelligent reflecting surface [J]. IEEE wireless communications letters, 2019, 8(5): 1410–1414. DOI: 10.1109/LWC.2019.2919685
- [9] ZOU L, ZHANG D C, CUI M, et al. IRS–assisted covert communication with eavesdropper's channel and noise information uncertainties [J]. Physical communication, 2022, 53: 101662. DOI: 10.1016/j.phycom.2022.101662
- [10] GUO Y Y, QIN Z J, LIU Y W, et al. Intelligent reflecting surface aided multiple access over fading channels [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(3): 2015–2027. DOI: 10.1109/TCOMM.2020. 3042277
- [11] YANG Y F, ZHANG S W, ZHANG R. IRS-enhanced OFDMA: joint resource allocation and passive beamforming optimization [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(6): 760–764. DOI: 10.1109/LWC.2020. 2968303
- [12] FU H, FENG S L, KWAN NG D W. Resource allocation design for IRSaided downlink MU-MISO RSMA systems [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2021: 1– 6. DOI: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473650
- [13] JIANG M, LI Y Q, ZHANG G C, et al. Achievable rate region maximization in intelligent reflecting surfaces-assisted interference channel [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(12): 13406–13412. DOI: 10.1109/TVT.2021.3120308
- [14] ZHANG S W, ZHANG R. Intelligent reflecting surface aided multiple access: capacity region and deployment strategy [C]//Proceedings of 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. IEEE, 2020: 1–5. DOI: 10.1109/ SPAWC48557.2020.9153884
- [15] YUAN J, LIANG Y C, JOUNG J, et al. Intelligent reflecting surfaceassisted cognitive radio system [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(1): 675–687. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.3033006
- [16] GUAN X R, WU Q Q, ZHANG R. Joint power control and passive beamforming in IRS-assisted spectrum sharing [J]. IEEE communications letters, 2020, 24(7): 1553–1557. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.2979709
- [17] WU Q Q, ZHANG R. Beamforming optimization for wireless network aided by intelligent reflecting surface with discrete phase shifts [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(3): 1838–1851. DOI: 10.1109/ TCOMM.2019.2958916
- [18] SUN Z Y, JING Y D. On the performance of multi-antenna IRS-assisted NOMA networks with continuous and discrete IRS phase shifting [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(5): 3012–3023. DOI: 10.1109/TWC.2021.3117494
- [19] ZHANG J Z, ZHANG Y, ZHONG C J, et al. Robust design for intelligent

reflecting surfaces assisted MISO systems [J]. IEEE communications letters, 2020, 24(10): 2353–2357. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.3002557

- [20] XU K Z, GONG S Q, CUI M, et al. Statistically robust transceiver design for multi–RIS assisted multi–user MIMO systems [J]. IEEE communications letters, 2022, 26(6): 1428–1432. DOI: 10.1109/LCOMM.2022.3157127
- [21] MEI W D, ZHANG R. Cooperative beam routing for multi–IRS aided communication [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(2): 426–430. DOI: 10.1109/LWC.2020.3034370
- [22] TAHA A, ALRABEIAH M, ALKHATEEB A. Deep learning for large intelligent surfaces in millimeter wave and massive MIMO systems [C]// Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2019: 1–6. DOI: 10.1109/GLOBECOM38437.2019.9013256
- [23] ABUZAINAB N, ALRABEIAH M, ALKHATEEB A, et al. Deep learning for THz drones with flying intelligent surfaces: beam and handoff prediction [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/ ICCWorkshops50388.2021.9473804
- [24] ZHONG C W, CUI M, ZHANG G C, et al. Deep reinforcement learning– based optimization for IRS-assisted cognitive radio systems [EB/OL]. (2022-05-02)[2022-5-30]. https://ieeexplore.ieee.org/document/9766179
- [25] FENG K M, WANG Q S, LI X, et al. Deep reinforcement learning based intelligent reflecting surface optimization for MISO communication systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(5): 745–749. DOI: 10.1109/LWC.2020.2969167
- [26] HUANG C, CHEN G J, WONG K K. Multi-agent reinforcement learningbased buffer-aided relay selection in IRS-assisted secure cooperative networks [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2021, 16: 4101–4112. DOI: 10.1109/TIFS.2021.3103062
- [27] ZENG Y, CLERCKX B, ZHANG R. Communications and signals design for wireless power transmission [J]. IEEE transactions on communications, 2017, 65(5): 2264–2290. DOI: 10.1109/TCOMM.2017.2676103
- [28] WU Q Q, LI G Y, CHEN W, et al. An overview of sustainable green 5G networks [J]. IEEE wireless communications, 2017, 24(4): 72–80. DOI: 10.1109/MWC.2017.1600343
- [29] DING F, PORS A, BOZHEVOLNYI S I. Gradient metasurfaces: a review of fundamentals and applications [J]. Reports on progress in physics, 2018, 81(2): 026401. DOI: 10.1088/1361–6633/aa8732
- [30] BONOD N. Large-scale dielectric metasurfaces [J]. Nature materials, 2015, 14(7): 664–665. DOI: 10.1038/nmat4338
- [31] JU H, ZHANG R. Throughput maximization in wireless powered communication networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2014, 13(1): 418–428. DOI: 10.1109/TWC.2013.112513. 130760
- [32] LYU B, HOANG D T, GONG S M, et al. Intelligent reflecting surface assisted wireless powered communication networks [C]//Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops. IEEE, 2020: 1–6. DOI: 10.1109/WCNCW48565.2020.9124775
- [33] ZHENG Y, BI S Z, ZHANG Y J A, et al. Joint beamforming and power control for throughput maximization in IRS-assisted MISO WPCNs [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(10): 8399–8410. DOI: 10.1109/ JIOT.2020.3045703
- [34] ZHANG D C, WU Q Q, CUI M, et al. Throughput maximization for IRSassisted wireless powered hybrid NOMA and TDMA [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(9): 1944–1948. DOI: 10.1109/ LWC.2021.3087495
- [35] HUANG C W, ZAPPONE A, ALEXANDROPOULOS G C, et al. Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(8): 4157–4170. DOI: 10.1109/TWC.2019.2922609
- [36] ZOU Y Z, GONG S M, XU J, et al. Wireless powered intelligent reflecting surfaces for enhancing wireless communications [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(10): 12369–12373. DOI: 10.1109/ TVT.2020.3011942
- [37] HU S K, WEI Z Q, CAI Y X, et al. Robust and secure sum-rate maximization for multiuser MISO downlink systems with self-sustainable IRS [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(10): 7032–7049. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3097140
- [38] ZOU Y Z, LONG Y S, GONG S M, et al. Robust beamforming optimization for self-sustainable intelligent reflecting surface assisted wireless networks [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2022, 8(2): 856–870. DOI: 10.1109/TCCN.2021.3133839
- [39] LYU B, RAMEZANI P, HOANG D T, et al. Optimized energy and

information relaying in self-sustainable IRS-empowered WPCN [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(1): 619–633. DOI: 10.1109/ TCOMM.2020.3028875

- [40] WU Q Q, ZHANG R. Joint active and passive beamforming optimization for intelligent reflecting surface assisted SWIPT under QoS constraints [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(8): 1735– 1748. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3000807
- [41] WU Q Q, ZHANG R. Weighted sum power maximization for intelligent reflecting surface aided SWIPT [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(5): 586–590. DOI: 10.1109/LWC.2019.2961656
- [42] SHARMA V, YASWANTH J, SINGH S K, et al. A pricing-based approach for energy-efficiency maximization in RIS-aided multi-user MIMO SWIPT-enabled wireless networks [J]. IEEE access, 10: 29132–29148. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3158486
- [43] PAN C H, REN H, WANG K Z, et al. Intelligent reflecting surface aided MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38 (8): 1719–1734. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3000802
- [44] YANG Z Y, ZHANG Y. Optimal SWIPT in RIS-aided MIMO networks [J]. IEEE access, 2021, 9: 112552-112560. DOI: 10.1109/ACCESS.2021. 3099698
- [45] MASOUMI H, EMADI M J. Performance analysis of cooperative SWIPT system: Intelligent reflecting surface versus decode-and-forward [J]. AUT journal of modeling and simulation, 2019, 51(2): 241–248
- [46] ZARGARI S, FARAHMAND S, ABOLHASSANI B. Joint design of transmit beamforming, IRS platform, and power splitting SWIPT receivers for downlink cellular multiuser MISO [J]. Physical communication, 2021, 48: 101413. DOI: 10.1016/j.phycom.2021.101413
- [47] XU D F, YU X H, JAMALI V, et al. Resource allocation for large IRSassisted SWIPT systems with non-linear energy harvesting model [C]// Proceedings of 2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. IEEE, 2021: 1–7. DOI: 10.1109/WCNC49053.2021.9417357
- [48] ZHU Z Y, XU J L, SUN G C, et al. Robust beamforming design for IRSaided secure SWIPT terahertz systems with non-linear EH model [J]. IEEE wireless communications letters, 2022, 11(4): 746–750. DOI: 10.1109/ LWC.2022.3142098
- [49] LIU L, ZHANG R, CHUA K C. Secrecy wireless information and power transfer with MISO beamforming [J]. IEEE transactions on signal processing, 2014, 62(7): 1850–1863. DOI: 10.1109/TSP.2014.2303422
- [50] NIU H H, LEI N. Intelligent reflect surface aided secure transmission in MIMO channel with SWIPT [J]. IEEE access, 8: 192132–192140. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3032759
- [51] LIU J X, XIONG K, LU Y, et al. Energy efficiency in secure IRS-aided SWIPT [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(11): 1884– 1888. DOI: 10.1109/LWC.2020.3006837
- [52] XIU Y, WU J, GUI G, et al. Artificial noise-aided secure SWIPT communication systems using intelligent reflecting surface [C]// Proceedings of 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). IEEE, 2020: 6–11. DOI: 10.1109/ ICCC49849.2020.9238914
- [53] NTOUGIAS K, KRIKIDIS I. Robust design of secure IRS-aided MISO broadcasting for SWIPT and spectrum sharing [C]//Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2021: 1–7. DOI: 10.1109/ GLOBECOM46510.2021.9685809
- [54] WU Q Q, LIU L, ZHANG R. Fundamental trade-offs in communication and trajectory design for UAV-enabled wireless network [J]. IEEE wireless communications, 2019, 26(1): 36–44. DOI: 10.1109/MWC.2018.1800221
- [55] XIE L F, CAO X W, XU J, et al. UAV-enabled wireless power transfer: a tutorial overview [J]. IEEE transactions on green communications and networking, 2021, 5(4): 2042–2064. DOI: 10.1109/TGCN.2021.3093718
- [56] MEI W D, ZHANG R. Cooperative beam routing for multi–IRS aided communication [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(2): 426–430. DOI: 10.1109/LWC.2020.3034370
- [57] JOUDEH H, CLERCKX B. Robust transmission in downlink multiuser MISO systems: a rate-splitting approach [J]. IEEE transactions on signal processing, 2016, 64(23): 6227–6242. DOI: 10.1109/TSP.2016.2591501

- [58] CAMANA ACOSTA M R, MORETA C E G, KOO I. Joint power allocation and power splitting for MISO-RSMA cognitive radio systems with SWIPT and information decoder users [J]. IEEE systems journal, 2021, 15(4): 5289–5300. DOI: 10.1109/JSYST.2020.3032725
- [59] LONG R Z, LIANG Y C, PEI Y Y, et al. Active reconfigurable intelligent surface-aided wireless communications [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(8): 4962–4975. DOI: 10.1109/TWC.2021. 3064024
- [60] YOU C S, ZHANG R. Wireless communication aided by intelligent reflecting surface: active or passive? [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(12): 2659–2663. DOI: 10.1109/LWC.2021.3111044





Multi–Antenna Communication System by Transmissive Reconfigurable Meta–Surface

李博江/LI Bojiang,李振东/LI Zhendong,陈文/CHEN Wen

(上海交通大学,中国上海 200240) (Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China) DOI:10.12142/ZTETJ.202203006 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220617.1739.002.html 网络出版日期: 2022-06-20 收稿日期: 2022-05-20

摘要:为了解决5G通信中的高能耗、高成本问题,提出了基于透射可重构超表面(RMS)的多天线通信系统,并阐述了该通信系统中的信息 收发方式、信道模型和信道估计,最后探讨了RMS在未来通信中的应用。认为透射RMS多天线系统在未来通信系统中具有广阔的应用前景。

关键词:5G;透射超表面;信道模型;收发设计;分集-复用增益

Abstract: In order to solve the problems of high energy consumption and high cost in 5G communication system, a multi-antenna communication system based on transmissive reconfigurable meta-surface (RMS) is proposed, and the transceiver design, the channel model and the channel estimation in the communication system are described. Finally, the application of transmissive RMS in future communication is discussed. It is considered that the multi-antenna communication system based on transmissive RMS has a good application prospect in future communication systems.

Keywords: 5G; transmissive meta-surface; channel model; transceiver design; diversity-multiplexing gain

#### 1 可重构超表面的研究背景

2019年,三大运营商陆续公布5G商用套餐,标志着中国 正式进入5G商用时代。5G带给人们更好的通信使用体验 和更广泛的应用范围。然而,技术的升级换代也会导致资源 需求激增。5G所使用的频段更高,基站的覆盖范围更小, 在满足更高技术要求的同时会带来能耗和成本的增加。根据 中国铁塔的统计,目前5G单基站满载功率近3700 W,是 4G单基站的2.5~3.5倍,其中增加的功耗主要源于基带信号 的调制和发射。因此,寻求一种低功耗和低成本的新型收发 装置成为B5G乃至6G技术发展的一个亟待解决的问题<sup>[1]</sup>。

#### 1.1 可重构超表面简介

5G基站配备了大量由射频天线组成的大规模多输入多 输出(MIMO)阵列和信号处理模块。在无线网络中,为了 扩大网络覆盖率,实现高可靠传输,基站还需要额外配备一 些中继器或射频拉远头(RRH)。这些器件通常都是有源 的,这无疑增加了整个系统的能耗和复杂度<sup>[2]</sup>。可重构超表 面(RMS),也被称为智能超表面(RIS),被认为是一种降 低系统功耗和成本的解决方案。RMS主要由大量无源的超 材料元件构成。超材料是将材料内部的原子进行人工重新排 列组合得到的物质,不同的排列组合方式也就决定了材料会 具有不同的物理化学性质。这些超材料可以由二极管、三极 管、微机电系统(MEMS)、石墨烯、温敏器件、光敏器件 等构成,在不同电压下可以实现"通"或"断"的状态,因 而具有动态编码能力。这使得超表面可以通过内置的控制芯 片来改变入射电磁波的幅度和相位,从而实现信号的波束赋 形和无线信道的重构。与中继不同的是,RMS一般不包含 射频链路,因而无法对信号进行解码转发或放大转发。但正 是也得益于此,RMS的实现复杂度以及自干扰和噪声问题 才得以有效解决<sup>[3]</sup>。根据对信号操作方式的不同,RMS可以 被分为反射型RMS和透射型RMS两种。具体来说,反射型 RMS通信的馈源与接收机在RMS的同一侧,而透射型RMS 通信的馈源与接收机在RMS的不同侧<sup>[4]</sup>。它们都能提升整个 系统的频谱效率、能量利用效率和网络覆盖范围。

#### 1.2 反射型 RMS

目前关于反射 RMS的研究已取得较大进展。由于具有 类似光学的反射特性和可重构性,反射型 RMS 可以用于加 强非视距路径信道增益。反射型 RMS 主要部署在基站或用 户端周围,根据信道特性的变化动态调整反射因子,可以实 现频谱效率的提高和系统能耗的优化。当视距路径被遮挡

**基金项目:**国家重点研发计划(22020YFB1807700、018YFB1801102);上海市科委基础项目(20JC1416502);国家自然科学基金(62071296)

时,由多个RMS构成的散射路径可提高信号的分集增益。 目前,已经有很多工作研究了基于反射型 RMS 的系统资源 与反射因子优化问题。中兴通讯股份有限公司等成立了主要 以反射型RMS为研究课题的项目组。反射型RMS的推广与 应用已经初见成效。

#### 1.3 透射型 RMS

对于透射型RMS的研究目前还处于起步阶段。通过调 节超材料元件的反射特性,就可以将信号透射穿过超表面。 相较于反射型超表面,透射型超表面具有以下几个优点:

(1) 无自干扰。在信号收发端距离较近的情况下,当利 用反射型 RMS 时, 馈源与用户位于 RMS 的同一侧, 用户在 收发信息时容易产生自干扰;而当利用透射型RMS时,馈 源与用户位于RMS的不同侧, 使自干扰问题不易产生, 更 适用于用户密集的场景。

(2) 无馈源遮挡。对于反射型 RMS, 用户接收到的电 磁波容易被同侧的馈源吸收,而透射型RMS分隔了馈源与 用户,因而不存在这一问题。

(3) 更高的孔径效率。研究表明,高频条件下RMS的 透射因子一般要高于反射因子,这使得透射型RMS可以具 有更高的孔径效率<sup>[5]</sup>。

(4) 更大的工作带宽。研究表明,透射型超表面的相位 差较稳定,因而具有更大的工作带宽<sup>[5]</sup>。

#### 2 基于透射型 RMS 的多天线系统

图1是一种基于透射型RMS的多天线系统架构,收发机 由透射型RMS和射频天线构成,并通过内置芯片进行控制。 RMS支持全双工工作模式,可以利用不同的通信资源进行 上行和下行通信。RMS的第m个单元的透射因子表示为:

 $f_m = \beta_m e^{j\theta_m},$ (1)



其中 $\beta_m \in [0,1], \theta_m \in [0,2\pi)$ 分别表示 RMS 第m个单元的振 幅和相移。收发机的基本功能包括两个方面:可通过控制器 芯片实现编程控制,在控制器内实现信息调制和波束赋形。

#### 2.1 透射 RMS 下行空间分集

基于透射型RMS的多天线系统在下行链路采用空分多 址接入(SDMA)方式,即在馈源布置一根天线,使得电磁 波通过透射大规模 RMS 实现空间分集。在通信过程中,信 源将信息发送到RMS控制器内进行调制和波束赋形,并通 过RMS的大规模点阵向外发射电磁波。RMS控制器根据信 道状态信息和波束赋形参数动态调节超表面上每个单元的透 射系数,最大限度地提高频谱效率和能量利用效率。

#### 2.2 透射 RMS 上行频率分集

由于馈源为单天线,基于透射型 RMS 的多天线系统在 上行链路采用正交频分多址接入(OFDMA)方式,实现多 用户频率分集。上行信号同样经过RMS被转发送入控制芯 片,以进行解码和解调。联合优化多用户功率分配、子载波 分配和RMS传输系数有助于使系统状态达到最优,使速率 达到最大。由于优化变量的高度耦合,该问题是一个非凸优 化问题,因此可应用基于拉格朗日对偶分解法的交替优化算 法、差分凸规划、逐次凸逼近法和罚函数法来解决。

#### 2.3 RMS 高阶调制

在调制方法上,透射型RMS多天线系统可沿用传统的恒 包络和非恒包络调制。恒包络调制包括二进制相移键控 (BPSK)、正交相移键控(QPSK)等。超材料元件具有二进 制特性,可以实现1 bit或2 bit 的编程控制。虽然更高阶的相 移键控在理论上也可以实现,但是因为一个元件仅能够实现 1 bit 控制,更高阶的相移键控势必会需要更多的超材料元件, 而空间条件的限制会使这种超表面在物理上很难实现。恒包 络调制的控制自由度只有一个。一些非恒包络调制,例如高 阶的正交幅度调制(16QAM、256QAM等),需要同时控制幅 度和相位两个参数,然而现有的技术条件还无法实现。大部 分高阶调制通过非恒包络调制来提高系统传输速率,这使得 透射型超表面多天线系统的传输速率受到一定的限制。

为了解决这个问题,可以使用非线性调制技术(即时序 调制)来实现高阶相位和振幅联合调制。值得注意的是,在 采用时间调制后,控制信号的波形具有两个控制自由度,即 相位开始时间和传导持续时间。通过展开控制符号的傅里叶 级数,我们可以得到其在1阶谐波(基波)上的振幅和相移。

通过设置两个自由度,系统可以独立调整基波的振幅和相移,还可以实现相应的调制方案与基波的幅度和相位之间的映射关系,即可以实现相位和幅度的联合调制。因此,采用时间调制方案可以实现16QAM或更高阶QAM,极大地提高系统的传输速率<sup>66</sup>。

#### 2.4 信道模型

透射型RMS多天线系统的信道模型可以分为近场模型 和远场模型。模型根据瑞利距离2D<sup>2</sup>Λ来划分,其中D和λ 分别表示天线阵列孔径和电磁波波长。当收发机距离大于瑞 利距离时,信道被视为远场模型,波阵面被近似视为平面 波;当收发机距离小于瑞利距离时,信道被视为近场模型, 波阵面被视为球面波。RMS到用户处的距离一般大于瑞利 距离,因此信道模型被视为远场信道,且RMS-用户信道有 视距路径和非视距路径,服从莱斯分布。视距路径信道可以 被建构为均匀平面阵列;非视距路径信道路径分量独立同分 布服从于零均值,单位方差的圆对称复高斯分布。馈源到 RMS的距离要小于瑞利距离,因此信道模型被视为近场信 道。馈源到RMS之间没有遮挡,因此可以直接被建构为视 距路径的均匀平面阵列模型<sup>Π</sup>。

#### 2.5 信道估计

当完成信道建模后,在信号发射接收前还需要知道下行/ 上行信道状态信息,以便实时调整发射功率、RMS透射因子 和波束赋形矢量等参数。透射型RMS多天线系统的信道估计 可以分为馈源-RMS和RMS-用户两个部分。前者被视为近场 信道,相应的信道状态信息可以很方便地被计算或测量出; 后者为远场信道,由于此时每个用户同时有视距和非视距路 径,相应的信道状态信息需要通过一些信道估计方法才能得 出。通常情况下,由于系统的上下行链路在相同频率资源的 不同时隙上传输,在相对较短的时间内(信道传播的相干时 间),我们可以认为上行链路和下行链路的传输信号所经历 的信道衰落是相同的,即所谓的信道互易性。因此,可以通 过估计上行链路来获得下行信道的状态信息。目前的信道估 计方法主要分为直联型信道估计<sup>[8]</sup>和可分离的信道估计<sup>[9]</sup>。

直联型信道估计就是将两部分信道合并估计,常见的直 联型信道估计方法主要有:基于信道稀疏性的消息传递算 法、基于信道相关性的估计算法、基于分解和插值恢复的信 道估计算法、利用联邦学习和深度学习的神经网络估计算 法。基于神经网络的信道估计算法正符合近年来发展迅速的 人工智能技术与5G通信结合的趋势。该方法将人工智能技 术的高效、多连接和去中心化等特点与通信系统的高速率、 高可靠性和海量连接等关键指标完美融合。

可分离的信道估计分别对馈源-RMS和RMS-用户信道 进行估计。具体做法是:在RMS上布置部分有源元件,收 发机和用户分别向超表面发送用于信道估计的导频序列,随 后通过RMS的有源元件获取两段级联信道的信道状态信息。 这样做的好处是降低了导频开销,但同时超表面还须将信道 状态信息回传到收发机和用户处以实现波束赋形,反而降低 了传输效率。透射型超表面多天线系统主要运用直联型信道 估计方法,在近场信道状态信息测量得到后,通过数据处理 方法得到远场信道状态信息。

#### 3透射RMS多天线系统应用

基于透射 RMS 的多天线系统具有低功耗、低成本的优势,在未来具有很好的应用前景。

(1) RMS 与非正交多址接入结合的通信系统。非正交 多址接入是多址接入的一项新技术,它颠覆了正交多址接入 中一个无线资源(频率、时间、编码)只能分给一个用户使 用的概念,采用功率复用的方式将一个资源分配给多个用 户,有效提高了系统的频谱效率、吞吐量和接入数量。非正 交多址接入在发射端使用功率复用技术,并在接收端采用串 行干扰删除以消除多径干扰,很好地提升了透射型超表面多 天线系统的性能。然而,复杂的接收算法和接收机设计将成 为当前的巨大挑战<sup>[10]</sup>。

(2) RMS与速率分割多址接入结合的通信系统。速率分 割多址接入结合了空分多址接入和非正交多址接入,其原理 是将用户的信息分为共同部分和私有部分,并将所有用户共 同部分的信息合并,然后将其与用户的私有部分一起送入信 道,在接收端根据串行干扰删除进行规则解码。这种技术弥 补了空分多址接入只能在强干扰条件以及非正交多址接入只 能在弱干扰条件下工作的缺点,提高了系统的抗干扰能力和 总通信速率。这种技术在最近被广泛地研究,它与透射RMS 大规模多天线系统的结合会是一个有潜力的发展方向<sup>[11]</sup>。

(3) RMS与人工智能结合的通信系统。RMS的可重构 性和低功耗等特点可以结合人工智能技术给通信系统带来一 次全新的变革。根据卷积神经网络和循环神经网络的概念, 将 RMS上的超材料原子视为神经网络中的神经元,可以构 建一个低功耗神经网络通信系统,这将极大提高通信系统的 成像、感知和识别能力。一些机器学习的架构,如深度学 习、联邦学习等,用在信号监测、信道估计、波束赋形矢量 设计等通信模块上,在减小算法复杂度的同时还可以提高系 统传输性能。目前,基于人工智能的通信系统模型正在快速 发展,将在未来5G和6G的发展中占据重要地位<sup>[12]</sup>。 (4) RMS 与移动边缘计算结合的通信系统。移动边缘 计算是蜂窝通信下的一种新颖的数据处理方式。以往设备终 端需要同时采集和处理数据,而利用 5G 的低时延、高可靠 性特点,可以将数据上传至具有高算力的中心服务器,再将 结果反馈给终端。这种方式不需要终端进行大量计算,从而 在物联网中极大节省了设备的功耗和算力,也保证了数据获 取的可靠性。透射 RMS 多天线基站与边缘计算结合可以提 升系统物理层性能,优化系统资源<sup>[13]</sup>。

(5) RMS 与车联网结合的通信系统。第3代合作伙伴计划(3GPP)第16版公布了基于5G新空口(5G NR)的蜂窝 式车联网标准。车联网已成为5G中最有潜力的应用场景。基 于超表面的透射,车联网系统演进并形成了两种侧链模式 (主动发送和被动透射模式),可以随时根据资源分配情况动 态优化系统负载和能耗。此外,这两种模式所具有的独特帧 结构可以大大减少信令开销。如今RMS在车联网中的应用尚 处于萌芽阶段,相关技术难点还需要更多的研究来解决<sup>[14]</sup>。

#### 4 结束语

在5G加速部署的大环境下,5G的一些优点和缺点都会 被放大。在追求极致通信的有效性和可靠性的同时,系统对 资源和技术的要求势必会更加严格。RMS具有的低能耗、 低成本和可重构性等特点,能弥补5G在这方面的不足。改 变 RMS的传播特性可以实现基于透射和反射两种架构的通 信系统。基于透射 RMS多天线系统具有更好的抗干扰能力 和频谱、能量使用效率,这为 B5G/6G 无线收发机架构设计 提供了新的思路。RMS不仅能适应原有系统的调制、波束 赋形和信道估计等,还能结合非正交多址接入、人工智能、 移动边缘计算、车联网和速率分割多址接入等新技术在 B5G/6G 时代大放异彩。目前,学术界和工业界已开展 RMS 技术和应用的深入研究,更多关于 RMS 的关键技术还有待 挖掘。虽然目前有关 RMS 的应用仍有许多亟待解决的问题, 但是我们相信在未来通信系统中 RMS会占据一席之地。

#### 参考文献

- [1] LI Z, CHEN W, HE C, et al. Multi-antenna systems by transmissive reconfigurable meta-surface [EB/OL]. [2022-04-25]. https://arxiv.org/abs/ 2109.05462
- [2] WU Q, ZHANG R. Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2019, 18(11): 5394–5409. DOI: 10.1109/TWC.2019.2936025

[3] 李南希, 朱剑驰, 郭婧, 等. 面向6G的可重构智能表面部署与应用思考 [J]. 移动 通信, 2021, 45(4): 105-109. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1010.2021.04.017

- [4] ZENG S, ZHANG H, DI B, et al. Reconfigurable intelligent surfaces in 6G: reflective, transmissive, or both? [J]. IEEE communications letters, 2021, 25 (6): 2063–2067. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3062615
- [5] BAI X, KONG F, SUN Y, et al. High-efficiency transmissive programmable metasurface for multimode OAM generation [J]. Advanced optical

materials, 2020, 8(17): 2000570. DOI: 10.1002/adom.202000570

- [6] TANG W, DAI J, CHEN M, et al. MIMO transmission through reconfigurable intelligent surface: system design, analysis, and implementation [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2683–2699. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007055
- [7] LI Z, CHEN W, WU Q, et al. Uplink transceiver design and optimization for transmissive RMS multi-antenna systems [EB/OL]. [2022–04–25]. https:// arxiv.org/abs/2112.08880
- [8] ZHANG W, XU J, XU W, et al. Cascaded channel estimation for IRS-assisted mmWave multi-antenna with quantized beamforming [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(2): 593–597. DOI: 10.1109/LCOMM.2020.3028878
- [9] HE J, WYMEERSCH H, JUNTTI M. Channel estimation for RIS-aided mmWave MIMO systems via atomic norm minimization [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(9): 5786–5797. DOI: 10.1109/TWC.2021.3070064
- [10] LI Z, CHEN W, WU Q, et al. Joint beamforming design and power splitting optimization in IRS-assisted SWIPT NOMA networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2022, 21(3): 2019–2033. DOI: 10.1109/TWC.2021.3108901
- [11] MAO Y J, DIZDAR O, CLERCKX B, et al. Rate-splitting multiple access: fundamentals, survey, and future research trends [EB/OL]. [2022-04-25]. https://arxiv.org/abs/2201.03192
- [12] WANG J, TANG W, HAN Y, et al. Interplay between RIS and AI in wireless communications: fundamentals, architectures, applications, and open research problems [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2021, 39(8): 2271–2288. DOI: 10.1109/JSAC.2021.3087259
- [13] HUANG S, WANG S, WANG R, et al. Reconfigurable intelligent surface assisted mobile edge computing with heterogeneous learning tasks [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2021, 7 (2): 369–382. DOI: 10.1109/TCCN.2021.3056707
- [14] CHEN Y, WANG Y, ZHANG J, et al. Reconfigurable intelligent surface (RIS) –aided vehicular networks: their protocols, resource allocation, and performance [J]. IEEE vehicular technology magazine, 2022, 17(2): 26–36. DOI: 10.1109/MVT.2022.3158046



市5G/6G 专家委员会特聘专家;研究领域为4G/ 5G/6G 网络,主要研究方向为超表面通信、无线 AI 和多址接入技术;获国家级项目13项、奖励20 余项,发布团体标准3项;发表论文200余篇(引 用8 000余次),获专利20余项。

## 宽带透射阵设计及其近场研究



Design of Broadband Transmitarray and Its Near-Field Research

#### 张岩/ZHANG Yan<sup>1</sup>, 赵超超/ZHAO Chaochao<sup>1</sup>, 贾田扬/JIA Tianyang<sup>2</sup> (1. 北京航空航天大学,中国北京100191; の中国北京市空市大学,中国北京100191;

2. 中国科学院空天信息创新研究院,中国北京100094)

Beihang University, Beijing 100191, China;
 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

DOI:10.12142/ZTETJ.202203007 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220606.1715.004.html 网络出版日期: 2022-06-07 收稿日期: 2022-05-24

摘要:提出并设计了一种基于紧耦合偶极子的宽带透射阵天线,该透射阵天线由宽带馈源天线和宽带透射型超表面两部分组成。馈源是经过改进设计的超宽带Vivaldi天线;宽带透射型超表面包括30×15个单元结构,每个单元结构由紧耦合偶极子天线和平行双导线组成。引入等效延迟距离的概念用于设计透射阵,并对其菲涅尔区电场进行研究。

关键词: 电磁超表面; 透射阵天线; 宽带天线; 菲涅尔区

Abstract: A wideband transmitarray antenna based on tightly coupled dipole is proposed in this paper. The transmitarray antenna is composed of a wideband feed antenna and a wideband transmission metasurface. The feed is an improved ultrawide band Vivaldi antenna. The wideband transmission metasurface consists of 30×15 cells, each of which consists of a tightly coupled dipole antenna and parallel metal lines. The concept of equivalent delay distance is introduced to design the transmitarray and its Fresnel zone electric field is investigated.

Keywords: electromagnetic metasurface; transmitarray antenna; wide band antenna; Fresnel zone

**(**传统设计方案中,电磁波的调控主要通过介质透镜来 实现<sup>III</sup>。随着科技的发展,无线通信、航空航天等行 业迫切需要具有高增益、宽频带、小重量等特性的天线,同 时基于电磁超表面设计思路的反射阵天线和透射阵天线等概 念被陆续提出。与反射阵不同,透射阵的馈源放置于辐射口 径面的前侧,避免了馈源遮挡问题。1982年,R.MILNE<sup>12</sup>首 次提出透射阵天线,随后透射阵的发展一直比较缓慢。1997 年,香港中文大学的K.W.LAM等<sup>13</sup>通过口径耦合微带贴片 加载传输线的方式实现了360°相移的透射阵单元。2006年, M.R.CHAHARMIR等<sup>14</sup>采用多层十字形阵子单元分别设计了 单频和双频的透射阵天线。这些均为透射阵的蓬勃发展奠定 了坚实的基础。

透射阵的代表性设计方法有3种:多层频率选择性表面、接收机-发射机结构、极化转换结构。H. NEMATOLLAHI等<sup>[5]</sup>设计了一种3层透射阵单元,可以实现 360°相移。AN W. X.等<sup>[6]</sup>使用垂直放置的金属圆柱连接两个 金属层,可以有效增大传输系数幅度和传输相移范围。然 而,由于频率选择表面(FSS)单元的工作带宽具有局限性, 整个透射阵的工作带宽十分狭窄。虽然我们可以通过增加层 数来扩展带宽,但是随着层数的增加,天线的剖面和复杂度 会大大增加。P. PADILLA等<sup>171</sup>提出了一种包括接收天线、微 带传输线和辐射天线3个部分的透射阵结构,通过调节微带 传输线的长度来实现相位调节。XIAO L.等<sup>181</sup>设计了一种基于 紧耦合偶极子的宽带平面透射阵天线,该天线可以在9.5~ 16 GHz之间稳定工作。具有接收-发射结构的透射阵天线的 带宽取决于辐射器和移相器的性能,可有效扩大透射阵的带 宽范围。K. MAVRAKAKIS等<sup>191</sup>提出了一种新的基于极化旋转 的低剖面、宽频带透射阵结构。透射阵单元包括3个金属 层,相邻金属层之间由介质层隔开。

本文的主要研究内容包括:基于紧耦合偶极子结构和时间延迟线技术设计了一种工作于3~9GHz的宽带透射阵单元,然后对其菲涅尔区电场特性进行研究,并对所设计的天线进行加工测试。

#### 1透射阵设计

本节主要针对基于紧耦合偶极子设计的宽带透射阵天线 展开研究,详细介绍了宽带透射阵天线的设计实现过程。

**基金项目:** 国家重点研发计划(2020YFB1807400);国家重点基础研究计划(2019-JCJQ-ZD-067-00);深圳市中央财政引导地方科技发展基金(2021Szvup081)

#### 1.1 宽带透射阵原理分析

透射阵天线的主要作用是将球面波转换为平面波,如图 1所示。

假设产生的定向波束沿 $(\theta_0,\varphi_0)$ 方向传输,出射场的相位记为 $\phi_i$ , $\phi_i$ 可以表示为:

$$\phi_i(x_i, y_i) = -k_0 \sin\theta_0 \cos\varphi_0 x_i - k_0 \sin\theta_0 \sin\varphi_0 y_i, \qquad (1)$$

其中, $k_0$ 是自由空间中的传播常数, $(x_i,y_i)$ 是透射阵阵面上 第*i*个单元中心位置的坐标。定义 $R_i$ 为馈源到第*i*个单元的 中心位置的距离, $\Phi_i(x_i,y_i)$ 为第*i*个单元补偿的相位,公式 (1)中等式左右两边分别除以 $k_0$ ,可以得到:

$$\frac{\Phi_i(x_i, y_i)}{k_0} = -\sin\theta_0 \left(\cos\varphi_0 x_i + \sin\varphi_0 y_i\right) + R_i$$
<sup>(2)</sup>

令 $d_i = \Phi_i(x_i, y_i)/k_0, d'_i = d_i - d_1$ ,则归一化的等效延迟 距离的具体表达式为:

 $d'_{i} = -\sin\theta_{0} [\cos\varphi_{0}(x_{i} - x_{1}) + \sin\varphi_{0}(y_{i} - y_{1})] + (R_{i} - R_{1})_{o} (3)$ 

可以看出,在一个频率范围内,一个透射阵单元的等效 延迟距离不会随着频率的变化而改变。因此,该透射阵单元 可用于补偿该工作频带内任意频率的空间相位延迟。

#### 1.2 宽带透射阵单元设计

宽带透射阵单元的整体结构示意图、上下层偶极子图案 如图2所示。该透射阵单元由一对紧耦合偶极子、一对平行 双导线和金属接地板3个部分组成。为避免共模谐振的发 生,本文通过基于时间延迟技术的平行双导线来实现超宽带 工作频带内的相移可调。



▲图1透射阵工作原理示意图

其中,两个偶极子天线分别印刷在材料为 Rogers RO4003C的介质板上、下表面上。介质板厚度为0.813 mm, 介电常数为3.55。紧耦合偶极子天线之间的耦合电容是通过 相邻单元末端的横向枝节和位于介质板异侧的寄生贴片引入 的。偶极子天线的接地板由两片金属组成,两个金属片之间 的间距为5 mm。设计的透射阵单元的具体参数如表1所示。



#### ▲图2 设计的宽带透射阵单元结构模型

#### ▼表1 宽带透射阵单元的结构参数

参数	t	$d_x$	$d_y$	$h_1$	$w_f$
数值/mm	0.813	15	20	10	0.5
d、d.:上下介质板	的宽和长	1			

n1:金属接地板距上下介质板的距离 v

w<sub>f</sub>:传输线的宽度

宽带透射阵单元的设计可以分为紧耦合偶极子天线单元 设计和传输线设计两个部分。

#### 1.2.1 紧耦合偶极子天线设计

本文所设计的天线在蝶形紧耦合偶极子单元的基础上, 通过在辐射贴片同侧增加横向枝节并在辐射贴片异侧增加寄 生贴片实现了相邻偶极子单元之间的耦合电容强度增强,从 而实现了超宽带的工作特性。

天线模型及其等效电路如图3所示, *C*<sub>1</sub>表示由横向枝节 结构产生的耦合电容, *C*<sub>2</sub>表示由寄生贴片结构产生的耦合 电容。图4为本文设计的紧耦合偶极子天线反射系数与频率 的关系图。由图4可以看出,在3~9 GHz的频率区间里,反 射系数均小于-10 dB。

#### 1.2.2 传输线设计

为了实现良好的阻抗匹配,我们对传输线的直角弯头进



### 行了切角处理。传输线参数L的取值为1~15 mm内的整数, 仿真得到各取值条件下对应的传输系数幅度曲线如图5所 示。从仿真结果可以看出,当L取值不同时,插入损耗均小 于1.8 dB,传输系数的相位会随着频率和参数L的变化而 改变。





#### ▲图4 紧耦合偶极子天线反射系数

#### ▲图3 设计的紧耦合偶极子天线模型

图6给出了透射阵单元在不同频率下的归一化等效延迟 距离。可以看出,在不同频率下的归一化曲线几乎重合,这 说明该透射阵单元的归一化等效延迟距离在3~9 GHz频段 内与频率无关,满足透射阵宽带工作特性的要求。

在 MATLAB 中使用数理统计中的最小二乘法,得到拟合函数如下:

 $d'_i(L) = -0.0213 \times L^2 - 6.2379 \times L + 5.7531_{\circ}$ (4)

拟合的曲线如图6所示。使用拟合曲线能够有效减少阵 面在不同工作频点的误差损耗。

#### 1.2.3 馈源设计

对于本文设计的 Vivaldi 天线,在辐射金属面上进行开 槽,可减小终端反射的电流,改善天线反射系数,提高天线 辐射特性。同时,也可以改变扇形短路端的张角,对馈电部 分的阻抗匹配进行优化。图7给出了相应的天线模型及其反 射系数曲线和方向图。



#### ▲图6 透射阵单元的归一化等效延迟距离

#### 1.3 阵面设计

本文设计的透射阵由 30×15个单元组成, 阵面尺寸为 300 mm×300 mm, 焦径比为0.5。图8为以透射阵中心位置 的单元为参照得到的电磁波在空间传输过程中的等效延迟距 离分布。依据等效延迟距离和单元传输线参数L之间的函数 关系,可实现透射阵的设计。最终的模型图如图9所示。











▲图7 Vivaldi天线模型及其反射系数曲线和方向图

### 2 宽带透射阵天线的性能分析

基于拟合函数的设计方法,本文实现了宽带透射阵天线 的阵面排布和联合仿真。距离阵面150 mm平面处的电场分 布如图10所示。



▲图10 电场分布图

由仿真结果可以看出,在透射阵的菲涅尔区,中心区域 的相位波动较小,幅度波动较为明显,这是因为透射阵是以 相位为依据进行阵面设计与排布的。经过进一步细化设计 后, 该透射阵有望用于天线测量系统。

#### 3 宽带透射阵天线的加工应用

为了证实设计方法的有效性,我们加工制造了透射阵样 品(如图11所示),并对样品进行了测试。如图12和图13 所示,天线具有稳定的辐射方向图,能够实现较好增益。

#### 4 结束语

本文提出并设计了一种基于紧耦合偶极子的宽带透射阵 天线,可实现3~9GHz的超宽工作带宽。其中,宽带透射 阵单元由紧耦合偶极子结构和平行双导线组成,在较宽工作 频带内具有良好的传输特性和360°的相移特性。此外,本 文还对菲涅尔区电场分布进行了研究,为了证实设计方法的 有效性,对所设计的透射阵天线进行了加工与测试。



▲图 11 透射阵天线测试演示图



```
▲图12 测试和仿真增益和口径效率曲线
```



▲图13 不同频率下方向图测试结果与仿真结果对比

#### 致谢

本研究得到北京航空航天大学吕善伟教授和全绍辉教授 的帮助,向他们表示感谢! based on polarization- rotating miniaturized-element frequency selective surfaces [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2020, 68(3): 2128-2137. DOI: 10.1109/TAP.2019.2949694

简 介

#### 参考文献

- [1] WU X, ELEFTHERIADES G V, VAN DEVENTER-PERKINS T E. Design and characterization of single- and multiple-beam mm-wave circularly polarized substrate lens antennas for wireless communications [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2001, 49(3): 431–441. DOI: 10.1109/22.910546
- [2] MILNE R. Dipole array lens antenna [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 1982, 30(4): 704–712. DOI: 10.1109/TAP.1982.1142835
- [3] LAM K W, KWOK S W, HWANG Y, et al. Implementation of transmitarray antenna concept by using aperture-coupled microstrip patches [C]// Proceedings of 1997 Asia-Pacific Microwave Conference. IEEE, 1997: 433– 436. DOI: 10.1109/APMC.1997.659416
- [4] CHAHARMIR M R, ITTIPIBOON A, SHAKER J. Single-band and dual-band multilayer transmitarray antennas [C]//Proceedings of 2006 12th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics and Canadian Radio Sciences Conference. IEEE, 2006: 1–4
- [5] NEMATOLLAHI H, LAURIN J J, PAGE J E, et al. Design of broadband transmitarray unit cells with comparative study of different numbers of layers [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2015, 63(4): 1473–1481. DOI: 10.1109/TAP.2015.2402285
- [6] AN W X, XU S H, YANG F, et al. A double-layer transmitarray antenna using Malta crosses with vias [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2016, 64(3): 1120–1125. DOI: 10.1109/TAP.2015.2513427
- [7] PADILLA P, MUÑOZ-ACEVEDO A, SIERRA-CASTAÑER M. Passive microstrip transmitarray lens for Ku band [C]//Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation: IEEE, 2010: 1–3
- [8] XIAO L, QU S W, YANG S W. Wideband planar tightly coupled dipole transmitarray [C]//Proceedings of 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2019: 1–4
- [9] MAVRAKAKIS K, LUYEN H, BOOSKE J H, et al. Wideband transmitarrays



作 者

**张岩**,北京航空航天大学副教授、院长助理,研 究方向为共形天线设计、新型电磁材料、计算电 磁学;已发表论文80余篇。



**赵超超**,北京航空航天大学在读硕士研究生;研 究方向为电磁超表面。



**贾田扬**,中国科学院空天信息创新研究院助理工 程师;主要从事天线设计工作;发表国际会议论 文1篇。

# 基于标量衍射理论的 RIS 波束码本设计



### RIS Code Book Design Based on Scalar Diffraction Theory



摘要:基于傅里叶光学中标量衍射理论,研究了可重构智能超表面(RIS)物理波束调控的码本设计方法,包括波束宽窄、波束指向和波束旋转;同时仿真分析了RIS单元相位比特量化精度对RIS波束方向图的影响。相关方法对实时快速生成RIS波束跟踪对应的RIS码本非常有效。

关键词: RIS; 傅里叶光学; 码本设计; 啁啾函数; 衍射; 角谱

Abstract: Based on the scalar theory of diffraction in Fourier optics, the approach of the code book design for reconfigurable intelligent surface (RIS) is proposed, including designing the width of the beam, and manipulating the direction as well as the rotation of the beam. The influence on the beam pattern is also studied considering the granularity of phase quantization based on simulation. The approach proposed is effective and useful in the fast code book generation for a real-time RIS beam tracking.

Keywords: RIS; Fourier optics; code book design, chirp function; diffraction; angular spectrum

(1)控制等效电路中的等效阻抗,比如通过PIN管(P-I-N结构二极管)/微机电系统(MEMS)开关/变容二极管来控制;

(2)控制材料参数,比如通过外加电场来调节液晶的介电常数(频带可调),或者在基底材料中引入钇铁石榴石,也可以通过磁场来调节基底材料的磁导率等;

(3)机械控制,即通过微机电系统,利用微马达步进电机来控制辐射单元的方向,进而改变辐射相位;

(4) 其他方法, 比如光控/光电联合控制等。

目前学术界或工业界 RIS的原型主要以单元的相位调控为 主。这给 RIS单元相位码本增加了恒模的限制。当 RIS的目标波 束是宽波束时,在恒模约束条件下,如何设计合适的码本是一 个关键问题。目前,基于最优化方法进行码本设计是一个研究 方向,比如通过遗传算法、梯度下降法或粒子群算法等。但优 化目标函数的设计、初始值、优化权值配置等对优化结果的性 能影响比较大。在恒模约束限制下,当RIS 面板的规模非常大 时,优化效率不高的问题尤其突出,同时主波束性能也不佳。

本文在傅里叶光学标量衍射基础上<sup>[11]</sup>,讨论了有限啁啾 函数和角谱分析,研究了宽、窄 RIS 波束方向图所对应码本 的设计方法;提出了基于扩展有限啁啾函数码本设计方法, 并针对 RIS空间波束的空域平移、旋转变换提出了相应的高 效码本生成方法;同时分析了不同比特量化粒度对 RIS 波束 性能的影响和远场码本的近场性能对 RIS 辐射方向图的影响。

#### 1 有限啁啾函数及其傅里叶变换

在一个有限空域上的二次相位指数函数则被称为有限啁啾函数<sup>[11]</sup>,如公式(1)所示。

$$g(x, y) = \exp\left[j\pi\beta(x^2 + y^2)\right] \cdot rect\left(\frac{x}{2L_x}\right) \cdot rect\left(\frac{y}{2L_y}\right), \quad (1)$$

其中 $\beta$ 为可配置的系数,  $L_x$ 、 $L_y$ 分别为RIS面板长、宽的一半, g(x,y)是RIS面板表面 $[x,y]^T$ 位置处单元的相位。

g(x,y)的傅里叶变换为:  $G(f_x,f_y) = G_x(f_x) \cdot G_y(f_y)$ , 其中:

$$G_{x}\left(f_{x}\right) = \frac{e^{-j\pi\frac{f_{x}}{\beta}}}{\sqrt{2\beta}} \left\{ C\left[\sqrt{2\beta}\left(L_{x} - \frac{f_{x}}{\beta}\right)\right] - C\left[\sqrt{2\beta}\left(-L_{x} - \frac{f_{x}}{\beta}\right)\right] + jS\left[\sqrt{2\beta}\left(L_{x} - \frac{f_{x}}{\beta}\right)\right] - jS\left[\sqrt{2\beta}\left(-L_{x} - \frac{f_{x}}{\beta}\right)\right] \right\}, \quad (2)$$

$$G_{Y}(f_{Y}) = \frac{e^{-j\pi\frac{f_{Y}}{\beta}}}{\sqrt{2\beta}} \left\{ C \left[ \sqrt{2\beta} \left( L_{Y} - \frac{f_{Y}}{\beta} \right) \right] - C \left[ \sqrt{2\beta} \left( -L_{Y} - \frac{f_{Y}}{\beta} \right) \right] + jS \left[ \sqrt{2\beta} \left( L_{Y} - \frac{f_{Y}}{\beta} \right) \right] - jS \left[ \sqrt{2\beta} \left( -L_{Y} - \frac{f_{Y}}{\beta} \right) \right] \right\}$$

$$(3)$$

C(z), S(z) 为函数的菲涅尔积分, 仿真结果如图1所示。 $C(z) = \int_{0}^{z} \cos\left(\frac{\pi t^{2}}{2}\right) dt, S(z) = \int_{0}^{z} \sin\left(\frac{\pi t^{2}}{2}\right) dt_{o}$ (4)

由于空间频率fx、fy与空间方向余弦之间的关系为[11-12]:

$$\cos(\alpha) = \lambda f_{\chi}, \ \cos(\beta) = \lambda f_{\gamma}, \ \cos(\gamma) = \sqrt{1 - \left[\lambda \left(f_{\chi} + f_{\gamma}\right)\right]^2}_{\circ} (5)$$

因此, 在远场假设基础上, RIS 面板反射波束的辐射方 向图可以通过公式(5)与RIS表面相位分布的角谱直接建 立联系。在一维时域傅里叶变换中, 原函数与其傅里叶变换 表达的是时间域与频率域之间的关系; 而二维空间域傅里叶 变换所表示的是长度域与波数域之间的关系, 其中波数的量



▲图1 C(z)、S(z)菲涅尔积分仿真结果

纲是 1/m。因为:  $k = \frac{p}{\hbar}$ ,其中p是动量,  $\hbar$ 是约化普朗克常数,所以,空间傅里叶变换之后的物理意义就是动量空间,也称为k-space。

仿真例:

对于正方形 RIS 面板,载频 $f_e$  = 28 GHz,横/纵向阵子数 $N_x = N_y = 64$ ,横/纵向阵子间距均为0.5 $\lambda$ ( $\lambda$ 为载频波长)。假设入射波垂直于面板入射,收发端均为远场,根据公式(1)及各阵子单元位置可确定每个阵子的调控相位,通过配置不同 $\beta$ 值可观察其对 RIS 辐射方向图的影响,如图2所示。

由图2可以看出,公式(1)中β值越大,波束的宽度就 会越宽,同时最大增益会越小,但主要波束能量仍然在主波 束范围内。

由于存在 RIS 码本恒模限制,在 RIS 宽波束范围内,其 增益会不可避免地存在一定的抖动。此时,使用半功率波束





#### ▲图2 不同β值对RIS辐射方向图的影响

宽度(HPBW)来定义RIS波束宽度的方法已不再适用,而 定义比最大波束增益低5dB、7dB或9dB的波束宽度则更 为适用,即5dB功率波束宽度(PePBW)、7dB功率波束宽 度(HePBW)、9dB功率波束宽度(NoPBW)。

#### 2 扩展有限啁啾函数及可变宽度波束码本

公式(1)中的相位项 $j\pi\beta(x^2 + y^2)$ 仅有一个可调变量 $\beta$ , 其变化会对 RIS 面板波束方向图的横/纵方向产生影响。当需 要在横/纵方向上对波束方向图进行独立调整时,这一相位 项可以扩展为:

$$j\pi\beta(w_{x}\cdot|x|^{n}+w_{y}\cdot|y|^{n})_{o}$$
(6)  
仿真例:

在第1章节的系统仿真条件下, $\beta = 240$ 。我们为系统配置不同的 $n, w_x, w_y$ 。此时的仿真结果如图3所示。

由图3的结果可知,公式(6)的w<sub>x</sub>和w<sub>y</sub>两个参数可以



▲图3 基于扩展有限啁啾函数不同配置参数生成码本对RIS 面板辐射方向图的影响

分别独立控制两个维度的波束宽度,并且w,和w,的值越大, 波束越宽, 增益会越低, 但主要波束能量仍然在主波束范 围内。

#### 3 波束空间域平移、旋转变换

#### 3.1 波束空间域平移变换

公式 (6) 中 $j\pi\beta(w_x \cdot |x|^n + w_x \cdot |y|^n)$ 码本所确定的波 束中心在水平角 AZ=0°、俯仰角 EL=90°的位置。若需要将 波束平移到任意 AZ和 EL的位置,则相关的码本需要更 新为:

$$j\pi\beta\Big[(w_x\cdot|x|^n+w_y\cdot|y|^n)+2\cdot\big(x\cdot F_x^t+y\cdot F_y^t\big)\Big],\qquad(7-1)$$

$$F_{x}^{t} = -\frac{\cos(\alpha)}{\lambda}, F_{y}^{t} = -\frac{\cos(\beta)}{\lambda},$$
(7-2)

其中,  $\cos(\alpha)$ 与 $\cos(\beta)$ 为目标矢量 V方向余弦的前两项。

$$\boldsymbol{V}^{t} = \left[\cos(EL)\cos(AZ - \pi), \ \cos(EL)\sin(AZ - \pi), \ \sin(EL)\right]_{\circ}^{T}$$
(7-3)

在第1章节的系统仿真条件下,我们以AZ=0°、EL= 90°为基础进行平移仿真实验。仿真实验结果如图4 所示。

由图4的结果可知,基于公式(7-1)-(7-3)的方法 可以灵活控制波束的平移变换位置。

#### 3.2 波束空间域旋转变换

理论上,基于恒模码本进行旋转变换是无解析解的。由 基于空间频域旋转变换的逆傅里叶变换推导可知,其首项为 空间域的旋转变换。因此,当在空间频域进行θ旋转时,可 以考虑如下码本策略:

$$j\pi\beta \Big[ \left( w_x \cdot \left| x^{\text{Trans}} \right|^n + w_y \cdot \left| y^{\text{Trans}} \right|^n \right) \Big], \tag{8-1}$$

$$\underbrace{\mathbf{x}^{\mathrm{Trans}}}_{\text{$\xi$tem}} = \mathbf{R}_{\mathrm{rot}}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{\mathrm{rot}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}_{\mathrm{o}}$$
(8-2)

在第1章节的系统仿真条件下,以旋转角 $\theta=0^{\circ}$ 为基础进 行旋转的仿真实验结果如图(5)所示。

由图5可知,基于公式(8-1)-(8-2)的方法可以灵 活控制波束的旋转方向。由于恒模码本无旋转变换无解析 解,旋转后的波束会有一定程度的变形,但尚在可接受范 围内。





#### 3.3 波束空间域平移旋转复合变换

考虑综合的空间域平移旋转复合变换相位为:

$$j\pi\beta\Big[(w_x\cdot |x^{\text{Trans}}|^n + w_y\cdot |y^{\text{Trans}}|^n) + 2\cdot (x^{\text{Trans}}\cdot F_x^t + y^{\text{Trans}}\cdot F_y^t)\Big],$$
(9-1)

$$F_{x}^{t} = -\frac{\cos(\alpha)}{\lambda}, F_{y}^{t} = -\frac{\cos(\beta)}{\lambda}, \qquad (9-2)$$

其中,  $\cos(\alpha)$ 与 $\cos(\beta)$ 分别为目标波束方向中矢量 V方向余 弦的前两项。

$$V^{t} = \left[\cos(EL)\cos(AZ - \pi), \cos(EL)\sin(AZ - \pi), \sin(EL)\right]^{\mathrm{T}},$$
(9-3)

$$\begin{bmatrix} x^{\text{Trans}} \\ y^{\text{Trans}} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{\text{rot}}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{\text{rot}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (9-4)$$

其中,  $AZ \pi EL$  为波束平移的位置,  $\theta$  为空间频域旋转角度。



以  $AZ=0^{\circ}$ 、 $EL=90^{\circ}$ 、旋转角  $\theta=0^{\circ}$ 为基础进行旋转的仿 真实验结果如图(6)所示。

可以看出,图6的仿真结果证明了通过公式(9-1)-(9-4)进行波束联合平移和旋转变换的可行性。

#### 4 不同比特量化粒度对性能的影响

考虑到RIS工程实现对相位调整粒度的限制,我们需要研究不同比特量化下的波束性能。N bit 对应的可选离散相位如下:

$$\begin{bmatrix} \phi_0 & \phi_1 & \phi_2 & \cdots & \phi_{2^{n-1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{2\pi}{2^n} \cdot 1 & \frac{2\pi}{2^n} \cdot 2 & \cdots & \frac{2\pi}{2^n} \cdot 2^{n-1} \end{bmatrix}_{\circ}$$
(10)

基于最邻近原则,由公式 (1)、(6) — (9) 确定的RIS 第 (m,n) 个单元的连续相位为 $\vartheta_{m,n}$ 。在此基础上,可通过公 式 (10) 确定RIS第(m,n)个单元所对应的离散码本相位 $\varphi_{m,n}$ 。

$$\varphi_{m,n} = \phi_k, \tag{11}$$





 $\begin{vmatrix} \phi_k - \vartheta_{m,n} \end{vmatrix} = \min(|\phi_0 - \vartheta_{m,n}|, |\phi_1 - \vartheta_{m,n}|, |\phi_2 - \vartheta_{m,n}|, \cdots, |\phi_{2^{n-1}} - \vartheta_{m,n}|)_{\alpha}$ (12)

在第1章节的系统仿真条件下,不同比特量化对RIS波 束方向图的影响如图7—9所示。

根据图8—9的仿真结果,我们可以得出以下3个结论:

(1) 比特量化对RIS辐射方向图的影响较大:一方面主 瓣波束的波动会变大,另一方面会激励出较大的旁瓣;

(2) 4 bit 及以上量化精度与连续相位的结果已经非常接近,可以用于静态面板的设计;

(3) 1 bit 量化精度在主瓣方向波束有较明显的分叉现象,宽波束性能不理想。

#### 5 远场码本在近场的性能表现

在第1章节的系统仿真条件下,假设 $\beta = 1$ ,入射激励仍然为远场,RIS面板中心与接收点之间的距离为 $d_2$ 。当采用远场波束码本时( $d_2$ 满足Fraunhofer条件), $d_2$ 近场RIS波





▲图8 不同比特量化的智能超表面(RIS)波束方向图顶视图



▲图9 不同比特量化的智能超表面(RIS)波束横向剖面图比较(0°剖面)

束的性能分析结果(横向剖面图)如图10所示。

由图10可以看出:

(1)远场码本在远场的辐射方向图与 d<sub>2</sub>=1 000 m处的辐射方向图基本重合;

(2) 当 d<sub>2</sub>减小时,波束出现明显展宽效应,最高增益 变小。

#### 6 结论

本文在傅里叶光学标量衍射基础上,研究了宽/窄 RIS波 束方向图、RIS空间波束的空域平移与旋转变换所对应码本 的高效生成方法,并仿真分析了不同比特量化粒度对 RIS波 束性能的影响和远场码本的近场性能对 RIS辐射方向图的影 响。相对于基于优化的码本设计方法,本文给出的方法性能 好、效率高,尤其适用于实时 RIS 波束跟踪等场景的应用, 同时给出了如下的结果和建议:



▲图10 远场码本在近场的性能仿真

(1)用HPBW定义RIS波束宽度已不合适,而定义比最 大波束增益低5dB、7dB或9dB的波束宽度则更为适用, 即5dB功率波束宽度(PePBW)、7dB功率波束宽度 (HePBW)、9dB功率波束宽度(NoPBW)。

(2) 基础有限啁啾函数码本设计方案为 $[j\pi\beta(x^2 + y^2)]$ 。 其中, $\beta$ 为可调参数,该值越大,波束越宽。

(3) 扩展有限啁啾函数码本设计方案为 $j\pi\beta(w_x \cdot |x|^n + w_y \cdot |y|^n)$ 。 $w_x \pi w_y$ 可以控制波束在不同刨切面的宽度。n为 另外一个控制波束宽窄的参数,可以与 $\beta$ 联合优化。

(4)综合的空间域平移旋转复合变换相位满足 3.3 章节所示的(9-1)—(9-4)。

(5) 不同比特量化对 RIS 波束辐射方向图性能的影响如下:

a. 比特量化对 RIS 辐射方向图的影响较大:一方面主瓣 波束的波动会变大,另一方面会激励出较大的旁瓣;

b.4 bit及以上量化精度与连续相位的结果已经非常接近,可以用于静态面板的设计;

c.1 bit量化精度在主瓣方向波束有较明显的分叉现象, 宽波束性能不理想。

(6) 当采用远场窄波束码本时,近场 RIS 波束的性能为:

a. 远场码本在远场的辐射方向图与 d<sub>2</sub>=1 000 m处的辐射 方向图基本重合;

b. 当d,减小时, 波束出现明显展宽效应, 最高增益下降。

#### 致谢

本研究得到西安电子科技大学秦凡副教授,中兴通讯股

份有限公司袁志峰、杨军、陈艺戬、俞光华等专家的帮助,谨致 谢意!

#### 参考文献

- [1] 窦建武, 陈艺戬, 张楠, 等. 智能可控电磁表面信道建模 [J]. 电波科学学报, 2021, 36(3): 368-377. DOI: 10.12265/i.cjors.2020195
- [2] 杨帆, 许慎恒, 刘骁, 等. 基于界面电磁学的新型相控阵天线 [J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 256-265. DOI: 10.13443/j.cjors.2018052401
- [3] WU R Y, CUI T J. Microwave metamaterials: from exotic physics to novel information systems [J]. Frontiers of information technology & electronic engineering, 2020, 21(1): 4–26. DOI: 10.1631/fitee.1900465
- [4] HUM S V, PERRUISSEAU-CARRIER J. Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: a review [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2014, 62(1): 183–198. DOI: 10.1109/TAP.2013.2287296
- [5] TANG W K, DAI J Y, CHEN M Z, et al. Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter [J]. Electronics letters, 2019, 55 (7): 417-420. DOI: 10.1049/el.2019.0400
- [6] CHEN K, FENG Y J, MONTICONE F, et al. A reconfigurable active Huygens' metalens [J]. Advanced materials, 2017, 29(17): 1606422. DOI: 10.1002/ adma.201606422
- [7] 杨帆, 许慎恒, 毛艺霖, 一种基于数字相控电磁表面的新型相控阵: CN106848588B [P]. 2017
- [8] 蒋卫祥, 张信歌, 柏林, 等. 一种基于数字编码表征的方向图可重构平面阵列天 线及其控制方法: CN110148838A [P]. 2019
- [9] KAMODA H, IWASAKI T, TSUMOCHI J, et al. 60–GHz electronically reconfigurable large reflectarray using single-bit phase shifters [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2011, 59(7): 2524–2531. DOI: 10.1109/TAP.2011.2152338
- [10] 许河秀. 超表面电磁调控机理与功能器件应用研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2019
- [11] GOODMAN J W. Introduction of Fourier optics: third edition [M]. London: Publishing House of Electronics Industry, 2016
- [12] 苏显渝. 信息光学: 第2版 [M]. 北京: 科学出版社, 2011

#### 作者简介



**崔亦军**,中兴通讯股份有限公司无线移动新型基 站架构总工、深圳市高层次国家级领军人才;主 要研究方向为 5G/6G 无线产品架构、超宽带基 站、Massive MIMO、智能电磁表面等;主持开 发的 Pre5G Massive MIMO荣获巴塞展全球移动 大奖"最佳移动技术突破奖"和"CTO选择奖", 参与和主持国家重大科技专项多项;获河南省科 技进步奖二等奖、中国通信学会科学技术奖一等

奖等奖项;申请专利30余项。



窦建武,中兴通讯股份有限公司正高级工程师、 中国电子学会电波传播分会委员、IMT-2030信 道测量与建模组副组长、移动专用网络国家工程 研究中心专用移动通信研究所所长、深圳市高层 次国家级领军人才;主要研究方向为5G/6G无线 信道建模、无人机通信、卫星通信、太赫兹通信、 Massive MIMO、智能电磁表面等;参与3GPP 5GCM/UAV/NTN等标准化工作,所主导的Map-

based Hybrid 信道模型被3GPP及ITU 国际标准化组织采纳,参与和主持国家重大科技专项多项;获中国专利金奖、上海市科技进步奖、中国通信学会科技技术奖一等奖等奖项。



**刘怡平**,西安电子科技大学广州研究院在读硕士 研究生;主要研究方向为5G/6G信道建模、智能 电磁表面、超材料天线等。

# 智能超表面在通信感知一体化 系统中的应用

Applications of Reconfigurable Intelligent Surface for Integrated Sensing and Communication

刘让/LIU Rang,罗泓昊/LUO Honghao,李明/LI Ming

(大连理工大学,中国大连 116024) (Dalian University of Technology, Dalian 116024, China) DOI:10.12142/ZTETJ.202203009 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20220620.1444.002.html 网络出版日期: 2022-06-21 收稿日期: 2022-05-24

摘要:通过对智能超表面(RIS)辅助无线通信系统和雷达感知系统的工作原理、性能优势和实际应用的介绍,揭示了 RIS 辅助通感一体化系统 的可行性、优势及应用前景,重点探讨了将 RIS 在近场通信和感知、双站感知、宽带系统中的挑战和机遇,以及在通感一体化(ISAC)系统中 部署有源、多个、无人机携载 RIS等的可能性。认为人工智能将会给相关研究提供更有效和更鲁棒的算法设计方案。

关键词: RIS; 通感一体化; 反射系数设计; 多天线系统; 波束赋形设计

Abstract: After reviewing the functionalities, advantages, and practical applications of reconfigurable intelligent surface (RIS)-assisted wireless communication systems and RIS-assisted radar sensing systems, the feasibility, advancements, and prospects of RIS-aided integrated sensing and communication (ISAC) are revealed. Then, the challenges and opportunities of deploying RIS in various ISAC scenarios including near-field communication and sensing, bi-static sensing, and wideband systems are discussed, as well as the promising future directions of various RIS deployments in ISAC systems including active, multiple, and unmanned aerial vehicle (UAV)-mounted RIS. It is believed that artificial intelligence will provide more effective and robust solutions to related research.

Keywords: RIS; ISAC; reflection coefficient design; multi-antenna system; beamforming design

5 G的大规模商用有力推动了当今社会向万物智联迈进, 同时也促进了学术界和产业界对未来6G的研究。为了支持6G在智慧城市、智慧交通、智能家居等典型应用场景中 的不同需求,网络的通信、感知、计算等功能需要进一步强 化和融合。因此,除了进一步优化大规模天线阵列、毫米波 通信和致密网络等传统技术之外,亟须引入一些革命性的新 技术来支撑未来6G网络。智能超表面(RIS)和通信感知一 体化(ISAC)作为两种极具前景的创新型技术,近年来受 到了广泛关注。

RIS的部署为系统提供了重塑信道的能力,并为系统设 计引入了新的自由度(DoFs)。通过合理设计RIS反射系数, 可以实现智能操控无线传输环境,解决盲区覆盖、边缘用户 服务和信道环境恶化等通信难题,为提升通信服务质量提供 了一种高能量效率、高频谱效率、低硬件复杂度的解决方 案。在无线通信飞速发展的同时,海量无线设备的接入和超 高通信速率导致频谱资源需求激增,进而造成了严重的频谱 拥塞。针对这一难题,业界提出了一种基于共享雷达系统和 通信系统频谱资源的方案,进一步支持两者共享天线、射频 和基带软件无线电处理平台等资源,极大地提升了系统的频 谱、能量和硬件效率。

本文进一步研究和探讨 RIS 在 ISAC 系统中的应用潜力。 首先,概述了 RIS 的基本工作原理和优势,总结了 RIS 在无 线通信系统中的相关研究和应用。其次,介绍了雷达系统中 的感知需求和性能指标,以及 RIS 辅助的雷达感知系统。然 后,介绍了面向 6G 的通信感知一体化技术,分析对比了 RIS 辅助 ISAC 的相关研究,并通过仿真实验证明了在 ISAC 系统 中部署 RIS 的优势。随之,讨论了 RIS 辅助 ISAC 的未来研究 方向。最后,对全文进行总结。

#### 1 RIS辅助无线通信

RIS首先出现在无线通信领域,因其具有高效智能操控

基金项目: 国家自然科学基金(61971088)

无线传输环境的能力而被视为未来6G网络的一个重要使能 技术。近几年来,学术界和工业界涌现了大量关于RIS的理 论研究和硬件实现,揭示了RIS辅助无线通信的优势和 前景。

#### 1.1 RIS的工作原理和优势

由超材料技术发展而来的 RIS 是由大量反射单元组成 的。通常,这些反射单元的硬件结构非常简单且能耗极低。 通过改变相应的电路参数(如偏置电压),每个反射单元可 以获得不同的电磁响应,进而调控入射信号的相移、幅度、 频率和极化等参数。通过协同控制多个单元参数,RIS实现 了无源反射波束成形,并可构建更加有利的电磁传输环境。 与传统有源中继相比,RIS具有硬件复杂度更低、能量效率 更高的优势。RIS 的组成器件轻便易携带,十分容易部署在 建筑物表面或者移动端的表面等,因此RIS具有良好的便携 性和移动性<sup>III</sup>。

#### 1.2 RIS在无线通信系统中的应用

目前无线通信系统中 RIS 的研究主要聚焦在联合优化 RIS反射系数,以提升系统的各种性能指标。例如,最大化 频谱效率/总速率/能量效率/安全传输速率/能量接收端的能 量,最小化发射功率/误码率等。这些丰富广泛的应用展示 了部署 RIS 所带来的性能增益,揭示了 RIS 在无线通信系统 中的有效性<sup>[2]</sup>。一个典型的 RIS 辅助下行多用户通信系统如 图1 所示。当基站与用户之间的直射链路被阻挡时,基站利 用 RIS 建立的非直射信道实现下行多用户通信。



▲图1 RIS辅助下行多用户通信系统

#### 2 RIS辅助雷达感知

近几十年来,无线通信系统和雷达感知系统的研究相互借鉴,共同发展。因此,在RIS辅助无线通信相关研究进行得如火如荼时,也涌现出很多关于RIS辅助雷达感知的探

索。通过部署 RIS 可以改善雷达收发机与感知目标的信道环境,从而提升感知性能。

#### 2.1 雷达感知需求和指标

在物理层的设计中, 雷达感知需求主要包括检测和估 计<sup>[3-4]</sup>。检测是一个二分类或多分类任务, 常用检测概率、 误警率来衡量; 估计指对目标的方位角、距离、速度、雷达 反射截面积等参数进行估计, 常用均方误差(MSE)或克拉 美罗界(CRB)来衡量。考虑到检测概率、MSE、CRB等指 标难以直接优化, 现有研究大多采用一些间接手段, 比如优 化发射波形的波束方向图、最大化雷达接收回波的信噪比 (SNR)或信干噪比(SINR)等。

#### 2.2 RIS 在雷达感知系统中的应用

一个RIS辅助雷达感知系统如图2所示。由于雷达与目标之间的直射(LoS)路径是实现感知功能的关键,当直射路径受到遮挡导致信号很弱甚至不存在时,可以在雷达和目标之间构建一个虚拟的LoS信道来实现盲区覆盖,保证感知性能。考虑到多跳引起的信号衰减,RIS一般部署在靠近雷达发射机或者接收机的地方。设计RIS反射系数<sup>[6]</sup>,可以极大增强雷达接收的目标回波能量,从而提升目标探测性能。这些初步探索证实了RIS也能给雷达感知系统带来显著的性能增益。



▲图2 RIS辅助雷达感知系统

#### 3 RIS辅助ISAC

新兴的ISAC技术融合了传统的通信系统和雷达系统, 通过共享频带资源、传输波形与硬件平台,提升频谱/能量/ 硬件效率。在ISAC系统中部署RIS给系统设计引入了新的 自由度,通过合理设计RIS反射系数可以智能地调控系统的 无线传输环境,更好地协调并提升通信和感知性能。

#### 3.1 面向6G的ISAC

为了支持未来6G网络对高速率无线通信、高精度感知 能力、海量设备接入的愿景, ISAC 技术通过共享通信系统 和雷达系统的频谱等资源来解决日益严重的频谱拥塞问题。 ISAC技术的产生源于无线通信系统和雷达系统存在的许多 共通之处,比如,可共用的天线等射频前端硬件设备、相似 的信号处理算法,以及一致的宽带大规模天线阵列系统演进 趋势。ISAC这个宏观概念涵盖了不同层次通信和感知的融 合,从简单的双系统共存、协作,到一体化系统的联合设 计,甚至包含通感融合的移动网络。在通过共享不同资源获 得系统集成增益和协作增益的同时,这些技术方案也对 ISAC系统的优化设计带来了严峻的挑战<sup>[4]</sup>。比如,如图3 (a) 所示, 较简单的雷达通信共存(RCC) 系统通过共享通 信和雷达的频谱资源提升频谱利用率,对现有硬件设施部署 影响最小,但是需要合理地设计二者的发射信号实现干扰管 控;如图3(b)所示,极具应用前景的雷达通信一体化 (DFRC)系统使用同一个发射机在相同的频带上发射双功能



▲图3 两种常见的ISAC系统

的波形来同时实现通信和感知功能,极大地提升了频谱效 率,减小设备尺寸、成本和功耗,但是双功能发射波形的设 计对于实现更好的通信和感知性能权衡至关重要。通过与其 他先进技术交织融合,ISAC能够实现和提升系统的通信与 感知能力,因此拥有很大的研究潜力。

#### 3.2 RIS辅助ISAC相关研究

现有研究表明、单独在通信系统和雷达系统中部署RIS 可以带来显著的通信/感知性能增益。可以预见的是,在融合 了通信和感知能力的ISAC系统中引入RIS,可以更加灵活地 协调、提升系统的通信和感知性能。对于RCC系统,在基站 和雷达之间部署RIS能够提升通信用户性能,实现较好的干 扰管控<sup>[7]</sup>。对于DFRC系统,当探测目标的距离远大于基站与 RIS的距离时,部署RIS几乎不影响目标回波,但依然可以提 升系统的通信性能<sup>®</sup>;考虑较近目标时,通过合理优化RIS反 射系数,可以在提升通信性能的同时增强反射路径接收的目 标回波能量[9-10]/削弱杂波能量[11],而且联合设计基站接收滤 波器可以进一步提升雷达感知性能[12-13]。此外,多天线系统 的引入以及联合波束赋形设计使能通信系统同时传输多个数 据流,使能雷达系统同时监测多个目标或达到更好的目标探 测效果。表1对上述 RIS 辅助 ISAC 的相关研究进行了总结。 可以看到,在不同的ISAC系统中,通过联合优化RIS反射 系数和其他变量,可以提升不同的通信和感知性能指标。

#### 3.3 仿真结果和分析讨论

本节将通过仿真结果来验证在DFRC系统中部署RIS的 有效性。为了方便分析,假设如图4所示的一个典型的RIS 辅助DFRC系统。16天线的基站在N元素RIS的辅助下同时 服务一个单天线的用户,检测一个点目标,并且存在一个点 杂波干扰源,且所有信道均只包含LoS路径。基站与用户/目 标/杂波的路径损耗系数为3.2,RIS与用户/目标/杂波的路径 损耗系数为2.4,基站与RIS的路径损耗系数为2.2。噪声功 率为-80 dBm,目标和杂波的RCS为1,通信需求为10 dB,发 射功率为20 dBW,每个雷达脉冲包含20个样本。通过联合 设计RIS反射系数和基站的发射波形与接收滤波,在满足通 信限制条件和天线恒功率发射的约束下,使雷达检测的 SINR达到最大。为了解决这个复杂的非凸问题,通过引入 辅助变量,并使用主优最小化(MM)和交替方向乘子 (ADMM)法将原问题转化为几个可以解决的子问题,从而 迭代求解。

图5展示了二维平面内 RIS 辅助 DFRC 传输环境中不同 位置的能量分布。可以看到,基站形成的有源波束分别指向

#### ▼表1 RIS辅助ISAC相关研究总结

	系统模型				通信和感知	DIC日不枯��汤	出业亦是	
文献	系统	基站 天线数	通信 用户数	感知 目标数	性能指标	信感知	(除反射系数外)	响回波
[7]	RCC	基站单 雷达多	单	多	SINR、SINR	否	雷达波束成形、接收滤波	否
[8]	DFRC	多	多	多	多用户干扰、 方位角 CRB	否	发射波形矩阵	否
[9]	DFRC	多	单	单	SNR、SNR	是	发射波束成形	是
[10]	DFRC	多	单	单	SNR、SNR	是	发射波束成形	是
[11]	DFRC(宽带、有杂波)	多	多	单	SINR、SINR	是	发射波束成形	是
[12]	DFRC(有杂波)	多	多	单	欧式距离、SINR	是	发射波形、接收滤波	是
[13]	DFRC	多	多	单	总速率、SNR	是	发射波束成形、接收滤波	是
CRB: 克	初美罗界 DFRC: 雷达通	言——体化	ISAC: 诵信!	惑知—体化	RCC:雷达诵信共存	RIS: 智能超表面	SINR:信干燥比 SNR:信	



了目标、RIS和用户, RIS形 成的无源波束也指向了目标 和用户,同时杂波干扰源处 的能量得到了抑制。

图6展示了基站接收的 不同路径目标回波强度(以 信噪比的形式表示)。与没有 部署RIS的DFRC方案相比, 更多的RIS反射单元带来的 总增益更大。随着RIS反射 单元的增多, RIS 所能带来 的增益变大。所以反射路径 的信号强度逐渐变大,直射



▲图5 不同位置的能量分布图

路径的反而减小。当N增大到一定程度时,两次经过RIS的 路径最强。这些结果验证了部署和联合优化RIS的优势,还 表明了大规模RIS的有效性。

#### 4 RIS辅助ISAC的未来研究方向

上述研究初步证实了RIS辅助ISAC系统的可行性和有 效性。为了进一步提升RIS辅助ISAC的性能,促进更多实 际应用场景中的部署实施,本章中将探讨了一些亟待解决的 问题和相关的未来研究方向。

#### 4.1 RIS在近场通信与近场感知中的应用

随着超大规模反射阵列和更高载波频率的发展, RIS的 近场范围逐渐变大。另一方面,为了获得更大的反射增益, RIS通常部署在靠近发射机/接收端的位置。因此,近场通 信/感知是未来6G网络必须要面对的场景。在远场传输中, 近似为平面波的电磁波可以将波束指向某个特定角度;而在



▲图6 不同路径接收回波信号强度

近场传输中,呈现球面波特性的电磁波可以将波束集中在特定角度和特定距离的地方。这个特性对系统设计来说既是挑战又是机遇:一方面,基于球面波的建模使得系统的信道估计和波束设计等问题都更加复杂,尤其是当RIS的反射单元个数和基站的天线数较多时;另一方面,球面波可以利用更多的空间DoFs,在提升通信容量、实现更高感知距离/角度分辨率、提升定位精度方面具有潜力。因此,对于RIS部署在近场区域的ISAC系统,合理的建模和优化设计将有助于实现更好的通信和感知性能。

#### 4.2 RIS在双站感知中的应用

在实际应用中,为了获得较强的目标回波信号,避免共 置收发机之间的干扰,双站感知系统比上述单站感知使用得 更加广泛。在基于双站感知的ISAC系统中部署RIS有双重 优势:一方面,对于双站系统中至关重要的同步问题,部署 RIS可以构建一条相对稳定的虚拟LoS信道,用于在实际直 射信道遮挡或较弱的情况下提供较强的参考信号;另一方 面,同时在ISAC发射端和感知接收端部署RIS,可以更好地 实现通信感知性能权衡,探测信号集中和杂波分离的功能。

#### 4.3 RIS在宽带 ISAC 系统中的应用

分析 RIS 的硬件实现电路可以发现,这些反射器件对不同频率入射信号产生的响应也不相同,即 RIS 具有频率选择性。而现有关于 RIS 辅助宽带系统的研究并没有考虑这一特性,这将不可避免地降低通信服务质量,并将导致目标回波的多普勒频率模糊,影响对目标运动速度的估计。因此在建

模 RIS 辅助宽带 ISAC 系统时,应该将 RIS 的频选特性考虑在内,并探索其对宽带通信和运动目标检测的影响。

#### 4.4 ISAC系统中的多种 RIS 部署方式

除了现有 ISAC 研究中采用的单个无源 RIS 固定部署, 还有诸多其他类型和部署方式的 RIS。(1)有源 RIS:它可 以放大入射信号从而克服信号多跳造成的路径衰减,因此部 署有源 RIS 并联合设计其放大系数和相移,可以极大提升 ISAC 系统的通信和感知能力;(2)多个 RIS:在通信/感知 的热点区域或边缘区域部署多个 RIS,合理优化其部署位置 并联合设计 RIS 反射系数,可以提供大规模反射阵列增益, 从而保证热点区域的高通信吞吐量、高精度感知,以及边缘 区域的通信与感知覆盖;(3)无人机携载 RIS:利用无人机 引入的移动性,通过联合优化其运动路线和 RIS 反射系数, 可以提供低空通信和感知,覆盖由于地面障碍产生的盲区。

#### 4.5 基于人工智能技术的算法设计

在RIS辅助的ISAC系统设计中,需要优化的RIS反射系数一般较多且为离散值。RIS级联信道需要估计的参数更多,具体的感知性能指标难以显式地表达和优化。因此,基于传统优化方法的算法设计较为复杂,不利于RIS的实际部署。基于人工智能(AI)技术的算法设计是一个新的思路,有望提供一个更高效、更鲁棒、通信和感知性能更好的解决方案。

#### 5 结束语

作为两个新兴技术的结合体,智能超表面辅助的通信感 知一体化支持高质量、广覆盖、高可靠的通信和感知功能, 将为未来 6G 网络发展提供有力的支撑。本文首先概述了相 关技术的原理和研究现状,然后讨论了若干亟须解决的问题 和未来的研究方向,期望能促进该技术在更多实际应用场景 中的研究。

#### 参考文献

- [1] DI RENZO M, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2450–2525. DOI: 10.1109/JSAC.2020. 3007211
- [2] WU Q Q, ZHANG S W, ZHENG B X, et al. Intelligent reflecting surfaceaided wireless communications: a tutorial [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(5): 3313–3351. DOI: 10.1109/TCOMM.2021. 3051897
- [3] LI J, STOICA P. MIMO radar with colocated antennas [J]. IEEE signal processing magazine, 2007, 24(5): 106–114. DOI: 10.1109/MSP.2007. 904812
- [4] LIU F, CUI Y H, MASOUROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and

下转第69页→

## 智能超表面 辅助通信感知一体化



### **RIS-Assisted Integrated Sensing and Communications**

夏方昊/XIA Fanghao,王新奕/WANG Xinyi, 郑重/ZHENG Zhong

(北京理工大学通信技术研究所,中国北京100081) (Research Institute of Communication Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China) DOI:10.12142/ZTETJ.202203010 网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220620.1552.008.html 网络出版曰期: 2022-06-21 收稿曰期: 2022-06-07

摘要:对智能超表面(RIS)辅助通信感知一体化(ISAC)技术的概念、发展历程、应用场景和研究现状等方面进行了系统性介绍。认为当前 ISAC技术在波束设计、资源调度及通信安全等方面被动地受到无线电磁环境约束。而RIS技术可以通过主动重构无线信道特征,引入额外空间 自由度突破传统通信感知系统的能力,有效提升ISAC系统的多种性能指标,包括提升通信速率、消除用户间干扰、权衡感知与通信性能、增强 通信安全等,给未来智慧交通、智慧工厂和无人机网络等垂直行业应用提供了高精度、广覆盖的通信感知功能。

关键词: ISAC; RIS; 干扰消除; 通信安全

Abstract: Through the systematic introduction of the concept, development, application scenarios, and state-of-the-art of the reconfigurable intelligent surface (RIS) assisted integrated sensing and communications (ISAC), it is believed that the performance of the current ISAC is passively constrained by the wireless electromagnetic environment in beam design, resource scheduling and communication security. By actively reconfiguring the characteristics of wireless channels, RIS introduces an additional spatial degree of freedom to improve the capabilities of the traditional sensing and communications, which enhances multiple performance metrics of ISAC systems, including the communication rate, interference cancellation, trade-off between radar and communication, and communication security. Such improvements provide high-precision sensing and broad-coverage communication for future vertical use cases, such as intelligent transportation, smart factory, and unmanned aerial vehicle networks.

Keywords: ISAC; RIS; interference cancellation; communication security

近着5G时代的到来,无线通信设备数量呈爆炸式增长, 通信产业对无线频谱的需求日益迫切。为了解决频谱 资源稀缺的问题,我们需要探索未来通信系统与其他电子设 备在同一频段下共存的可行性,因此通信感知一体化技术应 运而生<sup>11]</sup>。一方面,无线通信频段向毫米波、太赫兹及可见 光等更高频段发展,将与传统感知频段产生越来越多的重 叠;另一方面,无线通信与无线感知在系统设计、信号处理与 数据处理等方面呈现出越来越多的相似性。因此,利用同一 套设备或共享部分设备器件实现通信与感知,可以降低设备 成本,减少体积与功耗,是未来发展的必然趋势<sup>[2]</sup>。

多输入多输出(MIMO)系统利用其空间自由度进行发 射波束赋形设计,可显著提高通信与感知性能,但在信号传 播环境较差时仍存在较为严重的性能恶化。此时,使用智能 超表面(RIS)技术可以提升系统性能。

RIS是由大量可重构反射元件组成的二维超表面<sup>[3]</sup>,这

些反射元件可以独立调节入射信号的相移、幅值、频率与极 化方式,建立有利的发射机与接收机之间的视距链路,从而 有效扩大感知覆盖范围,提高通信传输质量,增强通信安全 性等。此外,RIS可以提供额外的空间自由度来解决信道衰 落问题。因此,RIS被认为是实现6G网络智能无线电环境的 关键使能技术,受到业界的广泛关注。

#### 1 通信感知一体化技术的发展与挑战

在未来的6G系统中,使用更高频带、更大带宽与密集 分布的大规模天线阵列是必然发展趋势<sup>[4]</sup>。集成通信与感知 功能,不仅可以降低硬件成本,节约频谱资源,还可有效避 免通信系统与感知系统分离所带来的工作效率低、频带利用 率低、能量分割性能下降等问题<sup>[5]</sup>。一方面,通信感知一体 化系统可以利用通信信号的传输、反射及散射,协作感知目 标环境,并凭借其通信能力汇聚感知信息,拓展感知的维度 与深度;另一方面,系统可利用感知功能获得的高精度定 位、成像与环境重建能力,实现更精确的波束赋形、更快的 波束失效恢复与更低的导频开销,进一步提升通信性能。

#### 1.1 通信感知一体化发展历程及目标

根据通信模块与感知模块间联系的紧密程度与协作关系,通信感知一体化技术发展主要可以分为"业务共存、能力互助、网络共惠"3个阶段<sup>[6]</sup>。

(1) 业务共存

业务共存是通信感知一体化技术发展的起始阶段。在此 阶段,通信系统与感知系统实现硬件上的共用,并可通过时 分或频分的方式来提升硬件利用率,减小系统体积,降低成 本。但业务共存阶段的通信感知一体化系统,其通信波形与 感知波形不同,通信与感知信号接收算法不统一,通信模块 与感知模块之间仍存在相互干扰,并且由时分或频分导致的 无线资源利用率低的问题也无法得到解决。因此,此阶段的 研究重点是抑制通信与感知的互干扰,提升频谱效率。此阶 段的研究主要以提升某一项功能为目标,同时尽可能保留另 一项功能。在更极端的情况下,当通信能力与感知能力在资 源分配与干扰等问题上冲突时,可以保留所需的功能,完全 抛弃另一项功能。即使不考虑通信与感知之间的相互辅助, 也要避免因一体化而带来的负面影响。

(2) 能力互助

相较于业务共存阶段,在能力互助阶段,系统对通信与 感知能力的协同提升提出了更高的要求。在此阶段中,通信 系统与感知系统不仅实现硬件上的共用,在波形设计、信号 接收与处理等方面也实现了一体化设计。这加深通信与感知 的相互融合,进一步提升通信与感知的信息共享、频谱复用 能力。因此,此阶段的研究重点是一体化波形设计与波束赋 形方案确定。此阶段的研究目标是在感知系统或通信系统保 持最低要求的前提下,辅助提升另一项功能,达到超越通信 感知共存系统的性能。

(3) 网络互惠

在未来6G网络中,卫星、无人机、基站(BS)及终端 (UE)等设备将构成空天地海一体化网络架构,形成多维 度、全方位、多节点的感知与通信网络。网络互惠是通信感 知一体化技术在此场景下的最终发展状态。在能力互助阶 段,在通信感知融合的基础上,我们需要进一步提升一体化 波形的融合设计、系统干扰消除能力,并引入智能物联网全 方位感知与人工智能计算资源,实现感知与通信相互协同提 升。此阶段的研究重点是综合协调优化网络结构、资源管理 与分配、边缘计算融合等技术。此阶段的研究目标是在满足 通信与感知的基本能力要求下,提升整体能力。

#### 1.2 通信感知一体化发展的挑战

目前,通信感知一体化技术已经得到了广泛而充分的重视,并且在部分场景下已经展现了其高集成、低功耗、节约 频谱资源的技术潜力。与此同时,该技术在波形设计、资源 调度、通信安全等方面面临一系列挑战。

(1) 波形设计

对于通信感知一体化波形来说,传统感知系统与通信系 统对发射信号的设计准则存在根本矛盾。感知系统中的发射 信号不携带信息,为确定信号;而通信系统中发射信号携带 信息,受信源影响,为随机信号。设计通信感知统一表征信 号实际上是权衡感知性能与通信性能的过程。感知性能与通 信性能的分析方法不同,性能指标也各不相同,因此无法作 为设计统一表征信号的依据。这就需要在时频域与空域分别 对发射信号进行优化,分析通信功能与感知功能对发射信号 信息承载能力、发射信号波束方向等指标的需求,从而进行 多性能指标智能优化。

(2) 资源动态调度

在广域物联网覆盖的环境下,面对无线网络低功耗的要 求,基站需要针对多目标通信与感知需求,合理进行资源调 度和分配。理论上,基于 MIMO 系统的空间分集能力,基站 可针对性地设计波束。但在通信感知一体化系统中,为兼顾 通信与感知的性能,通信波束设计的自由度会受到限制,并 且在时变环境下,通信目标与感知目标的数量与比例、目标 的优先级会进行动态变化<sup>III</sup>。在面对复杂多变的场景时,采 用单一的波束设计方式存在灵活性不足的问题,这会造成较 大的能量和频谱资源浪费。为提高时变系统下基站与目标的 通信速率和基站对目标的感知精度,我们需要对生成波束的 数量、波束方向及总发射功率进行合理设计。

(3) 通信安全

随着5G技术的普及,一些新兴应用逐渐走入人们的生活,如远程医疗、车联网通信与机密信息传输等,因此确保 通信安全与个人隐私至关重要。传统的网络层加密技术面临 着许多问题,通信感知一体化系统更是存在诸多安全挑战。 一体化信号需要对周围目标进行感知,与此同时信号中也包 含通信的数据。无线信道的广播性与空域的开放性,使得信 号容易被敌方设备窃听。在这种暴露的风险下,即使对通信 数据本身加密,通信链路仍然可以被敌方目标检测,从而增 加了网络受到攻击的风险<sup>图</sup>。传统的通信物理层安全解决方 案往往通过波束和波形设计降低窃听设备的接收信号功率, 而对于通信感知一体化系统来说,此方法将严重降低系统对 攻击节点的感知能力。针对通信感知一体化系统,需要利用 更多其他的通信安全技术来降低通信感知一体化系统的脆弱 性,例如使用安全波束形成、人工噪声设计以及合作安全设 计等方法。

#### 2 RIS 增强通信感知一体化系统的典型应用

在通信感知一体化系统中,感知功能的实现通常要求通 信感知一体化发射机与被感知目标之间存在视距路径。在此 情况下,RIS可以通过对无线环境的重构,建立额外的视距 链路。这为非视距路径下的感知提供解决方案,从而提升感 知区域的覆盖范围,提高感知精度。除此之外,RIS还可以 提升通信性能,提高传输速率,保障通信的可靠性。因此, RIS对通信感知一体化系统的两种功能均可以起到增强的作 用。可以预见,通信感知一体化系统结合同样具有广泛应用 前景的RIS将成为6G时代中关键性的协作新范式。

(1) 智慧交通

如图1所示,未来的智慧交通系统,包括车联网与自动 驾驶,将借助于通信感知一体化系统来实现人、车、路的高 效协同互联。通信与感知在性能上相互促进,因此路边单元 能够实现对车辆位置与速度的准确感知,车辆能够在高精度 地提取周围环境信息的同时,与其他车辆、路边单元、行人 等进行信息的快速交互<sup>[9]</sup>。该场景的典型用例有自动泊车、 道路环境监测控制、动态地图生成等。由于车辆在行驶过程 中容易受到其他车辆建筑物的遮挡,通信与感知的性能都会 受到影响。因此,基于RIS增强的通信感知一体化系统可以 解决非视距传输造成的通信与感知性能损失的问题,重构无



▲图1智能超表面增强ISAC的智慧交通场景

线信号传播环境,保障通信的可靠性,提升通信速率,增强 感知能力,减少覆盖盲区,最终实现全面感知与泛在连接, 满足未来智慧交通系统的需求。

(2) 智慧工厂

未来的智慧工厂呈现出无人化的趋势,海量接入设备与 机器人将协同完成复杂的工业生产任务。其中,每种机器人 负责生产环节的特定部分。只有系统满足超高精度感知与极 低时延通信的要求,才可以实现机器人与机器人、机器人与 设备、设备与设备之间的紧密合作。通信感知一体化系统可 为智慧工厂提供帮助。具体来说,通信感知一体化技术可以 辅助实现定位、成像以及环境地图构建等功能,也可以对信 道状态信息进行感知,这样可以降低信令开销,保障在极低 时延条件下的通信质量。除此之外,可以将感知到的信息上 传至云端,实现联合感知,从而指导机器人或设备执行正确 的决策。RIS可被安装在工厂的墙壁、大型设备的表面,从 而实现对通信感知一体化系统的增强,满足海量设备接入时 对通信的高可靠性与低时延的要求。

(3) 无人机应用

无人机可被视为快捷灵活部署的空中节点,与通信感知 业务结合紧密。通信感知一体化系统可部署在基站端或无人 机平台上,同时实现通信功能与感知功能,从而提高频谱效 率与能量效率。如图2所示,在无人机场景下,RIS增强通 信感知一体化系统的用例分为两类:一类是将RIS安装在无 人机上,通过无人机的感知结果来调整RIS的相位,为热点 地区或覆盖盲区的用户提供从基站端到用户端虚拟的视距通 信链路,实现通信信号的广域覆盖<sup>[10]</sup>;另一类是将RIS安装 在合适的地面建筑上,通过基站端对无人机的感知来调节 RIS的反射系数,从而提高与无人机的通信速率<sup>[11]</sup>。如果无 人机为窃听者,则可以通过调节RIS的反射系数来干扰窃听



▲图2 智能超表面增强通信感知一体化的无人机应用场景

者对有用信号的接收,防止窃听,提升通信安全性能。

#### 3 RIS增强通信感知一体化系统的研究

RIS在提高无线通信的频谱与能量效率方面拥有巨大的 潜力。RIS可以通过提供更好的感知覆盖来提高感知精度与 分辨率,提升通信感知一体化系统性能。RIS与通信感知一 体化系统的结合也带来了相应的问题。例如,RIS辅助的通 信感知一体化系统可能引入新的信号干扰。当许多RIS分布 式部署时,由于与RIS相关的网络信息有着被动的性质,因 此仅有部分可用。在波束设计方面,需要同时考虑通信与感 知两方面的性能,因此也面临难题。RIS缺乏信号处理能 力,即使以大量的导频为代价,也难以精准获得与RIS相关 的信道状态信息。为应对上述挑战,学术界在如下几个方面 展开了研究。

#### 3.1 联合波束赋形设计与 RIS 反射系数优化

MIMO系统的发射波束赋形设计可以提高通信与雷达感知性能。通过调整反射系数,RIS可以智能创建良好的传播环境,从而进一步提升性能。基站波束设计与RIS反射系数的优化并不是独立的:波束设计需要考虑RIS引入额外的空间自由度,同时RIS反射系数也需要以实际基站发射波束为依据进行优化。通过对一体化波形与RIS反射系数进行联合优化,可实现增益。

(1) 提升通信速率

RIS辅助的通信感知一体化系统需要同时完成目标感知 任务和与用户通信任务。考虑到通信与感知的性能权衡,我 们通常以RIS辅助目标检测感知为基本要求,最大化基站与 用户之间的通信速率<sup>[12]</sup>。文献[13]考虑了多天线基站同时向 多用户发送数据的情况,以最小雷达目标信噪比与最大功率 等条件为约束,并以最大化通信和速率为目标,优化发射波 束与RIS反射系数。为了解决由此产生的非凸优化问题,可 以采用分式规划(FP)、最大最小化(MM)等方法将其转 化为若干易于处理的子问题,并进行迭代求解。

(2) 消除用户间干扰

将通信感知一体化系统与RIS技术相结合,可以发挥 RIS在缓解多用户干扰方面的潜力,提高通信性能,并更好 地平衡感知性能与通信性能。文献[14]首先在探测波束图样 严格受限的情况下,通过联合设计发射波形与RIS相移矩 阵,降低系统多用户干扰。随后,文献[14]进一步探索探测 波束图样吻合度与多用户干扰抑制之间的均衡设计。研究表 明,引入RIS可以有效地降低通信感知一体化系统中存在的 多用户干扰,从而显著提高系统吞吐量。此外,RIS还可以 平衡雷达与通信性能,使得发射波形与理想发射波束图更好 地匹配。

#### 3.2 RIS单元模式切换

在通信感知一体化系统中,通信功能与感知功能高度集成。在共用设备硬件、波束联合设计的基础上,通信功能与 感知功能不再有明显区分。通信感知一体化系统可以节省硬 件成本以及频谱资源。但当通信需求与感知需求发生动态变 化时,系统资源动态调度的灵活性相对不足。通过引入 RIS,通信感知一体化系统可以实现通信波束与感知波束的 分离,从而使系统更好地服务通信目标与感知目标。进一步 地,系统可以通过对RIS单元的模式进行切换,来实现感知 与通信性能的动态权衡。

文献[15]考虑一体化系统存在两种工作模式: 探测模式 与定位模式。如图3所示,系统自适应地根据RIS单元的通 信模式与感知模式进行切换。在探测模式下,为了检测目标 是否存在,系统利用宽波束进行扫描。在这种情况下,使有 少量RIS单元用于感知,其余RIS单元用于与UE通信。在定 位模式中,系统先使用宽波束进行目标的模糊感知,再使用 大量RIS单元,利用窄波束精确定位目标。通过RIS单元模 式的灵活选择,可以实现定位精度与通信频谱效率间的性能 权衡。

#### 3.3 隐蔽通信方案设计

传统的数据加密方法无法解决通信感知一体化系统中的 所有安全问题。即使消息是加密的,由于空域开放性,通信 数据与个人隐私信息仍有被泄露的风险。面对这一问题,隐



▲图3 RIS辅助探测/定位

蔽通信可以实现通信双方的隐藏信息传输,防止通信信号被 恶意窃听者发现(即信号隐蔽)。窃听者无法确认信号的存 在,则难以实施进一步的窃听行为。通过将隐蔽通信引入通 信感知一体化系统,文献[9]设计联合感知与隐蔽通信系统, 实现了高频谱利用率与敏感数据安全传输。通过引入RIS对 信号的传播环境进行智能重构,通信感知一体化系统可以深 度融合并进一步增强隐蔽通信。具体而言,设计者可以基于 博弈论设计目标感知与隐蔽信号传输的收发机优化方案,对 发射功率、RIS单元数目以及反射系数进行联合优化,以实 现低成本、高效能隐蔽通信。

#### 4 结束语

本文主要从基本概念、应用场景、研究现状、关键技术 等方面对 RIS 辅助的通信感知一体化系统进行了详细介绍。 RIS 具有低成本、低复杂度及易部署的特点,通信感知一体 化融合感知与通信能力,使通信与感知互相协作、相辅相 成。面对 B5G 乃至 6G 所带来的诸多挑战,这两项革新技术 的结合给未来研究带来了全新的方向。值得注意的是,在当 前阶段,这两项新技术仍然面临着评估指标不完善、算法不 成熟以及安全性差等问题。如何将这两项技术与现有通信网 络与感知网络兼容,提升其性能鲁棒性、场景普适性,推进 相关技术尽快落地,是未来研究的重中之重。

#### 参考文献

- [1] 中国通信协会. 通感算一体化网络前沿报告 [R]. 2022
- [2] LIU F, MASOUROS C, PETROPULU A P, et al. Joint radar and communication design: applications, state-of-the-art, and the road ahead [J]. IEEE transactions on communications, 2020, 68(6): 3834 - 3862. DOI: 10.1109/TCOMM.2020.2973976
- [3] LIU R, LI M, LIU Y, et al. Joint transmit waveform and passive beamforming design for RIS-aided DFRC systems [EB/OL]. (2022-05-05)[2022-06-04]. https://ieeexplore.ieee.org/document/9769997
- [4] LIU F, CUI Y H, MASOUROS C, et al. Integrated sensing and communications: toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1728–1767. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632
- [5] PIN TAN D K, HE J, LI Y C, et al. Integrated sensing and communication in 6G: motivations, use cases, requirements, challenges and future directions [C]//Proceedings of 2021 1st IEEE International Online Symposium on Joint Communications & Sensing. IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/ JCS52304.2021.9376324
- [6] IMT-2030(6G)推进组.通信感知一体化技术研究报告 [R]. 2021
- [7] YANG H, WEI Z Q, FENG Z Y, et al. Queue-aware dynamic resource allocation for the joint communication-radar system [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(1): 754–767. DOI: 10.1109/ TVT.2020.3042551
- [8] HILLI A A, PETROPULU A, PSOUNIS K. MIMO radar privacy protection through gradient enforcement in shared spectrum scenarios [C]// Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum

Access Networks (DySPAN). IEEE, 2019: 1–5. DOI: 10.1109/ DySPAN.2019.8935749

- [9] DU H Y, KANG J W, NIYATO T D, et al. Reconfigurable intelligent surfaceaided joint radar and covert communications: fundamentals, optimization, and challenges [EB/OL]. (2022–05–05) [2022–06–06]. https://ieeexplore. ieee.org/document/9768334
- [10] CHEN Z, MA X Y, HAN C, et al. Towards intelligent reflecting surface empowered 6G terahertz communications: a survey [J]. China communications, 2021, 18(5): 93–119. DOI: 10.23919/JCC.2021.05.007
- [11] GONG S M, LU X, HOANG D T, et al. Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: a contemporary survey [J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2020, 22(4): 2283–2314. DOI: 10.1109/COMST.2020.3004197
- [12] HE Y H, CAI Y L, MAO H, et al. RIS-assisted communication radar coexistence: joint beamforming design and analysis [EB/OL]. (2022–03– 08)[2022–06–01]. https://ieeexplore.ieee.org/document/9729741
- [13] LIU R, LI M, SWINDLEHURST A L. Joint beamforming and reflection design for RIS-assisted ISAC systems [EB/OL]. [2022-06-06] https:// arxiv.org/abs/2203.00265
- [14] WANG X, FEI Z, ZHENG Z, et al. Joint waveform design and passive beamforming for RIS-assisted dual-functional radar-communication system [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(5):5131– 5136
- [15] PRASOBH SANKAR R S, DEEPAK B, CHEPURI S P. Joint communication and radar sensing with reconfigurable intelligent surfaces [J]. 2021 IEEE 22nd international workshop on signal processing advances in wireless communications (SPAWC), 2021: 471–475. DOI: 10.1109/ SPAWC51858.2021.9593143

#### 作者简介



**夏方昊**,北京理工大学信息与电子学院在读硕士 研究生;主要研究领域为通信感知一体化技术、 智能反射表面技术与物理层通信技术;参与国家 自然基金重点项目、北京市科技计划等多个项目 的研究。



王新奕,北京理工大学信息与电子学院在读博士 研究生;主要研究领域为通信感知一体化技术与 智能反射表面;参与国家自然基金重点项目、面 上项目及国家重点研发计划等多项国家项目的研 究,获2019年WOCC国际会议最佳论文奖;已 发表论文20余篇。



郑重,北京理工大学信息与电子学院特别研究员、博士生导师;主要研究领域为多天线通信技术、智能反射表面和随机矩阵理论;主持和参加多项国家自然科学基金、北京市自然基金和科技部重点研发项目;已发表论文40余篇。

## 智能超表面辅助车载边缘计算



### Reconfigurable Intelligent Surface–Enabled Vehicular Edge Computing

#### 刘文帅/LIU Wenshuai<sup>1</sup>, 李斌/LI Bin<sup>1,2</sup>

(1. 南京信息工程大学,中国南京 210044;

2. 网络与交换技术国家重点实验室(北京邮电大学),中国 北京 100876)
 (1. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
 2. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology (Beijing

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

DOI:10.12142/ZTETJ.202203011 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220616.1615.002.html 网络出版日期: 2022-06-17 收稿日期: 2022-05-18

摘要:车载边缘计算(VEC)是融合车联网与移动边缘计算的一种全新范式。针对障碍物遮挡对车联网中路边单元(RSU)服务性能的影响, 提出一种智能超表面(RIS)辅助的VEC部分任务卸载方案。首先,综合分析车辆移动性对系统的影响;其次,联合优化发射功率、卸载比例和 时段划分,旨在建立一个车辆最小平均速率最大化问题;最后,采用一种基于近端策略优化(PPO)的深度强化学习(DRL)方法求解该优化 问题。仿真结果表明,相比于随机时段划分策略,所提算法的最小平均速率和卸载比例分别提升了61.9%和46.8%。

关键词: RIS; 车载边缘计算; 深度强化学习; 任务卸载

Abstract: Vehicular edge computing (VEC) is a new paradigm of integrating the Internet of vehicles and mobile edge computing. To compensate the influence of obstacle occlusion on the service performance of road side units (RSUs) in the Internet of vehicles, a partial offloading scheme based on reconfigurable intelligent surface (RIS) is proposed. First, the mobility of vehicles is considered. Then, the minimum average-rate maximization of the vehicles is formulated. Finally, the proposed optimization problem is solved by proximal policy optimization (PPO) driven deep reinforcement learning (DRL) method. Simulation results show that the proposed algorithm improves the minimum average rate and offloading ratio by 61.9% and 46.8%, compared with the random time division strategy.

Keywords: RIS; vehicular edge computing; deep reinforcement learning; task offloading

▲ 前无线通信技术面临能耗高、覆盖低、无线信道不可控等问题,严重影响了通信服务质量。作为未来 6G的一项空口技术,智能超表面(RIS)得到了广泛关注<sup>[1-2]</sup>。RIS由一组无源反射元件构成,可通过编程来实时调控各个反射单元,进而控制入射信道的幅值和相位,在功耗和部署成本上具有优势<sup>[3]</sup>。RIS辅助通信的关键是使用超表面来改变无线传播环境,从而减轻多径衰落和视距阻塞的负面影响。

车载通信是智能交通系统不可或缺的组成部分,它允许 汽车与周围环境以及远程实体保持联系,并为车辆提供随时 随地的连接服务<sup>[4]</sup>。由于传播环境复杂,车辆与路边单元 (RSU)之间建立的传播链路质量很容易恶化<sup>[5-6]</sup>。在障碍物 遮挡的RSU服务暗区,利用RIS技术为行驶的车辆能够提供 间接的视距传输链路,将有望为高能效车载通信提供重要的 手段支撑。为了提高车载通信的连通性,文献[7]提出了一

基金项目: 国家自然科学基金(62101277); 江苏省自然科学基金 (BK20200822); 江苏省高校自然科学基金面上项目(20KJB510036); 网络与 交换技术国家重点实验室(北京邮电大学)开放课题资助项目(SKLNST-2021-1-14) 种面向高频段的 RIS 辅助架构,并综合考虑 RIS 的规模和运 行模式,研究了 RIS 的最优部署问题。文献[8]提出了一种异 构车联网,并使用联邦 Q 学习最小化网络开销。文献[9]研 究了毫米波车联网上行链路速率最大化问题,借助 RIS 技术 提高上行链路性能。文献[10]研究了离散相移约束下的上行 链路速率加权和最大化问题,并分别为单用户和多用户场景 提供解决方案。文献[11]提出了一个多 RIS 辅助的多车多天 线通信系统,通过交替迭代算法优化发射机的波束成形矢量 和每个 RIS 的相移,使车载通信服务质量达到最高。文献 [12]研究了 RIS 辅助车联网的频谱共享问题,即多个车到车 链路可以复用已被车到基础设施链路占用的频谱,使用中断 概率作为评估车载通信可靠性的性能指标。

由于网络环境高度动态变化,使用RIS辅助车联网仍面临着诸多挑战<sup>[13-14]</sup>。(1) RIS 与车辆之间距离的变化会影响 实时信道状态,同时车辆在区域内的滞留时间不同,这些均 使得RSU在优化通信质量的同时,还需要考虑车辆的移动 性;(2)在获取相同服务资源的情况下,滞留时间较长的车 辆的服务质量会有所下降,因此为尽可能保障服务的公平 性,该网络场景下的通信资源需要进行合理分配。未来的状态信息通常难以预知,RSU需要与车辆不断交换各种状态信息,根据即时状态信息进行在线决策。基于深度强化学习(DRL)的方法可以根据当前的环境状态进行决策,对环境的先验信息要求较低。文献[14]考虑到物联网设备能量与计算能力双重受限问题,提出了一种RIS辅助的无线供能移动边缘网络方案,利用双深度Q网络方法联合优化无线传能时隙分配、RIS相移和卸载决策,从而提升能量转移效率和通信效率。考虑到实际的RIS相移,文献[15]研究了联合车辆调度和RIS无源波束成形优化问题,通过深度强化学习和块坐标下降法使暗区车辆的最小可实现比特率达到最大。然而,这些工作对于车载边缘计算(VEC)中RIS辅助通信的研究尚不深入。

随着5G时代人工智能的不断发展,各种时延敏感性、计 算密集型的交通应用和服务不断涌现<sup>16</sup>,这给资源有限的设备 带来极大挑战。车辆自身的计算处理能力往往不强,难以实现 实时高效的数据处理。VEC作为一种新范式将车联网与移动边 缘计算两者融合,从而解决车辆自身计算能力受限问题<sup>17-18</sup>。 相较于传统移动边缘计算,VEC能为智能交通系统提供更方便 的服务,更适用于路边智能基础设施与移动性较强的车辆终 端,旨在为海量的交通应用提供随时随地的连接。在这种场景 下,更多的系统参数使传输方案的设计变得更难,部署RIS能 否带来性能增益还有待研究。基于以上考虑,本文提出了一种 基于近端策略优化(PPO)的计算卸载在线优化算法。

#### 1系统模型

RIS辅助VEC的系统模型如图1所示。在单向直行公路 场景中,车辆经过半径为r的覆盖暗区,借助RIS与RSU通 信。RIS由M个反射单元组成,是均匀线性阵列。RSU会配 备一个移动边缘计算(MEC)服务器。定义车辆、RIS反射 单元的集合为 $\forall k \in \mathcal{K} \triangleq \{1,2,\dots,K\}, \forall m \in \mathcal{M} \triangleq \{1,2,\dots,M\},$ 假设道路为x轴,车辆沿正方向行驶,车辆平均速度为 $v_k$ 。 对于车辆k,可用计算资源记为 $f_k$ 。将服务周期T等分为N个 时隙,则每个时隙的长度为 $\delta_t$ 。定义时隙集合为  $\forall n \in \mathcal{N} \triangleq \{1,2,\dots,N\},$ 时隙n内车辆位置为 $(x_k[n],y_k[n]),$ 车辆在暗区第1个时隙内产生数据量为 $L_k$ 的计算任务,车辆 保持在暗区内的时间可以计算为 $T_k = (\sqrt{r^2 - y_k[n]^2} - x_k[n])/v_k$ ,在 $T_k$ 内车辆需将计算任务处理完成。

#### 1.1 计算模型

所有车辆都采用部分卸载模式,即车辆 k 任务可分为两

部分:一部分任务 $\rho_k L_k$ 在本地处理,剩余任务 $(1 - \rho_k)L_k$ 卸 载到RSU上的MEC服务器计算。通常MEC服务器有强大的 计算能力,并且计算结果的数据量往往较小,因此本文忽略 了MEC服务器的计算时延和结果回传给车辆的时延。将任 一时隙划分为U个子时隙,假设每个时隙内车辆的位置保持 不变;将U个子时隙分为K个时段,每个时段内仅允许一个 车辆传输任务。时段k占时隙长度的比例为 $\alpha_k[n], \alpha_k[n]$ 也 被称为时段划分因子,且满足 $\sum_{k=1}^{K} \alpha_k[n] \leq 1$ 。

#### 1.2 通信模型

由于车辆与RSU之间有障碍物遮挡并且相隔距离很远, 因此它们之间无法建立直传链路。RSU可对高处的RIS反射 单元相移进行实时控制,在每个时段RIS可根据RSU的控制 信号来调整反射单元相移,以帮助车辆与RSU建立视距传 输 关 系 。 定 义 RIS 与 RSU 之 间 的 距 离 为  $d_{RS} = \sqrt{(x_R - x_S)^2 + (y_R - y_S)^2 + H_R^2}$ ,在时隙 n 内,车辆 k 与 RIS之 间的距离为 $d_{kR}[n] = \sqrt{(x_k - x_R)^2 + (y_k - y_R)^2 + H_R^2}$ ,则车辆 k-RIS链路和RIS-RSU链路之间的信道增益 $h_{kR}$ 和 $h_{RS}$ 可分别 表示为:

$$\boldsymbol{h}_{k,\mathrm{R}}[n] = \sqrt{\frac{K_1}{K_1 + 1}} \, \bar{\boldsymbol{h}}_{k,\mathrm{R}}[n] \sqrt{\gamma_0 d_{k,\mathrm{R}}^{-2}[n]}, \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{h}_{\rm R,S} = \sqrt{\frac{K_2}{K_2 + 1}} \, \bar{\boldsymbol{h}}_{k,\rm R} \sqrt{\gamma_0 d_{\rm R,S}^{-2}}, \qquad (2)$$

其中, $\gamma_0$ 是距离为1m时的信道功率增益。考虑到两条链路 均为视距路径,采用莱斯信道建模, $K_1$ 和 $K_2$ 为莱斯因子,



▲图1 RIS辅助车载边缘计算系统模型

$$\bar{\boldsymbol{h}}_{k,\mathrm{R}} \, \boldsymbol{\pi} \, \bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{R,S}} \, \boldsymbol{\Pi} \, \boldsymbol{\mathcal{H}}_{\mathrm{R,S}} \, \boldsymbol{\Pi} \, \boldsymbol{\mathcal{H}}_{\mathrm{R,S}} \, \boldsymbol{\Pi} \, \boldsymbol{\mathcal{H}}_{\mathrm{R,S}} \, \boldsymbol{\Pi} \, \boldsymbol{\mathcal{H}}_{\lambda,\mathrm{R}}[n] = \left[ 1, \mathrm{e}^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d\hat{\boldsymbol{\varphi}}_{k,\mathrm{S}}[n]}, \cdots, \mathrm{e}^{-j\frac{2\pi}{\lambda} d(M-1)\hat{\boldsymbol{\varphi}}_{k,\mathrm{S}}[n]} \right]^{\mathrm{T}}, \qquad (3)$$

$$\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{R,S}} = \left[ 1, \mathrm{e}^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d\hat{\omega}_2}, \cdots, \mathrm{e}^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d(M-1)\hat{\omega}_M} \right], \tag{4}$$

其中, d为反射元件间距,  $\hat{\varphi}_{k,m}[n] = \frac{x_{R} - x_{k}}{d_{k,R}[n]}$ 和 $\hat{\omega}_{m} = \frac{x_{S} - x_{R}}{d_{R,S}}$ 分别表示时隙 n内车辆 k-RIS 链路和 RIS-RSU 信号到达角的 余弦。为方便讨论,本文假设信道状态信息已知。令  $\varphi_{k,m}[n] = -\frac{2\pi}{\lambda}d(m-1)\hat{\varphi}_{k,m}[n], \omega_{m} = -\frac{2\pi}{\lambda}d(m-1)\hat{\omega}_{m}, 考$ 虑车辆卸载传输采用时分多址协议,由式 (1)—(4)可 知,时隙 n内 RSU接收信号的信噪比为:

$$\Upsilon_{k}[n] = \frac{p_{k}[n] \left| \boldsymbol{h}_{k,\mathrm{R}}^{\mathrm{H}}[n] \boldsymbol{\Phi}_{k,m}[n] \boldsymbol{h}_{\mathrm{R,S}} \right|^{2}}{\boldsymbol{\sigma}^{2}}, \qquad (5)$$

其中,  $p_k[n]$ 为车辆的传输功率,  $\sigma^2$ 为信道中的高斯噪声功率,  $\Phi_{km}[n] \triangleq \operatorname{diag}\left(e^{i\phi_k[n]}\right) \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 。此时, 车辆-RIS-RSU链路的总信道增益可以表示为:

$$\frac{\boldsymbol{h}_{k,\mathrm{R}}^{H}[n]\boldsymbol{\Phi}_{k,m}[n]\boldsymbol{h}_{\mathrm{R,S}}}{\gamma_{0}\sum_{m=1}^{M}\left|\left[\boldsymbol{h}_{\mathrm{R,S}}\right]_{m}\right\|\left[\boldsymbol{h}_{k,\mathrm{R}}[n]\right]_{m}\left|e^{j\left(\phi_{k,m}[n]+\varphi_{k,m}[n]+\omega_{m}\right)}\right.}{d_{k,\mathrm{R}}[n]d_{\mathrm{R,S}}[n]}\right|_{0}$$
(6)

由式(6)可知,当RSU的接收信号信噪比最大时,即:

$$\phi_{k,m}[n] = -(\varphi_{k,m}[n] + \omega_m)_{\circ}$$
<sup>(7)</sup>

依据香农公式,时隙n内车辆k的平均卸载速率为:

$$R_{k}[n] = \alpha_{k}[n]B\log_{2}(1+\Upsilon_{k}[n])_{\circ}$$
(8)

车辆k通过RSU覆盖暗区的平均卸载速率可以表示为:

$$\bar{R}_{k} = \sum_{n=1}^{\left[T_{k}, \delta_{i}\right]} R_{k} [n]_{\circ}$$
(9)

为简化问题,本文对任一车辆经过暗区所需的时隙数进 行上取整操作。

#### 1.3 问题描述

本文面向系统中车辆的服务公平性,通过联合设计时段 分配因子、任务卸载比例、RIS相移使所有车辆的最小卸载 速率达到最高,因此优化问题可表述为:

$$\max_{\mathbf{x}, \Psi, p, \rho} \min_{k} \bar{R}_{k}$$
s.t. C1:  $\left| e^{j\phi_{k, n}[n]} \right| = 1, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N}, m \in \mathcal{M}$ 
C2:  $\alpha_{k}[n] \in \left\{ 0, \frac{1}{U}, \frac{2}{U}, \cdots, \frac{U-1}{U}, 1 \right\}, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N}$ 
C3:  $\sum_{k=1}^{K} \alpha_{k}[n] \leq 1, \forall n \in \mathcal{N}$ 
C4:  $0 \leq \rho_{k} \leq 1, \forall k \in \mathcal{K}$ 
C5:  $\bar{R}_{k}T_{k} \geq (1-\rho_{k})L_{k}, \forall k \in \mathcal{K}$ 
C6:  $\frac{\rho_{k}L_{k}C_{k}}{f_{k}} \leq T_{k}, \forall k \in \mathcal{K}$ 
C7:  $0 \leq p_{k}[n] \leq p_{\max}, \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N}_{o}$ 
(10)

其中,  $\alpha = \{\alpha_k[n], \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N}\}, \Psi = \{\phi_m[n], \forall m \in \mathcal{M}, n \in \mathcal{N}\}, p = \{p_k[n], \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N}\}, \rho = \{\rho_k, \forall k \in \mathcal{K}\}$ 。约束C1表示RIS相移的恒模约束,约束C2用于限制时段划分因子取值,约束C3用于保证时段划分因子之和不超过1,约束C4用于限制本地计算比例,约束C5和C6表示在通过暗区时间 $T_k$ 内车辆k需处理完所有任务,约束C7表示传输功率限制。

#### 2 基于PPO的时段划分与卸载算法

问题(10)是一个多变量高度耦合且存在整型变量 NPhard 的问题,求解该问题具有很大挑战性。系统中多数状态 信息需要在每个时隙内完成即时交换,而现有的凸优化理论 设计复杂度高,难以保证决策的实时性。本节提出基于 PPO 的深度强化学习算法以用于寻求时段划分因子,在给定时段 划分决策下,基于凸优化方法处理传输功率与卸载比例。

#### 2.1 RIS相移优化

根据公式(7)和公式(8),可得出RIS最优相移 $\Psi$ 为:  $\phi_{k,m}[n] = -(\varphi_{k,m}[n] + \omega_m[n]), \forall n \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K}, m \in \mathcal{M}_{\circ}(11)$ 

#### 2.2 传输功率与卸载比例优化

给定时段划分策略α和RIS相移Ψ,则式(10)可写为:

$$\max_{p,p} \min_{k} R_{k}$$
s.t. C4:  $0 \leq \rho_{k} \leq 1$ ,  $\forall k \in \mathcal{K}$   
C5:  $\overline{R}_{k}T_{k} \geq (1 - \rho_{k})L_{k}$ ,  $\forall k \in \mathcal{K}$   
C6:  $\frac{\rho_{k}L_{k}C_{k}}{f_{k}} \leq T_{k}$ ,  $\forall k \in \mathcal{K}$   
C7:  $0 \leq \rho_{k}[n] \leq \rho_{\max}$ ,  $\forall k \in \mathcal{K}$ ,  $n \in \mathcal{N}_{\circ}$  (12)

热点专题

上述问题是关于*ρ*和*p*的凸优化问题,可以借助凸优化 软件(例如CVX)进行求解。

#### 2.3 基于PPO的时段划分策略

给定Ψ、ρ和p时,式(10)可描述为:

 $\max_{k} \min_{k} \bar{R}_{k}$ 

s.t. C2: 
$$\alpha_k[n] \in \left\{0, \frac{1}{U}, \frac{2}{U}, \cdots, \frac{U-1}{U}, 1\right\}, \ \forall k \in \mathcal{K}, n \in \mathcal{N}$$
  
C3:  $\sum_{k=1}^{K} \alpha_k[n] \leq 1, \ \forall n \in \mathcal{N}_{\circ}$ 

$$(13)$$

该问题是一个整数优化问题,寻找时段划分策略α的最 优解较为困难。本章节提出基于PPO的时段分配在线优化方 案,首先介绍DRL中马尔科夫决策过程(MDP)的基本要 素,然后阐述基于PPO的时段划分方法。

#### 2.3.1 MDP基本要素定义

在本文场景中,RSU不需要任何关于环境的先验信息, 环境状态转移概率未知,且状态信息需要即时获取,可建模 为无模型、无转移概率的MDP。具体而言,在某个时间步t, 环境处于状态s(t),代理执行动作a(t),环境转移到可行的 后继状态s(t+1),代理接收奖励r(t),随后t增加1。代理通 过观察s(t+1)与r(t+1)来调整自身策略,不断训练使得累 积奖励达到最大。将一个时隙作为一个时间步,下面对状态 空间、动作空间和奖励函数进行分别定义。

(1) 状态空间定义:

$$S(t) = \left\{ s(t)|s(t) = \left\{ L(t), \boldsymbol{d}_{\mathrm{R}}(t), \boldsymbol{f}(t) \right\} \right\},$$
(14)

其中,  $L(t) = [L_1(t), \dots, L_K(t)]^T$ ,  $d_R(t) = [d_{1,R}(t), \dots, d_{K,R}(t)]^T$ ,  $f(t) = [f_1(t), \dots, f_K(t)]^T$ 。

(2) 动作空间定义:

$$A(t) = \{a(t)|a(t) = \boldsymbol{\alpha}[n], \forall n \in \mathcal{N}\},$$
(15)

其中,  $\alpha[n] = [\alpha_1[n], \dots, \alpha_k[n]]^T$ , 表示时间步*t*对应时隙*n* 的时段划分因子向量。为便于处理,设置子时隙数*U*为较大 的整数值,同时可近似地将 $\alpha_k[n]$ 作为连续变量处理。

(3) 奖励函数定义:

$$r(t) = \begin{cases} \min_{k} \bar{R}_{k} - P_{1}\lambda - P_{2}\mu, & \text{if } n \mod \varepsilon = 0\\ \min_{k} R_{k}[n], & \text{otherwise} \end{cases},$$
(16)

 $R_kT_k, 0$ ,  $P_1$ 和 $P_2$ 为惩罚因子,构成对不满足任务处理约束的惩罚。

#### 2.3.2 基于PPO的时段划分算法

考虑新动作策略和旧动作策略之间的关系,PPO方法设 置了一种新的目标函数,将动作值稳定在近端范围内,使新 动作策略的更新可以参照旧动作策略。该方法不仅具有动态 决策的优势,还可以快速确定模型的正确优化方向。动作网 络根据状态输出动作,与环境交互;评价网络根据状态计算 状态价值,估计动作的优劣。

设新、旧动作网络的参数分别为 $\theta$ 和 $\theta_{\text{old}}$ ,评价网络的参数为 $\xi$ ,定义每个时间步t的优势函数为:

$$\hat{A}(t) = \sum_{i=0}^{\Gamma-t^{-1}} (\gamma \lambda)^i \hat{\delta}(t+i), \qquad (17)$$

其中,  $\gamma$ 为折扣因子,  $0 \le \lambda \le 1$ 是一个广义优势估计 (GAE)系数,  $\hat{\delta}(t) = r(t) + \gamma \cdot v(t+1) - v(t)_{\circ}$ 

动作网络θ的目标函数使用如下形式:

$$L^{\text{CLIP}}(s(t), a(t); \theta) = \mathbb{E}\left[\min\left(\frac{\pi_{\theta}(a(t)|s(t))}{\pi_{\theta_{\text{ads}}}(a(t)|s(t))}\hat{A}(t), \\ \operatorname{clip}\left(\frac{\pi_{\theta}(a(t)|s(t))}{\pi_{\theta_{\text{ads}}}(a(t)|s(t))}, 1 + \epsilon, 1 - \epsilon\right)\right)\hat{A}(t)\right], \quad (18)$$

其中,  $\epsilon$ 是用于控制截断范围的限制参数,其值较小,决定 新旧策略之间的差异。目标函数(18)使用剪切概率比,可 降低训练难度,被认为是一种优秀的方法。在训练过程中, PPO算法将状态s(t)输入新动作网络,并输出相应动作a(t)后,从环境中得到奖励r(t)与下一状态s(t+1),此时向回 放记忆单元中存入一个完整的经验(s(t),a(t),r(t),s(t+1)), 随后将s(t+1)输入到新动作网络,直到经验池满。RSU通 过与环境交互不断地更新动作网络 $\theta$ 与评价网络 $\xi$ ,优化自 身策略逐渐使奖励值与目标函数达到最大。总的来说,基于 PPO的任务卸载算法如下:

#### 算法1. 基于PPO的任务卸载算法

输入:最大回合数 $E_p$ ,每回合最大时间步 $S_{max}$ ,学习率lr,限制参数 $\epsilon$ ,GAE参数 $\lambda$ ,评价网络参数 $\xi$ 输出:动作网络参数 $\theta$ 1.初始化动作网络参数 $\theta$ ,评价网络参数 $\omega$  2. FOR episode←1 TO Ep DO 3. 初始化:  $(x_k[1], y_k[1])$ 、 $L_k$ 、 $c_k$ 、RSU高度 $H_s$ 、RIS高度 $H_s$ 4. FOR  $t \leftarrow 1$  TO  $S_{max}$  DO 5. 从环境中获取状态s(t) 6. 使用 $\pi_{\theta}$ 根据状态选择动作s(t)7. 根据a(t),求解 $\rho$ 、p、 $\Psi$ 8. 计算下一状态s(t+1) 9. 根据公式(16)计算奖励r(t) 10. 存储经验(s[t],a[t],r[t],s[t+1]) 11. END FOR 12. FOR  $t \leftarrow 1$  TO  $\Gamma$  DO 13. 计算Â(t) 14. END FOR 15. 更新动作网络 $\theta$ ,更新评价网络 $\xi$ ,更新 $\theta_{ad} \leftarrow \theta$ 16. 清理经验数据 17. END FOR

#### 3 仿真结果与分析

本节在 Python 3.6和 Pytorch 环境下对所提算法进行仿真 验证。假设 RSU 暗区半径为 200 m, 车辆出发于 *x* 轴负半轴 一侧边界, 沿 *x* 轴正方向行驶, 车辆 *y* 坐标随机生成该边界 上的合理值。RIS 部署于 (0, 200, 70) m, RSU 的位置为 (0, 500, 20) m, 服务周期 *T* = 20 s, *U* = 200, 时隙数 *N* = 40, 任务数据量  $L_k \in [10^6, 8 \times 10^6]$  bits, 单位比特平均计算次数  $c_k \in [300, 500]$  cycles/bit, 噪声功率  $\sigma^2 = -110$  dBm,  $K_1 =$  $K_2 = 10$  dB, 信道增益  $\gamma_0 = -30$  dB。PPO 训练参数如表 1 所示。

图2对比了PPO与AC(Actor-Critic)方法在同等学习 率与随机数序列下的奖励值收敛曲线。由图2可知,当回 合数增加到500时,PPO方法呈现收敛。与之对比的AC方 法虽初期奖励值略高,但收敛到的奖励值与PPO有较大差 异。这表明PPO是一种能够快速适应动态环境的DRL 算法。

当系统中车辆数K =10时,图3对比了PPO、AC与随机 分配3种算法下车辆最小速率随RIS元素数变化的情况。可 以看出,随着RIS元素数增加,3种算法的最小速率均提升 显著。其中,本文所提的基于PPO的卸载算法目标值最大, AC算法与之相比有一定差距,且随着RIS元素数变化,这 种差距渐进增加。随机分配方法性能有较大跳跃,并不是一 种适合于实际场景的算法。

图4给出了系统中车辆数对不同方案所得传输速率最小

值的影响。在RIS元素 N =40时,通过所提PPO算法与优势 行动者-评论家(A2C)算法、随机分配策略的性能比较可 以看出,所提PPO算法与A2C算法两者的性能差距较小。 因而,对于A2C这种改进的AC方法,PPO算法也能保持一 定的优势。相比于随机分配算法,所提PPO算法与A2C算 法分别获得了61.9%与48.8%的性能提升。

图5给出了 RIS 元素数量对任务卸载情况的影响。在车辆数*K* =10的情况下,随着 RIS 元素数量的增加,任务卸载比例呈现上升趋势,这说明 RIS 元素数量的增加能够对通信质量产生积极作用,使得系统能够传输更多任务。由图5可知,所提 PPO 算法的任务卸载比例最高,这说明 PPO 对车载终端的服务效果最佳,有助于减小车载终端自身的计算负载。相比于均等分配,本文所提 PPO 算法的卸载比例提升了

#### ▼表1 近端策略优化算法参数

参数	取值
隐藏层数	3
$GAE-\lambda$	0.95
数据重用次数n <sub>r</sub>	8
折扣因子γ	0.9
优化器	Adam
截断比	0.2
每回合最大时间步 $S_{\rm max}$	40
学习率Ir	$4 \times 10^{-5}$
惩罚因子 $P_1$	105
惩罚因子P2	10 <sup>5</sup>

GAE:广义优势估计



▲图2 训练收敛曲线



▲图3 RIS元素数对目标值的影响



▲图4 车辆数量对最小速率的影响

46.8%, A2C算法的卸载比例提升了33.2%。

#### 4 结束语

本文提出了一种 RIS 辅助 VEC 的部分任务卸载方案, 为车辆无法与 RSU 直接通信提供了计算服务,首先分析了 车辆移动性,将时延容忍约束下的最小速率最大化问题建 模为马尔科夫决策过程,其次结合深度强化学习与凸优化 方法,设计了基于 PPO 的时段分配与任务卸载算法。仿真 结果验证了所提方案在计算卸载方面的可行性与优越性, 验证了 RIS 作为中继在改善无线通信环境方面具有显著 作用。



#### 参考文献

- [1] 赵亚军, 菅梦楠. 6G 智能超表面技术应用与挑战 [J]. 无线电通信技术, 2021, 47(6): 679-691. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3114.2021.06.002
- [2] 田辉, 倪万里, 王雯, 等. IRS 辅助的边缘智能系统中基于数据重要性感知的资源分配 [J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(6): 51-58. DOI: 10.13190/j. jbupt.2020-162
- [3] LI Z Y, CHEN M, YANG Z H, et al. Energy efficient reconfigurable intelligent surface enabled mobile edge computing networks with NOMA [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2021, 7(2): 427– 440. DOI: 10.1109/TCCN.2021.3068750
- [4] ZHAO L, YANG K Q, TAN Z Y, et al. Vehicular computation offloading for industrial mobile edge computing [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2021, 17(11): 7871–7881. DOI: 10.1109/TII.2021.3059640
- [5] 陈山枝, 葛雨明, 时岩. 蜂窝车联网(C-V2X)技术发展、应用及展望 [J]. 电信科 学, 2022, 38(1): 1-12. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022007
- [6] LIU Y J, WANG S G, ZHAO Q L, et al. Dependency–aware task scheduling in vehicular edge computing [J]. IEEE Internet of Things journal, 2020, 7(6): 4961–4971. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2972041
- [7] OZCAN Y U, OZDEMIR O, KURT G K. Reconfigurable intelligent surfaces for the connectivity of autonomous vehicles [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(3): 2508–2513. DOI: 10.1109/ TVT.2021.3060667
- [8] XIONG K, LENG S, HUANG C, et al. Intelligent task offloading for heterogeneous V2X communications [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2020, 22(4): 2226–2238. DOI: 10.1109/TITS.2020. 3015210
- [9] DAMPAHALAGE D, SHASHIKA MANOSHA K B, RAJATHEVA N, et al. Intelligent reflecting surface aided vehicular communications [C]// Proceedings of 2020 IEEE Globecom Workshops GC Wkshps. IEEE, 2020: 1–6. DOI: 10.1109/GCWkshps50303.2020.9367569
- 10] DAMPAHALAGE D L, MANOSHA K B S, RAJATHEVA N, et al. Weightedsum-rate maximization for an reconfigurable intelligent surface aided vehicular network [J]. IEEE open journal of the communications society, 2021, 2: 687–703. DOI: 10.1109/OJCOMS.2021.3069253
- [11] SHABIR M W, NGUYEN T N, MIRZA J, et al. Transmit and reflect beamforming for max-min SINR in IRS-aided MIMO vehicular networks [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022: 1–7. DOI: 10.1109/TITS.2022.3151135
- [12] CHEN Y B, WANG Y, ZHANG J Y, et al. QoS-driven spectrum sharing for reconfigurable intelligent surfaces (RISs) aided vehicular networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(9): 5969–5985. DOI: 10.1109/TWC.2021.3071332
作

者

简 介

- [13] KONG L, HE J G, Al Y, et al. Channel modeling and analysis of reconfigurable intelligent surfaces assisted vehicular networks [C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. IEEE, 2021: 1–6. DOI: 10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473681
- [14] LI A C, LIU Y, LI M, et al. Joint scheduling design in wireless powered MEC IoT networks aided by reconfigurable intelligent surface [C]// Proceedings of 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops). IEEE, 2021: 159–164. DOI: 10.1109/ICCCWorkshops52231.2021.9538853
- [15] AL-HILO A, SAMIR M, ELHATTAB M, et al. Reconfigurable intelligent surface enabled vehicular communication: joint user scheduling and passive beamforming [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2022, 71(3): 2333–2345. DOI: 10.1109/TVT.2022.3141935
- [16] 尉志青, 马昊, 张奇勋, 等. 感知-通信-计算融合的智能车联网挑战与趋势 [J]. 中兴通讯技术, 2020, 26(1): 45-49. DOI: 10.12142/ZTETJ.202001010
- [17] KU Y J, BAIDYA S, DEY S. Adaptive computation partitioning and offloading in real-time sustainable vehicular edge computing [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2021, 70(12): 13221–13237. DOI: 10.1109/TVT.2021.3119585
- [18] ZHANG J, GUO H Z, LIU J J, et al. Task offloading in vehicular edge computing networks: a load-balancing solution [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2020, 69(2): 2092–2104. DOI: 10.1109/ TVT.2019.2959410

**刘文帅**,南京信息工程大学在读硕士研究生;主 要研究领域为智能超表面技术、移动边缘计算。



**李斌(通信作者)**,南京信息工程大学副教授;主 要研究领域为无人机通信、移动边缘计算、智能 超表面技术;主持和参与科研项目近10项,获江 西省自然科学奖一等奖1项;发表论文30余篇, 获授权发明专利5项。

## ➡上接第57页

beyond [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2022, 40(6): 1728–1767. DOI: 10.1109/JSAC.2022.3156632

- [5] BUZZI S, GROSSI E, LOPS M, et al. Foundations of MIMO radar detection aided by reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE transactions on signal processing, 2022, 70: 1749–1763. DOI: 10.1109/TSP.2022.3157975
- [6] WANG F Z, LI H B, FANG J. Joint active and passive beamforming for IRSassisted radar [J]. IEEE signal processing letters, 2022, 29: 349–353. DOI: 10.1109/LSP.2021.3134899
- [7] HE Y H, CAI Y L, MAO H, et al. RIS-assisted communication radar coexistence: joint beamforming design and analysis [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 29:349–353. DOI: 10.1109/JSAC.2022. 3155507
- [8] WANG X Y, FEI Z S, HUANG J X, et al. Joint waveform and discrete phase shift design for RIS-assisted integrated sensing and communication system under Cramer-Rao bound constraint [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2022, 71(1): 1004–1009. DOI: 10.1109/TVT.2021. 3122889
- [9] JIANG Z M, RIHAN M, ZHANG P C, et al. Intelligent reflecting surface aided dual-function radar and communication system [J]. IEEE systems journal, 2022, 16(1): 475–486. DOI: 10.1109/JSYST.2021.3057400
- [10] YAN S C, CAI S, XIA W C, et al. A reconfigurable intelligent surface aided dual-function radar and communication system [C]//Proceedings of 2022 2nd IEEE International Symposium on Joint Communications & Sensing. IEEE, 2022: 1–6. DOI: 10.1109/JCS54387.2022.9743509
- [11] WEI T, WU L L, MISHRA K V, et al. Multiple IRS-assisted wideband dualfunction radar-communication [C]//Proceedings of 2022 2nd IEEE International Symposium on Joint Communications & Sensing. IEEE, 2022: 1–5. DOI: 10.1109/JCS54387.2022.9743502
- [12] LIU R, LI M, LIU Y, et al. Joint transmit waveform and passive beamforming design for RIS-aided DFRC systems [J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2022, 1. DOI: 10.1109/jstsp.2022. 3172788
- [13] LIU R, LI M, SWINDLEHURST A L. Joint beamforming and reflection design for RIS-assisted ISAC systems [EB/OL]. [2022-05-25]. https:// arxiv.org/abs/2203.00265

作者简介

**刘让**,大连理工大学在读博士研究生;主要研究 方向为通感一体化、智能超表面、符号级预编码。



**罗泓昊**,大连理工大学在读本科生;主要研究方向为通感一体化和智能超表面。



**李明**,大连理工大学教授、信息与通信工程学院院长;主要研究领域为无线通信系统中的信号处理技术,涵盖了通感一体化、智能超表面、毫米波通信、大规模多入多出系统和物理层安全通信等诸多应用场景;2018年获辽宁省自然科学奖二等奖、辽宁省通信学会学术论文一等奖,2017年获辽宁省自然科学学术成果奖一等奖,2019年获辽宁省自然科学学术成果奖三等奖;发表论文

100余篇,获授权专利5项。

# 智能超表面技术展望与思考



**Reflections on Reconfigurable Intelligent Surface Technology** 

马红兵/MA Hongbing<sup>1</sup>, 张平/ZHANG Ping<sup>2</sup>, 杨帆/YANG Fan3, 王欣晖/WANG Xinhui4, 张建华/ZHANG Jianhua<sup>2</sup>, 刘秋妍/LIU Qiuyan<sup>1</sup>

(1. 中国联合网络通信集团有限公司,中国北京 100032;

2. 北京邮电大学,中国北京100876;
 3. 清华大学,中国北京100084;

4. 中兴通讯股份有限公司,中国深圳 518057)

- (1. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100032, China;
- 2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;
- 3. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202203012 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220511.1119.002.html 网络出版日期 2022-05-11 收稿曰期: 2022-05-06

摘要:智能超表面(RIS)技术具有低成本、低能耗、可编程、易部署等特点。通过构建智能可控无线环境,RIS有机会突破传统无线通信的约 束、给未来移动通信网络带来一种全新的范式、因此具有广阔的技术与产业前景。认为在当前和未来的落地应用中、需要厘清智能超表面技术 在理论模型、应用技术、工程化研究和标准化推进等方面面临的诸多问题与挑战。

关键词: 5G-Advanced; 6G; RIS

Abstract: Reconfigurable intelligent surface (RIS) is a technology with low cost, low energy consumption, programmable, and easy deployment characteristics, which can reconstruct wireless environment dynamically. Hence, RIS is viewed as a potential key technology to break through the restriction of traditional wireless communication and bring a brand-new paradigm to the wireless network in the future. Now, it is necessary to clarify the problems and challenges in the theoretical model, application technology, engineering research, and standardization of RIS implementation in the current and future.

Keywords: 5G-Advanced; 6G; RIS

## 1研究背景

**这**有着无线网络容量需求的持续快速增长,未来十多年, 无处不在的无线连接将会成为现实,"通信-感知-计 算"一体化的网络也将可能实现,但高度复杂的网络、高成 本的硬件和日益增加的能源消耗成为未来无线网络面临的关 键问题<sup>[1]</sup>。

一直以来,随心所欲地调控电磁波是人们不断追寻的梦 想。麦克斯韦方程组的出现使得人们对电磁波的掌控能力有 了飞速提升,但受限于材料相对固定的电磁参数,人们对电 磁波的控制力仅局限于发射机和接收机。近年来,智能超表 面(RIS)能够灵活操控信道环境中的电磁特性,一出现就 吸引了业界的广泛关注。RIS通常由大量精心设计的电磁单 元排列组成。通过给电磁单元上的可调元件施加控制信号, RIS可以动态地控制这些电磁单元的电磁性质,进而实现以

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1806700)

2.智能超表面技术联盟,http://www.risalliance.com

可编程的方式对空间电磁波进行主动的智能调控,形成相 位、幅度、极化和频率可控制的电磁场。作为超材料的二维 实现, RIS天然具有低成本、低复杂度和易部署的特性, 可 用于解决未来无线网络面临的问题。RIS的引入使得无线传 播环境从被动适应变为主动可控,从而构建了智能无线环境 (SRE) <sup>[2]</sup>

从2020年开始,中国学术界与产业界联合,开展了一 系列RIS产业推进活动,极大地促进了RIS的技术研究与工 程化进程。2020年6月,国际移动通信(IMT)-2030推进 组无线技术组成立了"RIS任务组"。同年9月,中国通信标 准化协会(CCSA) TC5-WG6成立"RIS研究项目"。2021年 9月17日, IMT-2030 (6G) 推进组在6G研讨会RIS分论坛 上正式发布业界首个《智能超表面技术研究报告》。2021年 9月24日,"第一届智能超表面技术论坛"<sup>1</sup>大会召开,会议 主题为"使能智能无线环境,重构未来移动通信网络"<sup>3]</sup>。 2022年4月7日,智能超表面技术联盟(RISTA)<sup>2</sup>暨第一届

<sup>1.</sup>智能超表面技术论坛,http://www.risforum.com

会员大会在北京召开,这标志着智能超表面技术联盟正式 成立<sup>[4]</sup>。

专家论坛

目前,中国在RIS的材料工艺、理论研究、实现算法及 工程试验等方面做出了重大贡献。作为未来通信关键技术领 域中一个极具潜力的方向,RIS有机会在5G-Advanced网络 中提前落地,并可能在未来6G网络中使能智能无线环境, 进而带来全新的网络范式<sup>[5]</sup>。

近期,产业界在现网中针对RIS技术进行了一系列的测试验证工作<sup>[6-10]</sup>。众多测试结果表明,RIS的部署可以有效提高无线网络的吞吐量和覆盖性能。

作为一种动态电磁参数调控技术,RIS在多个领域已经 初步展示了其强大的性能。但是,在规模商用前,RIS仍在 技术研究、工程应用、网络部署和标准化等方面面临诸多问 题与挑战。本文中,我们将从背景、基础和关键技术、典型 应用场景以及趋势与挑战等方面对RIS进行探讨。

## 2 RIS的理论和技术

RIS是一种多学科融合技术。在RIS概念诞生前,超材 料相关基础理论已发展了半个多世纪,这为RIS理论体系的 建立奠定了坚实基础。在关键技术方面,与RIS相关的相控 阵、可编程逻辑门等技术均有了应用案例。RIS的概念在最 近10年才被提出,并被视为一种潜在的6G关键技术,已有 的理论与技术基础支撑了其研究的快速发展。

#### 2.1 基础理论

从广义上来说,RIS是超材料(也称为电磁超材料)的 一个分支。超材料可以分为三维超材料和二维超表面,而超 表面又分为固定参数超表面和动态可调超表面。RIS一般被 认为属于动态可调超表面。当然,业界有时也会把固定参数 超表面作为RIS研究的一个特例去考虑。超材料最初是以 "左手材料"和"双负媒质"的名称为人所知的。1967年, V. VESELAGO教授发表了一篇俄语论文。1968年,这篇文 章被翻译成英文后发表<sup>[11]</sup>。该文首次提出了"左手材料"的 概念,即介电常数 ε 和磁导率 μ 均为负的材料,并系统分析 了双负媒质中电磁波的传播特性,理论预测了多个新奇的异 常调控现象。1996年,J. B. PENDRY 爵士实现并验证了负 介电常数<sup>[12]</sup>,并于 1999年提出了用周期排布来验证负磁导 率<sup>[13]</sup>。而最早的人工电磁表面(即超表面)的研究为 1999 年 D. F. SIEVENPIPER 教授提出的蘑菇型结构高阻抗表面 (HIS)<sup>[14]</sup>。

传统等效媒质参数(介电常数和磁导率)可用来描述三 维超材料的电磁特性,但不再适用于分析二维超表面<sup>[15]</sup>。针 对超表面的二维结构特性,研究人员陆续提出多种理论进行 分析和建模。其中,最具代表性的是2011年由F. CAPASSO 教授团队提出的广义斯涅耳定律<sup>[16]</sup>。广义斯涅尔定律可以很 好地刻画电磁超表面物理特性,如公式(1)和(2)所示:

$$n_i \sin \theta_i - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda_0 \mathrm{d}\varphi}{2\pi \mathrm{d}x},\tag{1}$$

$$\sin\theta_i - \sin\theta_i = \frac{\lambda_0 \mathrm{d}\varphi}{2\pi n_i \mathrm{d}x},\tag{2}$$

其中,公式(1)是广义斯涅尔折射定律,公式(2)是广义 斯涅尔反射定律, *n<sub>i</sub>*和 *n<sub>i</sub>*是入射和出射界面折射率, *θ<sub>i</sub>*和 *θ<sub>i</sub>* 是入射角和出射角。

也有学者提出,采用建立在著名的麦克斯韦方程组上的 现代电磁学对超表面的二维结构特性进行分析,如图1所 示。2016年,杨帆教授及其课题组首次提出了"界面电磁 学"的概念,以分析超表面电磁特性<sup>[17]</sup>。界面电磁理论旨在 通过对二维界面上不同种类电磁现象进行分析与解释,指导 各种电磁表面的设计与优化。

早期的超表面在其物理结构固定后,功能和性能也随之 确定。因其不支持按需动态调节,使用的灵活性受限。之后 出现的可调超表面成为了研究的主流。在超表面上集成有源 元件(如开关二极管、变容二极管等)或可调节材料(如液 晶、石墨烯等),通过改变外部激励,固定物理结构的超表 面可以呈现动态可调或可重构的电磁特性。

初期的超表面通常利用连续或准连续的表面极化率、表面阻抗、幅度和相位等参数来表征界面上的电磁特性。这些 表征方式都是从物理层面出发的,可以称之为"模拟超表面"。2014年,东南大学崔铁军教授团队提出了"数字编码



▲图1 电磁学问题在空间域上的分类方法[18]

与可编程超材料/超表面"的概念,创新性地利用二进制编码的形式来表征超表面<sup>[19]</sup>,这标志着超表面从模拟时代进入数字时代。对可调超表面的可调物理特性数字化编码后,可以借用在计算机科学领域中已成熟的编码理论和软件算法对超表面的物理参数的调控进行优化设计。这样可以更好地利用人工智能(AI)算法进行智能调控<sup>[20]</sup>。2017年,崔铁军教授团队发表论文归纳、总结了已有研究,提出了"信息超材料/超表面"的概念体系<sup>[21]</sup>。

除了上述对 RIS 自身物理特性分析的理论外,在 RIS 用 于信息通信领域时,我们需要从信息科学的角度进行分析。 2020年,崔铁军院士团队从信息论角度,建立码本几何信 息熵 I<sub>1</sub>与远场散射方向图的物理信息熵 I<sub>2</sub>之间的关系<sup>[23]</sup>:

$$I_1 + I_2 \le \ln \left(4\pi S/e^2 \lambda^2\right)_{\circ} \tag{3}$$

2008年, F. K. GRUBER 教授首先提出了电磁信息论 (EIT)概念,用于分析大规模多输入多输出(MIMO)系统 的性能<sup>[23]</sup>。2021年,清华大学戴凌龙教授团队提出采用EIT 理论来揭示基于 RIS 的无线通信系统容量的基本物理极限。 文中指出,EIT 可以建立一个新的分析框架,用于推导通信 系统的自由度(DoF)、信道容量和其他重要性能要求<sup>[24]</sup>。

## 2.2 关键技术

## 2.2.1 硬件结构与调控

无论是用于新型的无线收发机,还是用于无线传输的中 继节点,RIS硬件架构都包含三大部分:可重构电磁表面、 馈电系统和控制系统。可重构电磁表面是系统中对空间波进 行调控的主体,其结构为周期或准周期排布的表面单元组成 的阵列。控制系统通过对可重构电磁表面非线性器件配置低 频控制信号,可改变局部单元的电磁特性,以实现对来自馈 电系统的高频信号进行动态调控。

(1) 可重构电磁表面结构设计

可重构电磁表面设计是 RIS 技术的初衷和核心,需要根据实际的应用需求来确定单元设计目标,然后对单元主体、偏置线路等进行优化设计。首先,需要在电磁仿真软件中建立合适的主体模型,设置周期边界条件、Floquet端口激励、非线性元件的等效 RLC 模型等;随后,选择合适的单元几何结构进行设计优化,使得在所需频段内满足预先设定的设计要求,如1 bit 反射单元要求反射幅度接近0 dB,反射相位差为180°等<sup>[25]</sup>;最后,还需要考虑用于连接控制系统的偏置线等结构,并验证其对单元性能的影响。1-bit 数字相控单元及其反射相位示意如图2所示。





#### (2) 控制系统设计

控制系统的控制方式主要包括机械控制、模拟信号控制、数字信号控制3类。机械控制由于其响应速度较慢,目前已较少采用;在模拟信号控制中,控制模块产生连续分布的电平,控制变容二极管等具有连续变化参数的器件产生不同的响应;在数字信号控制中,控制模块产生不同的电平,控制PIN二极管(P-I-N结构的二极管)等开关器件产生不同的响应。其中,数字信号控制根据可控状态数目,可分为1bit、2bit或更多bit状态的控制,不过更多控制位数会导致表面结构复杂度急剧增加,设计和实现更为困难。

控制系统软件设计的核心是控制码表设计,即根据电磁 波束方向设计可重构电磁表面单元相位分布。目前控制码表 的提取有两种方式:一种是离线查表模式,预先计算出各个 方向码表并存储,使用时根据上位机的指令按地址提取对应 的码表并完成赋值;另一种则是在线计算模式,将码表计算 程序植入处理单元,由处理单元完成码表的计算。

#### 2.2.2 基带算法

(1) 信道建模

在传输信号模型中,信道响应矩阵是极为重要的部分。 作为一种将环境转变为智能可重构电磁空间的潜在技术, RIS为其辅助传输的系统建立准确而高效的无线信道模型是 保证无线通信系统及相关技术评估合理性的基础。当前主流 的信道建模方法包括基于几何的统计性建模和基于射线追踪 的确定性建模方法两类。统计性建模方法通过专用测量设备 采集某一真实场景下的信道数据,并通过大、小尺度参数对 信道数据中隐藏的特性进行统计描述。2021年,崔铁军院 士团队对 RIS 辅助无线通信的自由空间路径损耗进行 建模<sup>[26]</sup>。

 $P_r = P_t G_t G_r G d_x d_y \lambda^2 / (64\pi^3) *$ 

$$\left| \sum_{m=1-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}} \sum_{n=1-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}} \frac{\sqrt{F_{n,m}^{\text{combine}}} \Gamma_{n,m}}{r_{n,m}^{t} r_{n,m}^{t}} e^{-j2\pi \left(r_{n,m}^{t} + r_{n,m}^{t}\right)} \right|_{0}^{2}$$
(4)

基于几何光学与一致性绕射理论,射线追踪方法对发射机-接收机、发射机-RIS、RIS-接收机链路之间的多径射线(传播路径)进行精确计算,从而确定多径射线的离开角、到达角、时延、功率等信道参数。

(2) 信道估计

相对于传统 MIMO 系统, RIS 使能的无线系统特性给信 道估计带来新的挑战。首先,典型 RIS 一般采用全被动元 素,并不具备复杂的信号处理能力,这使得信道状态信息 (CSI)的估计存在困难。设计具有部分主动元素的 RIS 可以 自主估计 CSI,但需要权衡信道估计与复杂度及成本的需 求<sup>[27]</sup>。其次,RIS 超大规模天线阵子带来了高维信道估计的 复杂度问题。此外,引入 RIS 后带来的分段信道特性,也给 RIS 的信道估计带来新的问题。

一方面,可以利用信道的双时间尺度特性进行分段信道 估计,即用户设备(UE)的低维移动信道估计频繁,而高 维准静态的基站(BS)-RIS信道仅需要信道统计信息,不 需要频繁的信道估计,从而降低了总体导频开销<sup>[28]</sup>。另一方 面,可以通过 RIS 电磁单元优化分组来降低估计高维 RIS 信 道<sup>[29]</sup>和多用户信道的复杂度<sup>[30]</sup>。高频段场景可以利用 RIS 信 道矩阵低秩特性,构造联合稀疏矩阵并设计矩阵填充问题来 实现级联信道估计<sup>[31]</sup>,还可以利用多用户信道在角度域的稀 疏性来降低导频开销<sup>[32]</sup>。可将 RIS 面板划分为不同的子块, 每个子块在不同的时隙采用不同调控系数矩阵,依次估计出 待估计信道<sup>[33]</sup>。通感一体化技术的发展使利用感知信息辅助 RIS信道估计成为可能<sup>[34]</sup>。另外,考虑到工程化应用的复杂 度,基于码本的信道估计是一种典型的低复杂度信道估计方 法,但RIS信道分段特性和近场特性会给传统码本方案带来 挑战<sup>[35]</sup>。

(3) 波束赋形

RIS引入的级联信道和超大规模天线阵子的特点使得系统的波束赋形设计变得更加复杂。RIS借鉴 Massive MIMO 混合波束赋形的模型架构。从系统模型的角度看,RIS可以视为一个外部模拟波束预编码单元,对相应的相移矩阵进行设计。也就是说,RIS 对来自发射机的信号采用模拟波束赋形进行电磁波反射调控。

相对于传统波束赋, RIS的波束赋形有一些新的特征:

超大规模 RIS 电磁单元个数,使得设计波束赋形的电磁调控参数有较高的复杂度。信道降维与电磁单元分组是平衡波束赋形性能和复杂度的有效方法。

● RIS 传播信道具有分段特性,需要联合优化设计基站的有源波束和RIS的无源波束。

•超大天线孔径带来传播信道的近场特性。

现有的波束训练设计依赖于基于远场信道模型设计的远场码本。然而,由于RIS超大天线孔径特点,用户更可能处于RIS的近场区域。文献[35]设计与近场信道模型相匹配的近场码本,并提出了有效的近场波束训练方案。

#### 2.2.3 组网设计

从通信环境复杂度和 RIS 部署及调控复杂度的角度考虑,我们可以把部署场景分为小范围可控的受限区域和大范 围复杂环境两大类。这两类场景对 RIS 网络部署原则和需求 有着较大差异。小范围可控的受限区域有机会部署足够密度 的 RIS,并实现精确电磁环境智能调控。对于大范围复杂环 境,RIS主要对已有或新引入的主要传播路径/主散射体进行 调控,半动态或静态地调控无线信道的大尺度特性,所需的 RIS形态简单易部署,且成本较低。

无线网络引入RIS也会带来新的网络共存方面的挑战。 文献[36]分析了RIS网络的共存问题,并提出了可能的解决 思路。在实际网络中,入射在RIS面板上的无线信号既包括 RIS优化调控的"目标信号",也包括其他"非目标信号"。 RIS将会对这两类信号同时调控。通过调控电磁波的幅度、 相位、极化方式等,RIS可以增强"目标信号",同时也对 "非目标信号"进行非预期的异常调控。在非受控情况下, RIS对来自其他网络的"非目标信号"进行非预期的异常调 控,这将导致严重的网络共存问题。文献提出了带有带通滤 波层的多层RIS结构和RIS分块机制两种解决方案。另外, 此网络共存问题也表明,规模部署的RIS需要受控于网络, 以约束其对无线环境中"非目标信号"随意的非预期异常调 控行为,避免导致的严重网络性能恶化。

#### 2.3 原型验证

(1) 内场测试

2018—2021年,美国普林斯顿大学、麻省理工学院和加州大学圣地亚哥分校分别搭建了 2.4 GHz 频段 LAIA、 RFocus<sup>[37]</sup>和ScatterMIMO<sup>[38]</sup>智能超表面原型系统;欧洲研究 机构也成立了智能超表面研发领域的VisorSurf和ARIADNE 项目,通过上百次撒点测试,验证了智能超表面在室内场景 中的波束赋形、覆盖增强和多流增速的能力。

中国智能超表面原型系统研发也与其他国家基本保持同步。东南大学团队搭建了智能超表面单输入单输出二进制频移键控(SISO BFSK)/正交相移键控(QPSK)/八进制相移键控(8PSK)/16QAM(包含了16种符号的正交振幅调制)/64QAM和MIMO QAM等系列原型系统;清华大学团队研发了2.3 GHz/3.5 GHz/5.8 GHz/26 GHz/28 GHz 频段 64/100/256/1 024/2 304/4 096 阵元等系列原型系统<sup>[39-40]</sup>;香港中文大学(深圳)、华中科技大学、西安电子科技大学等诸多团队均开展了智能超表面原型系统研发创新,并与各大设备厂商开展系统联调和内场典型场景下的测试,持续验证智能超表面在覆盖补盲和多流增速等方面的性能增益。

(2) 外场测试

NTT DoCoMo在2018年首次开展28 GHz智能超表面外场 测试,验证智能超表面毫米波覆盖补盲能力;2020年,首 次开展了毫米波频段透明动态超表面验证测试;2021年, 进一步使用超表面透镜验证室外到室内的覆盖增强能力。 2022年,韩国LG公司针对3.5 GHz和28 GHz频段开展智能 超表面外场测试验证。

中国三大运营商也都已开启智能超表面外场测试验证工作。2021年下半年,中国联通<sup>[8]</sup>、中国移动<sup>[6]</sup>、中国电信<sup>[7]</sup>分别针对3.5 GHz、2.6 GHz频段和毫米波频段开展智能超表面技术5G外场测试,验证了智能超表面系统可切实提升5G网络深度覆盖和扩容提速的能力。近期,北京邮电大学针对工业场景开展智能超表面环境适变理论和信道快速重构方法研究,以保障工厂在复杂电磁环境下的平稳高效运行。

#### 3 RIS技术典型场景

近年来,学术界和产业界依据RIS技术的特性,分析了 其典型的应用场景。本文在前期研究的基础上,进一步根据 RIS技术的发展阶段以及5G-Advanced和6G网络的趋势,分 析了RIS在5G-Advanced和6G网络中的典型场景。

## 3.1 5G-A 阶段典型场景

在5G-Advanced阶段,在移动通信网络的典型场景中, RIS将侧重支持Sub6GHz和毫米波频段传统通信场景的覆盖 或速率增强。

(1) 覆盖补盲

传统的蜂窝部署可能会覆盖空洞区域,而RIS可部署在 基站与信号盲区之间,通过有效地反射/透射传输信号,以 增强信号盲区用户的信号质量,保证空洞区域用户的覆盖。

(2) 多流增速

对于业务密集的热点区域,可以通过RIS增加额外的无 线通信路径与信道子空间,从而提高信号传输的复用增益。 尤其在视距传输场景中,引入基于RIS的可控信道,收发天 线阵列间信道的空间相关特性将会得到很大改善,可用于数 据传输的子空间数目将会增加,这极大地提升了系统的传输 性能。

对于小区边缘区域,有用信号电平较弱且缺乏多径环境,终端侧的多天线能力无法充分发挥作用。在收发端之间 增加RIS设备,使小区边缘用户按需利用终端多天线能力,极大提升传输性能。

#### 3.2 6G 阶段典型场景

(1) RIS支持高频通信

高频毫米波和太赫兹是5G-Advanced和6G潜在工作频 段。高频信号最明显的特征就是路径损耗较大,小区半径较 小,受障碍物遮挡、雨雪天气、环境吸收等影响大。依据 3GPP 38.901(第3代合作伙伴计划中的协议),在同等条件 下,28 GHz毫米波信号的路径传输损耗比3.5 GHz信号的路 径损耗增大约18 dB;在穿透损耗方面,对于低频毫米波信 号而言,混凝土和红外反射玻璃材质的障碍物几乎无法穿 透,如表1所示,树叶、人体、车体等障碍物对低频毫米波 信号的穿透损耗均在10 dB以上,这导致覆盖范围内的大部 分区域通信质量从良好变得非常差。因此,高频通信必将面 临覆盖半径小、盲区多、部署运维成本高的严峻形势。

在基站和终端用户之间部署智能超表面设备,能够在视 距通信不可达或信号质量较差的盲区或小区边缘,按需动态 建立非视距链路,从而提升网络深度覆盖质量,减少覆盖盲 区。未来,随着超材料天线的应用推广,智能超表面设备形 态将更加丰富多样,例如建筑物外墙装饰层。低成本、低功 耗、易部署的智能超表面设备将成为基站提供有效的补充和 延伸。

▼表1 高频信号穿透损耗3GPP的理论
---------------------

材料	3GPP高频信号穿透损耗模型	毫米波穿透损耗理论值/dB	毫米波穿透损耗测试值/dB
标准多窗格玻璃	L <sub>玻璃</sub> =2+0.2f	8~62	>5
红外反射玻璃	L <sub>红外反射玻璃</sub> =23+0.3f	32~113	
混凝土	L <sub>混凝土</sub> =5+4f	125 ~ 1 205	无法穿透
木头	L <sub>木头</sub> =4.85+0.12 <i>f</i>	8.45~40.85	6
树口十			16~20
人体			11~28
车体			17~23

专家论坛

f:频率 L:路径损耗

## (2) RIS使能轨道角动量(OAM)

OAM 技术有望突破传统通信中的香农极限,缓解现今 频谱资源紧张、频段拥塞的问题,因此成为6G 潜在的关键 技术之一。OAM 涡旋电磁场的生成方式有很多种,其中一 种典型的便是基于智能超表面的涡旋电磁场的生成方法。通 过反射型和投射型智能超表面,既可以产生双极化双频段多 模态OAM 涡旋电磁波,也可以实现OAM 涡旋电磁波的线极 化和圆极化灵活转换。

(3) RIS使能通信感知一体化

未来移动通信系统正朝着更加智能化和软件化的方向发 展,有望通过融合环境感知技术、用户定位功能和智能无线 环境新范式,进一步拓展其网络能力和应用场景。在智能超 表面辅助的无线通信系统中,利用智能超表面的空时调制能 力,不仅可以在非视距环境中建立虚拟视距链路,通过优化 智能超表面的反射系数矩阵提高通信链路质量,按需动态提 供波束赋形增益,而且可以在同等条件下使系统具备较大天 线孔径的优势和较高的定位精度,实现高精度感知定位 能力。

## 4 RIS技术挑战与趋势

RIS技术的挑战与趋势主要涉及理论模型、应用技术、 工程化研究等方面。

对RIS理论模型的刻画,虽然已有一些积累(参见2.1 节),但后续还需在电磁调控物理机理、电磁信息学、信道 模型等方面进一步深入探索,以尽快构建完善的理论体系。 另外,RIS是材料科学(主要指超材料)、电磁学、信息与 电子学、通信工程等多学科交叉融合的技术,需要多学科协 同推进。

在应用技术研究方面,已有的研究主要为了解决传统无 线通信中的经典问题,例如信道估计、波束赋形和信息调制 等,而在基于 RIS 的通感一体化、AI 使能 RIS<sup>[41]</sup>和基于 RIS 的安全通信等新颖的应用领域研究投入不足,相关的研究成 果较少。另外,已有的研究大多基于一些简单的系统模型, 提供的机制一般仅适用于较为理想的场景。因此,后续研究 需要关注 RIS 的全新应用领域,并考虑更为复杂的模型。

在工程化研究方面,虽然已有一些RIS样机的简单测试,且在特定场景中展示出了一些性能增益,但距离真正的 工程化应用依然有很远的距离。

(1) RIS 标准化。3GPP 5G-A Rel-18 立项了 Smart-Repeater,这为RIS在Rel-19中的标准化立项,以及其基于 5G 网路的标准化工作打下良好的基础。与5G-A的标准化不 同,在RIS的6G标准化工作中,6G标准预计将是全新的标 准协议。因此,未来RIS标准化工作将不用考虑与传统系统 兼容性,且届时RIS技术研究也更加成熟。

(2) RIS 网络部署。从 RIS 工程应用的落地角度来看, 可以采用3阶段的网络部署方式:阶段1,在5G现网中少量 部署非标准化静态 RIS 面板,用于解决覆盖空洞问题,尤其 是高频覆盖问题;阶段2,基于5G-A标准化机制部署半动 态可调的 RIS,用于优化网络的连续覆盖;阶段3,未来无 线网络中泛在部署智能灵活的 RIS,构建智能可控无线环 境,给未来6G带来一种全新的通信网络范式。

## 5 结束语

移动通信网络是支持百行千业数字化转型升级,推动经 济发展质量变革、效率变革、动力变革的关键基础设施。未 来移动通信网络将面临频谱资源紧缺、芯片集成度要求较 高、无线信道不可控、设备能耗较大等一系列挑战。智能超 表面具有低成本、低能耗、可编程、易部署等特点,构建智 能可控无线环境将会给未来无线网络带来一种全新的范式, 并有机会成为基础原始创新取得突破的领域,同时引领全球 产业链的成熟和发展。

## 致谢

感谢中国联合网络通信有限公司研究院无线技术研究中

心李福昌总监、张忠皓博士和中兴通讯股份有限公司无线研 究院算法部赵亚军总工对本文的指导和支持。感谢智能超表 面技术联盟(RISTA)提供了良好的技术研究与合作平台。

#### 参考文献

- [1] TARIQ F, KHANDAKER M R A, WONG K K, et al. A speculative study on 6G
  [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(4): 118–125. DOI: 10.1109/ mwc.001.1900488
- [2] RENZO D M, ZAPPONE A, DEBBAH M, et al. Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: how it works, state of research, and the road ahead [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(11): 2450–2525. DOI: 10.1109/ JSAC.2020.3007211
- [3] 中兴通讯、东南大学、中国联通联合承办第一届 RIS 技术论坛 [EB/OL]. (2021-09-26)[2022-04-20]. https://www.mscbsc.com/info/Nw5111e
- [4] 智能超表面技术联盟在京成立 [EB/OL]. (2022-04-08)[2022-04-20]. http:// www.stdaily.com/index/kejixinwen/202204/78120a63e7e04bb4b6a0053367 a83b1f.shtml
- [5] 崔铁军, 金石, 章嘉懿, 等. 智能超表面技术研究报告 [R]. IMT-2030(6G)推进 组, 2021
- [6] 跨学科创新, 中国移动联合崔铁军院士团队率先完成智能超表面技术试验 [EB/ OL]. (2021-07-09) [2022-04-22]. https://www. c114. com. cn/news/118/ a1168348.html
- [7] 中兴通讯联合中国电信完成业界首个5G高频外场智能超表面技术验证测试 [EB/OL]. (2021-07-08)[2022-04-22]. https://www.c114.com.cn/news/127/ a1167281.html
- [8] 中兴通讯携手中国联通完成全球首个5G中频网络外场下的智能超表面技术验证 [EB/OL]. (2021-07-07)[2022-04-20]. https://www.c114.com.cn/news/ 127/a1167167.html
- [9] 数学与通信完美结合——罗智泉教授团队与华为合作取得5G网络中应用智能 反射面技术的突破 [EB/OL].(2021-08-12)[2022-04-20]. http://www.sribd. cn/article/361/
- [10] 5G evolution and 6G: HAPS, metasurface lens and pinching antenna [EB/ OL]. [2022-04-20]. https://www. nttdocomo. co. jp/english/info/ media\_center/event/mwc21/contents/exhibits06/
- [11] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of candµ [J]. Soviet physics uspekhi, 1968, 10(4): 509– 514. DOI: 10.1070/pu1968v010n04abeh003699
- [12] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures [J]. Physical review letters, 1996, 76(25): 4773–4776. DOI: 10.1103/PhysRevLett.76.4773
- [13] PENDRY J B, HOLDEN A J, ROBBINS D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 1999, 47(11): 2075–2084. DOI: 10.1109/22.798002
- [14] SIEVENPIPER D F, ZHANG L X, BROAS R, et al. High-impedance electromagnetic surfaces with forbidden bands at radio and microwave frequencies [C]//Proceedings Volume 3795, Terahertz and Gigahertz Photonics. 1999, 3795: 154–165. DOI: 10.1117/12.370159
- [15]张磊,陈晓晴,郑熠宁,等.电磁超表面与信息超表面 [J].电波科学学报, 2021, 36(6): 817-828
- [16] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. Science, 2011, 334(6054): 333–337. DOI: 10.1126/science.1210713
- [17] RAHMAT-SAMII Y, YANG F. Surface EM in antenna engineering: from EBG to meta-surface and beyond [C]//2016 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). Fajardo, Puerto Rico, 2016
- [18] 杨帆, 许慎恒, 刘骁, 等. 基于界面电磁学的新型相控阵天线 [J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 256-265
- [19] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials [J]. Light: science & applications, 2014, 3(10): e218. DOI: 10.1038/lsa.2014.99
- [20] MA Q, BAI G D, JING H B, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions [J]. Light: science & applications, 2019, 8(1): 98. DOI: 10.1038/s41377-019-0205-3

[21] CUI T J, LIU S, ZHANG L. Information metamaterials and metasurfaces [J].

Journal of materials chemistry C, 2017, 5(15): 3644-3668

- [22] CUI T J, WU H T, LIU S, et al. Research progress of information metamaterials [J]. Acta physica sinica, 2020, 69(15): 158101. DOI: 10.7498/ aps.69.20200246
- [23] GRUBER F K, MARENGO E A. New aspects of electromagnetic information theory for wireless and antenna systems [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2008, 56(11): 3470–3484. DOI: 10.1109/ TAP.2008.2005468
- [24] WAN Z, ZHU J, ZHANG Z, et al. Capacity for electromagnetic information theory [EB/OL]. https://arxiv.org/pdf/2111.00496.pdf
- [25] YANG H H, YANG F, XU S H, et al. A 1-bit 10×10 reconfigurable reflectarray antenna: design, optimization, and experiment [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2016, 64(6): 2246–2254. DOI: 10.1109/TAP.2016.2550178
- [26] TANG W K, CHEN M Z, CHEN X Y, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20 (1): 421–439. DOI: 10.1109/twc.2020.3024887
- [27] TAHA A, ALRABEIAH M, ALKHATEEB A. Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning [J]. IEEE access, 2021, 9: 44304–44321. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3064073
- [28] HU C, DAI L L, HAN S F, et al. Two-timescale channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(11): 7736–7747. DOI: 10.1109/ TCOMM.2021.3072729
- [29] TAHA A, ALRABEIAH M, ALKHATEEB A. Enabling large intelligent surfaces with compressive sensing and deep learning [J]. IEEE access, 2021, 9: 44304–44321. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3064073
- [30] WEI X H, SHEN D C, DAI L L. Channel estimation for RIS assisted wireless communications—part II: an improved solution based on double– structured sparsity [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(5): 1403– 1407. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3052787
- [31] HE Z Q, YUAN X J. Cascaded channel estimation for large intelligent metasurface assisted massive MIMO [J]. IEEE wireless communications letters, 2020, 9(2): 210–214. DOI: 10.1109/LWC.2019.2948632
- [32] WEI X H, SHEN D C, DAI L L. Channel estimation for RIS assisted wireless communications—part II: an improved solution based on double– structured sparsity [J]. IEEE communications letters, 2021, 25(5): 1403– 1407. DOI: 10.1109/LCOMM.2021.3052787
- [33] JIAN M N, ZHAO Y J. A modified off-grid SBL channel estimation and transmission strategy for RIS-assisted wireless communication systems [J]. 2020 international wireless communications and mobile computing (IWCMC), 2020: 1848–1853. DOI: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148537
- [34] XU W H, GAO F F, ZHANG J H, et al. Deep learning based channel covariance matrix estimation with user location and scene images [J]. IEEE transactions on communications, 2021, 69(12): 8145–8158. DOI: 10.1109/TCOMM.2021.3107947
- [35] WEI X, DAI L, ZHAO Y, et al. Codebook design and beam training for extremely large-scale RIS: far-field or near-field?[EB/OL]. (2021-09-21) [2022-04-20]. https://arxiv.org/abs/2109.10143
- [36] 赵亚军, 菅梦楠. 6G 智能超表面技术应用与挑战 [J]. 无线电通信技术,2021, 47(6):679-691. DOI:10.3969/j.issn.1003-3114.2021.06.002
- [37] ARUM V, BALAKRISHNAN H. RFocus: beamforming using thousands of passive antennas [EB/OL]. [2022–04–20]. https://www. usenix. org/ conference/nsdi20/presentation/arun
- [38] DUNNA M, ZHANG C, SIEVENPIPER D, et al. Scatter/MIMO: enabling virtual MIMO with smart surfaces [C]//Proceedings of the 26th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. USA: ACM, 2020: 1–14. DOI: 10.1145/3372224.3380887
- [39] DAI L L, WANG B C, WANG M, et al. Reconfigurable intelligent surfacebased wireless communication: antenna design, prototyping, and experimental results [J]. IEEE access, 2020, 8: 45913–45923. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977772
- [40] LI Y Z, REN Y L, YANG F, et al. A novel 28GHz phased array antenna for 5G wireless communications [J]. ZTE communications, 2020, 18(3): 20– 25. DOI: 10.12142/ZTECOM.202003004
- [41] ZHANG S, LI M Y, JIAN M N, et al. AIRIS: Artificial intelligence enhanced signal processing in reconfigurable intelligent surface communications [J]. China communications, 2021, 18(7): 158–171. DOI: 10.23919/ JCC.2021.07.013



马红兵,中国联合网络通信有限公司科技创新部 总经理、中国IMT-2020/IMT-2030 推进组成 员、GSMA TG成员、工业与信息化部通信科技 委移动与无线及卫星通信专家咨询组成员、中国 无线电协会专家委员会副主任委员;长期从事移 动通信技术研究与应用创新工作,研究方向包括 5G、6G 网络组网技术研究及毫米波、智能超表 面等关键技术创新应用;曾获国务院特殊津贴,

国家科技进步二等奖1项,省部级科学技术奖5项;已发表论文近 百篇。



**张平**,中国工程院院士,现任北京邮电大学信息 与通信工程学院教授、网络与交换技术国家重点 实验室主任;先后担任国家自然科学基金委员会 首届国际合作咨询委员,信息学部第三、五、六 届咨询委员,"973"计划"认知无线网络基础研 究"项目首席科学家,"863"计划"网络与通 信"主题专家,国家科技重大专项"新一代宽带 无线移动通信网"总体组专家,IMT-Advanced

2020(5G)专家组成员,国家第六代移动通信(6G)技术研发总体专家组专家;先后获国家科学技术进步奖特等奖1项、国家科学技术进步奖一等奖1项、国家技术发明奖二等奖3项、国家科学技术进步奖二等奖2项,2017年获首届全国创新争先奖,2018年获光华工程科技奖、何梁何利基金科学与技术进步等奖项。



**杨帆**,清华大学教授、智能超表面技术联盟 (RISTA)副理事长;主要研究方向包括现代天 线理论、设计与测量、新型电磁材料探索和应 用、电磁场数值算法与优化,以及应用电磁系统 研究与开发;已承担国家 "863" "973"、自然 科学基金、重点研发等多个重大国家科研项目, 主持建设清华大学电磁实验中心,多次在全球重要会议上做大会特 邀报告,并组织专题论坛,在IEEE国际天线与传播年会等国际会 议上开设专业课程10余次,2017年被IEEE天线与传播学会遴选为 杰出讲师,2018年被选为IEEE Fellow,被ACES 遴选为ACES Fellow;申请发明专利20余项,已授权12项,实现转让2项,已 出版6本学术专著,发表论文400余篇。



**王欣晖**,中兴通讯股份有限公司副总裁、无线标 准和产业关系总经理,IEEE PES技术委员会(中 国)委员,连续三届担任 3GPP GERAN 副主席, 中国通信学会无线移动通信委员会委员,中国通 信标准化协会理事,IMT-2020/IMT-2030 推进组 专家组成员;长期从事先进无线技术研究与标准 化推进工作。

马红兵等



**张建华**,现任北京邮电大学信息与通信学院教授、北京邮电大学-中国移动联合创新中心主任、中国IMT-2030(6G)工作组频率子组副组长等;先后获国家杰出青年科学基金、优秀青年科学基金、教育部新世纪优秀人才等计划资助,曾获国家技术发明奖二等奖2项,以及中国通信学会科学技术奖一等奖、无线电管理科学技术一等奖、茅以升青年科技奖等奖项;发表论文200余

篇,获国家授权发明专利50余项。



**刘秋妍**,中国联通网络通信有限公司研究院高级 工程师;长期从事无线网络技术预研工作;主要 研究方向包括智能超表面、区块链、边缘计算等 移动通信技术创新预研与应用验证;曾主持省部 级"十三五""十四五"科技预研项目2项,多次 参与国家级重大专项;发表论文10余篇。

# 5G TSN 技术的创新研究



## 5G TSN Technologies and Innovation

张启明/ZHANG Qiming,郑兴明/ZHENG Xingming, 张寿勇/ZHANG Shouyong

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

#### DOI:10.12142/ZTETJ.202203013 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220516.1028.002.html 网络出版日期: 2022-05-16 收稿日期: 2022-05-05

摘要:提出5G时间敏感网络(TSN)面临的主要技术挑战:高精度时间同步、低时延确定性转发、高可靠连接。围绕5G TSN的发展,中兴通讯研发出一系列创新技术,并且有多项提案被3GPP采纳,例如基于时间提前量(TA)和往返时间(RTT)方法的传播延迟补偿、配置授权(CG)/半持续调度(SPS)配置的增强、基于上行Survival time的方法等。在方案实现层面引入智能网卡技术,并且针对多样的工业互联网进行适配。这些技术和方案进一步促进了5G TSN的发展。中兴通讯联合运营商及工业合作伙伴在5G TSN端到端实践方面取得了一定进展。

关键词:高精度时间同步;低时延确定性转发;高可靠连接;智能网卡

Abstract: Main technical challenges faced by 5G TSN are proposed, including high-precision time synchronization, low latency and deterministic forwarding, and high reliability connection. ZTE Corporation develops a series of innovative technologies, and a number of proposals have been adopted by 3GPP, such as the propagation delay compensation based on timing advance (TA) and round-trip time (RTT), enhancement of configured grant (CG)/semi-persistent scheduling (SPS) configuration, and method based on uplink survival time. At the solution implementation level, the smart NIC technology is introduced, and the solution adaptable to various industrial Internet is also considered. These technologies and solutions have further promoted the development of 5G TSN. At the same time, ZTE Corporation has made some progress in the end-to-end practice with telecom operators and industrial partners in 5G TSN.

Keywords: high-precision time synchronization; low latency and deterministic forwarding; high reliability connection; smart NIC

## 15G 时间敏感网络(TSN)的概念及进展

## 1.1 TSN的基本概念

道过人、机、物、系统等的全面互联,工业互联网构建 了全新的制造和服务体系。工业互联网不仅是工业4.0 的基石,也是制造业升级转型的关键路径,为推动数字经济 发展提供新动力。

由于直接涉及工业中最核心的控制部分,工业运营技术 (OT)域对网络的要求很高,例如低时延、低抖动、高可靠 性等。由于具有低时延、确定性传输、高可靠性等特点, TSN成为工业互联网OT域中重要的传输技术。TSN是开放 的以太网标准,不同厂商的TSN设备可以更好地相互兼容, 从而提高了工业设备的连接性和通用性,具有良好的互联互 通能力。

TSN标准的制订由电气与电子工程师协会(IEEE) 802.1工作组负责,相关研究主要面向对传输时延、丢包率 等要求严苛的行业领域。TSN标准主要涉及时间同步、有界 的低时延、高可靠传输和资源管理等。目前,IEEE已经发 布 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qci、IEEE 802.1CB、IEEE 802.1Qcc 等10余个TSN相关标准规范,相关标准规范已经比较成熟。此外,IEEE 仍在持续完善TSN相关协议,以便TSN在各行业中得到更好的部署和管理。

## 1.2 5G与TSN融合的必要性

传统的TSN是有线网络,但是在很多应用场景中,有线 网络存在成本高、灵活性差等局限性。例如,在电力行业的 差动保护应用场景中,差动保护装置数量多、部署分散,如 果铺设光纤,成本就会很高,施工难度也较大;在很多大型 智能工厂的自动化生产线中,机械臂需要根据产品型号来调 整位置,如果使用有线网络线缆,成本会很高,而且不灵 活,同时频繁的移动会降低线缆的可靠性。在这些应用场景 中,无线网络有着得天独厚的优点。在无线技术中,Wi-Fi 切换时延较大,稳定性、抗干扰能力和安全性均较差,很难 承担工业OT域中对时延、抖动等有很高要求的任务。随着 5G技术的发展和边缘计算的成熟,5G网络的低时延、高可 靠性使得5G与工业互联网(尤其是TSN)的结合越来越紧 密<sup>[1-3]</sup>。目前,5G已应用于航空、矿业、港口、冶金、汽车、 家电、能源、电子等多个重点行业。

#### 1.3 5G TSN 架构及标准演进

为了支持 5G 与 TSN 的融合,第三代合作伙伴计划 (3GPP)在2020年7月份发布的R16标准中增加了时间敏感 通信(TSC)功能<sup>(4)</sup>。如图1所示,5G 网络是一个TSN 虚拟 网桥,UE 侧增加一个终端侧 TSN 转换器(DS-TT)模块, 用户面功能(UPF)侧增加一个网络侧 TSN 转换器(NW-TT)模块。两个TSN转换器(TT)将5G 网络连接到 TSN 网 络。5G TSN 网络拥有 IEEE 802.1Qcc 协议定义的全集中式模 型网络架构,因此,5G 控制面增加了 TSN 应用功能(AF) 网元与集中式网络配置(CNC)交互,实现了 CNC 对 5G TSN 逻辑网桥的配置和管理。 作为一个TSN 网桥,5G 网络需要支持TSN 网络相关的基础协议,包括时间同步协议IEEE 802.1AS、基于时间门控 调度的协议 IEEE 802.1Qbv、TSN 网络管理配置协议 IEEE 802.1Qcc 以及网络拓扑管理发现协议 IEEE 802.1AB。

此外, 3GPP R16还定义了5G作为TSN 网桥必须支持的时间同步功能。如图2所示,在5G TSN 网络中,存在两种不同的时间域:5G 时间域和TSN 时间域。5G 主时钟(GM)和TSN 主时钟(GM)可以各自独立,互不干扰。5G 时间域包括 UE/DS-TT、无线接入网(RAN)、UPF/NW-TT,各节 点与5G GM 保持同步;TSN 时间域包括 End Station、TSN Bridge、DS-TT、NW-TT等节点,各节点与TSN GM 保持同步。DS-TT和NW-TT需要同时感知两个不同时间域的时间,而RAN无须感知TSN时间。



根据R16的定义,5G作为TSN的网桥,仅支持TSN的网桥,仅支持TSN的下行时间同步,即将NW-TT模块作为IEEE802.1AS的Slaver,使其同步于上游的TSN网络,以获取TSN网络的时间同步信息,同时将TSN时间同步信息通过5G网络传递给DS-TT。作为IEEE802.1AS的Mas-ter,DS-TT将TSN的时间同步音到下游的TSN终端。

为了支持 5G TSN 的融 合, 3GPP R16还增加了一 些功能<sup>(4)</sup>,包括以下几个 方面:

(1)为5G空口增加授时增强功能,将授时粒度提高到10 ns;同时增加时钟质量字段表征由5G基站(gNB)提供的时钟信息的精度;提高基站根据授时能力通知终端授时的可靠性,进而提高业务可靠性。

(2)针对超可靠低时延 通信(URLLC)场景,引入 Mini-slot、免调度、1D1S帧 结构、低码率传输等一系列 增强技术;可针对业务需



求,进行帧结构、调度请求(SR)周期等算法参数和功能 开关的联动配置;借助多种技术的灵活组合,形成分级的空 口时延和可靠性传输能力。

(3)引入TSC辅助信息(TSCAI),gNB能够利用TSCAI 信息,并结合上行免授权、半静态调度、预调度及SR周期 等算法参数和功能开关的联动配置,使得无线调度行为能够 更有效地匹配业务流特征,从而降低业务流无线传输时延, 提升无线调度效率。

在 3GPP R16 的基础上,针对 5G TSN 应用场景中出现的问题及新需求, 3GPP R17 也增加了一些新的功能<sup>[5]</sup>:

(1) 引入5G局域网(LAN) 机制,可实现UE与UE间的确定性转发,不需要UPF N6接口外接TSN 网络;

(2)引入时间敏感通信和时间同步功能(TSCTSF)网元,实现5G系统内的确定性转发管理能力,无须外接TSNCNC管理系统;

(3) 通过网络开放功能(NEF) 连接第三方AF, 实现 确定性能力开放;

(4) 引入Survival time,确保网络糟糕时能满足业务最低时延保障需求;

(5) TSN GM 可以部署在网络侧或者终端侧,也可以由 NW-TT/DS-TT 承担。5G 系统的授时功能与能力开放相结 合,可供第三方调用,并支持IEEE 1588(以太网或用户数 据报协议)、IEEE 802.1AS 多种时间同步协议,适应更多 场景。

目前, 3GPP R18 中有关5G TSN 的议题主要包括: 增强 5G 网络的韧性能力,并在全球导航卫星系统(GNSS)异常

时,继续保持精确授时能力;加强5G网络与回传/业务网络的协同联动能力,进一步降低端到端(E2E)时延;与 DetNet互通,增强L3确定性能力。

## 1.4 5G TSN 面临的挑战

目前,大型智能工厂OT域对5G与TSN的融合已经提出 明确的需求,并且对相关技术指标要求很高:时间同步小于 1 us,端到端时延小于4 ms (在某些场景下甚至小于1 ms), 可靠性不低于99.999%。

5G网络的空口无线传输受环境影响很大。5G网络要实现与TSN的融合,还需要应对3个技术挑战:高精度时间同步、低时延确定性的数据转发、高可靠的传输。

由于工业互联网目前还没有统一的标准,因此5G TSN 如何与现有的工业互联网进行适配也是在实际应用中需要考 虑的。

## 2 中兴通讯5G TSN 技术创新

中兴通讯围绕5G TSN 开展了一系列深入研究,目前已 经拥有多项技术创新。其中,有些技术创新已被3GPP标准 组织采纳,有些技术创新已经在实际产品中落地应用。

#### 2.1 5G TSN 高精度时间同步技术创新

针对5G TSN业务对时钟同步精度的需求,提高5G空口的时钟同步精度是亟待解决的问题。DS-TT和NW-TT需要在指定的时间点将 TSN业务报文转发出去,如果时间不一致,将不能满足 TSN业务的转发要求。因此,在5G 网络中

除了引入IEEE 802.1AS、IEEE 1588 等时间同步机制外,还 需要增强高精度的空口授时机制,提高向UE终端授时的 精度。

为了解决上述问题,中兴通讯从两方面提出改进方法:

(1) 增强基站发送参考时钟的精度和发送方式

基站可以选择在广播或专用信令中携带参考时钟信息, 并且将参考时钟信息的粒度提升至10 ns。上述参考时钟将 全球定位系统(GPS)的开始时间(1980年1月6日0时0分 0秒)作为起始时间,或者采用Clock Type域来指示本地时 钟类型。UE与基站同步后便可获取时间信息,并将其作为 自身的时钟基准,通过计算通用精确时间协议(gPTP)在 TSN 网络入口、出口的时间差,可计算出gPTP时钟消息的 补偿值。通过这种方式,空口时钟粒度可以达到纳秒级别。 中兴通讯提出多个相关创新技术,目前已被3GPP采纳的创 新技术包括:

•广播方式采用SIB9传递时钟信息;

• 单播方式采用 DL Information Transfer 传递时钟信息。 其中, gNB 集中式网元(CU)可以请求 gNB 分布式网元 (DU)通过 periodical 或 on-demand 方式上报时钟信息, gNB DU 基于所述请求上报时钟信息给 gNB CU,以用于单播时钟 传递。

(2) 对参考时钟进行传播延迟补偿

为了进一步提高时钟同步的精度,中兴通讯在上述传递的时钟信息中引入了传播延迟补偿。当终端到基站的距离较近时,不需要Uu口传输时延补偿就能满足1us的同步需求;当终端到基站的距离较远时,需要进行Uu口传输时延补偿才能满足1us的同步需求。此外,在控制对控制的场景中,时钟同步误差应满足小于等于900 ns的需求。也就是说,两个终端的时钟是同时从核心网或者同时从GPS获取的,因此,核心网到终端或GPS到终端的单向时钟同步误差应小于等于450 ns。

为了满足空口时钟同步的精度需求,可采用两种方法进行补偿:基于时间提前量(TA)的传播延迟补偿和基于往返时间(RTT)的传播延迟补偿。其中,基于TA的传播延迟补偿适用于一般时钟精度的场景,基于RTT的传播延迟补偿适用于高时钟同步精度的场景。为了解决空口时间同步的相关问题,中兴通讯提出诸多相关创新技术,其中有些已经被3GPP采纳。

•基于TA的传播延迟补偿:UE和gNB都可以执行基于 TA的传播延迟补偿操作,UE侧的补偿则通过gNB发送的无 线资源控制(RRC)信令和广播SIB9来进行激活和去激活 操作。 •基于 RTT 的传播延迟补偿: UE 和 gNB 都可以执行基于 RTT 的传播延迟补偿操作, gNB 侧在执行补偿操作时,可向 UE 发送一个显式请求来激活 UE,并使其发送 UE Rx-Tx time difference。该请求可以是一次性的,也可以是周期性的。UE 侧需要补偿时,可通过 DLinformation transfer signal - ing来承载 gNB Rx-Tx time difference 信息。

•基于TA的传播延迟补偿和基于RTT的传播延迟补偿的选择:基站根据核心网提供的当前业务的UU接口时钟同步误差预算,来决定选择哪种方法来进行传播延迟补偿。同时,在切换过程中,源基站向目标基站通知UU接口的时钟同步误差预算信息。

此外,在5G TSN系统的实现方案中,中兴通讯在NW-TT 侧和DS-TT 侧通过采用硬件实现了IEEE 802.1AS 的报文 处理和时间戳标记,确保了5G TSN 的高精度时间同步。

#### 2.2 5G TSN低时延确定性技术创新

在空口、核心网和终端的各个环节,中兴通讯提出如下 创新技术以保证5G TSN的低时延及确定性转发。

在空口方面, 传统的配置授权 (CG) /半持续调度 (SPS) 有各自的周期, 导致数据包大多数是在延迟的情况 下发出的, 无法保证 TSN 业务流的时延和抖动。为了解决 CG/SPS 周期与业务周期不匹配的问题, 基站可依靠配置多 套 CG/SPS 等方法来进行周期调度和低时延调度, 并增强固 定 TSC 业务模式的服务质量 (QoS), 从而降低 TSN 业务流在 空口传输的时延和抖动。中兴通讯提出多个相关创新点, 其 中部分创新点已被 3GPP 采纳。

(1) gNB可以给UE配置每小区的每个子带宽(BWP): 最多8个SPS、12个CG,SPS周期单位最小可支持1Slot。

(2) 针对SPS/CG的配置方式包括:

•独立配置SPS/CG。

•为每套SPS/CG引入索引号来进行区分。

•针对同时去激活多套CG配置的需求,在RRC配置中 引入一个状态表。该状态表与下行链路控制信息(DCI)的 码点一一对应,例如0000、0001、0100等。

•同一个BWP上可以同时进行Type1、Type2的半静态 配置。

•针对CG/SPS的周期性配置,支持以Slot为单位的周期 配置(周期为1个Slot的连续整数倍)。例如,子载波带宽为 15kHz时,N最大值为640,子载波带宽为30kHz时,N最 大值为1280,以此类推。

•为每套CG/SPS配置混合自动重复请求(HARQ)Offset。

(3) 在R16中,同时引入了新的CG Confirmation 媒体接

人控制层控制单元(MAC CE)来支持多套 CG 配置。通过 配置多套 CG/SPS 来解决 CG/SPS 周期与 TSC 业务周期不匹配 的问题。

此外,核心网UPF/NW-TT侧和终端DS-TT侧均采用智能网卡技术。TSN的业务报文处理及转发全部采用硬件来实现,不需要使用软件,保证了TSN报文的低时延及确定性转发。

#### 2.3 5G TSN 高可靠连接技术创新

在5G TSN 网络中,可以通过双路径的冗余传输机制来 防止由网络故障、丢包等导致的网络服务中断和数据丢失。 这些双路径的冗余传输机制包括分组数据汇聚协议(PDCP) 复制、双N3/N9隧道、双协议数据单元(PDU)会话。为了 解决PDCP复制和双PDU冗余传输受限于终端产业链、短期 难以落地应用的问题,可采用双UE冗余双活技术来提高端 到端传输可靠性。

垂直行业对业务可靠性要求较高,5G控制面(5G-C) 断链业务保持技术可用于对业务可靠性要求高的面向业务 (ToB)场景,例如井下作业掘进机、工业园区可编程逻辑 控制器(PLC)和自动导引车(AGV)、医院查房车,铁路 编组站等。在控制面网元与用户面网元间连接中断时,该技 术可依然保障5G网络的正常使用。

除了通用的高可靠连接技术,中兴通讯提出在空口侧基 于上行Survival time 增强的提案。在触发进入Survival time 状 态的情况下,UE可以自主激活 PDCP 复制,保障业务的 QoS,提高空口的可靠性。该方案目前已经被 3GPP采纳。

## 2.4 5G TSN 闭环协同管理技术创新

确定性网络保障离不开网络资源的精细管理和协调。如 图3所示,5GTSN网络需要构建从终端到网络再到业务的全 方位监控机制<sup>[6]</sup>:

•提供端到端切片管理服务,为业务服务等级协议 (SLA)提供保障;

• 通过终端-网络-业务的端到端协同,实现按需定制 网络;

·获取网络状态、业务体验、调度效果等相关数据,实时调整业务的调度策略,构建"感知-决策-优化"的端到端闭环控制。

作为TSN逻辑网桥,5G系统将与TSN网络的CNC管理 系统协同工作,可实现5G网络的状态、能力和组网拓扑等 信息的上报,以及TSN业务流的资源需求和调度策略的接收 等。当5G网络状态改变或者发生异常时,系统可以及时通



知CNC进行策略调整。

此外,为了更进一步地优化网络,我们还可通过多维体 验质量(QoE)感知、人工智能(AI)智能分析、E2E协同 优化、按需能力定制等方式,来实现包括TSN终端和业务、 传输网络、RAN、UPF等端到端各节点间的协同优化,打造 业务流端到端畅通无阻的最优网络。

## 2.5 5G TSN 适配不同工业网络技术创新

目前的工业网络标准比较多,并没有统一到TSN,但是 对高精度时间同步、低时延、低抖动的要求是比较一致的。 中兴通讯联合业界合作伙伴,采用5GTSN架构对工业领域 非标准TSN网络进行适配,目前已经取得一定成果。

电力行业通常采用B码对设备进行时间同步。中兴通讯的UE/DS-TT支持B码输出,能够对差动保护装置配网终端单元(DTU)进行授时。UE/DS-TT通过IEEE 802.1AS获得高精度的TSN时钟,然后通过B码对差动保护装置进行授时。同时UE/DS-TT侧启用基于时间的精准门控管理,实现报文的低抖动传输。

工业 PLC 大都采用 IEEE 1588 进行时间同步。中兴通讯 增强方案实现了 IEEE 802.1AS 与 IEEE 1588 的互通,满足了 基于 EtherNet/IP 工业标准以太网对网络授时的精度需求。

## 3 中兴通讯5G TSN 端到端实践<sup>[6]</sup>

2021年中国移动、中兴通讯联合业界知名工业自动化 厂商,通过引入5G TSN 网络为智能 PLC 的实时控制提供低 时延、低抖动的确定性连接,进一步验证了5G TSN 在工业 互联网中的应用前景,具体架构框图如图4 所示。

网络侧部署的集成化云网柜可集中部署 5G 主时钟与 1588 主时钟、基带单元(BBU)、传输设备(SPN)、核心网 控制面设备、UPF/NW-TT、 TSN 交换机以及 CNC。通过 网络改造,分布在现场的 PLC 控制器被集中部署到云 网柜中。马达可通过 5G TSN 网络控制远程的伺服控制器 来驱动。UE/DS-TT 和 NW-TT侧启用基于时间的精准门 控管理,可实现报文的有界 传输,防止网络出现抖动 现象。

高精度时钟授时满足了 EtherNet/IP的精准授时需求, 授时精度的偏差在300 ns 以 内。基于时间的精准门控管 理保证了运动控制通用工业 协议(CIP)/CIP Motion 业务 报文的有界传输,网络抖动 在1 ms 以内,验证了通过5G TSN 网络进行实时运动控制 的可行性。



▲图45GTSN应用于PLC工业自动化方案的实践架构

## 4 结束语

虽然5G TSN 在工业领域的全面落地尚需时日,但是中 兴通讯一直在持续创新,与运营商和行业客户的合作日益深 化。随着端到端产业链的逐渐成熟,5G TSN 技术也将逐步 深入工业互联网领域,在万物互联时代创造不可估量的 价值。

#### 致谢

本文得到中兴通讯股份有限公司周建锋、熊先奎、戴博、 谈杰、侯晓辉、郝育鹏、徐龙的帮助,向他们表示感谢!

#### 参考文献

- [1] 雷波, 赵倩颖, 赵慧玲. 边缘计算与算力网络综述 [J]. 中兴通讯技术, 2021, 27 (3): 3-6. DOI: 10.12142/ZTETJ.202103002
- [2] WU H. Ten reflections on 5G [J]. ZTE communications, 2020, 18(1): 1–4. DOI: 10.12142/ZTECOM.202001001
- [3] 朱瑾瑜, 张恒升, 陈洁. TSN 与5G 融合部署的需求和网络架构演进 [J]. 2021, 27(6): 47-52. DOI: 10.12142/ZTETJ.202106009
- [4] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS): 3GPP TS 23.501 v16.11.0 [S]. 2021
- [5] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS): 3GPP TS 23.501 v17.3.0 [S]. 2021
- [6] 中兴通讯, 中国移动研究院. 面向工业互联网的 5G TSN 实践与展望白皮书 [EB/OL]. [2022-03-03]. https://www.zte.com.cn/china/about/news/ 20220303C2.html





**张启明**,中兴通讯股份有限公司无线架构团队资 深系统架构师;主要从事 MEC 及异构计算的研究 工作。



郑兴明,中兴通讯股份有限公司电信云与核心网 产品线产品综合方案架构师;主要从事 NFV/ SDN、5G/6G 移动核心网技术和行业应用的研究 工作。



**张寿勇**,中兴通讯股份有限公司无线TDD产品总 监;长期从事无线通信系统的研发工作,先后负 责 CDMA EVDO 系统、TD-SCDMA 3G 系统、 TD-LTE 4G 系统和5G 系统的研制;曾多次参与 和主持国家"863"计划、国家科技支撑计划等 项目,在"警用数字集群(PDT与TD-SCDMA) 通信系统关键技术研究与应用示范""基于TD-LTE 公网集群业务系统研发与验证"等一系列国

家重大科技项目研究工作中,完成了一系列创新研究和系统开发工作;拥有发明专利10余项。

# 蜂窝车联网中的物理层安全问题



## Physical Layer Security Issues in C-V2X Communication

#### 沈霞/SHEN Xia,周伟/ZHOU Wei,王志勤/WANG Zhiqin

(中国信息通信研究院,中国北京100191) (China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China) DOI: 10.12142/ZTETJ.202203014

网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detai/34.1228.TN.20220516.1519.006.html 网络出版日期:2022-05-17 收稿日期:2022-02-20

摘要:蜂窝车联网在驾驶环境中不仅对传输时延和可靠性有较高的要求,还对通信安全性有很高的要求。分析了蜂窝车联网物理层通信中的安全问题,包括边链路通信中物理层数据的恶意解析和基于终端自主资源分配模式的非正常信道占用问题。提出的专用单播通信标识和非正常信 道占用的问题监测与识别方案,可使蜂窝车联网的物理层通信安全性得到有效提升。

关键词: 蜂窝车联网; 物理层安全; 无线通信; 边链路

Abstract: Cellular vehicle-to-everything (C-V2X) has stringent requirements not only on the wireless communication delay and reliability in the driving environment, but also on the communication security. The physical layer security issues in the C-V2X communication are analyzed, including malicious detecting of physical data and abnormal channel occupation using resource allocation method based on channel sensing. Solutions through allocating dedicated scrambling ID for unicast communication and abnormal channel occupation monitoring and identification scheme are put forward to deal with those problems, respectively, and the communication security of C-V2X would thus be effectively improved.

Keywords: C-V2X; physical layer security; wireless communication; sidelink

🗙 场景通信业务需求的关键技术,也是中国目前主要推 广的车联网通信技术。该技术支持车与路边设施、车与车之 间的通信。其中,路边设施可以是基站,也可以是终端。车 和基站之间的通信类似于手机终端和基站之间的通信,即利 用上行和下行通信进行信息交互。车和车之间以及车和终端 模式下的路边设施之间的通信模式主要有两种:一种是基于 基站调度的通信模式,另一种是基于终端自主资源分配的通 信模式。对于前者,终端和终端的通信资源均由基站分配调 度,源节点在向其他终端发送数据之前需要向基站发出资源 分配请求;对于后者,终端在基站分配或者预配置的一个资 源池上侦听信道,并选择空闲或者干扰较小的信道资源发送 数据。相对来说,基站调度的通信模式可以避免终端间通信 干扰和隐藏节点下的传输碰撞问题,但是会引入较大的传输 时延;终端自主资源分配的通信模式可以让终端快速接入信 道,但是会遇到信道拥塞、传输碰撞等问题。

C-V2X经历了4G长期演进车联网(LTE-V2X)和5G新 空口车联网(NR-V2X)两个阶段,并且主要在终端和终端 之间的通信边链路(SL)上开展设计。在4GLTE-V2X中, 终端间的通信主要支持广播模式下的周期性业务;5G NR-V2X则在功能上做了进一步增强,支持广播、组播和单播 模式下的周期和非周期性业务。其中,单播还支持终端间 的信道测量反馈和传输混合自动重传请求(HARQ)反馈, 以增强单播和组播的可靠性。5G NR-V2X 同时支持多种子 载波间隔和高低频通信,传输配置更加灵活。目前,诸如 部分侦听、非连续接收(DRX)、终端间协作、中继等5G NR V2X标准正在制订当中。制订这些标准的目的是减少终 端能耗,提升终端之间通信的可靠性,增强网络覆盖。此 外,非授权频段、高频段、载波聚合等方面的增强后续也 将受到关注。

C-V2X的安全问题目前已成为车联网产业化应用的一 个焦点问题。中国在2021年9月8日正式启动了车联网身份 认证和安全信任试点工作<sup>[1]</sup>,以便为车联网中的通信设备构 建可信的"数字身份"认证和管理体系,避免非法设备的身 份伪造和安全攻击。车联网安全主要包括终端与设施安全、 网联通信安全、数据安全、应用服务安全等<sup>[2]</sup>。相应的安全 技术标准已经制定,例如《YD/T 3594-2019 基于 LTE 的车 联网通信安全技术要求》<sup>[3]</sup>等。针对 C-V2X 网联通信安全, 人们搭建了 LTE-V2X 安全架构,制定了终端设备与核心网 之间、终端与终端之间、终端与基站之间、基站与核心网之

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1807501)

间,以及核心网网元之间非接入层上的接口<sup>13</sup>和接入层中分 组数据汇聚协议(PDCP)层之上的安全技术标准。这类标 准主要通过传统加密认证的方式来构建安全可行的链接<sup>[4]</sup>。 而接入层PDCP层之下,尤其是SL上的物理层安全问题则相 对比较突出。在目前标准约定的方法中,物理层可根据应用 层的指示随机更改该层通信所使用的层 2-ID 和设备 IP 地 址<sup>[4]</sup>。然而,这种方法并不能避免物理层数据被窃取分析的 问题。本文对 C-V2X终端间通信的物理层安全问题展开深 入分析,并针对问题提出相应的解决方案。

## 1 C-V2X 物理层安全问题分析

C-V2X 物理层安全问题主要包括两个方面:一是终端 的物理层信息可以被恶意监听的终端接收并识别,二是信道 被终端恶意长期占用导致其他终端无法正常接入信道。这两 方面的安全问题在一定程度上均来源于现有技术的设计:现 有终端解析物理层信息方案导致 PDCP 层以下的物理层信息 被恶意监听,基于信道侦听的终端自主资源分配方式导致终 端高优先级业务长期抢占信道。下面我们对现有技术下的具 体物理层安全问题展开分析。

#### 1.1 C-V2X 物理层信息解析方案中的安全问题

对于 C-V2X 通信的边链路对应的物理边链路控制信道 (PSSCH)和物理边链路共享信道(PSCCH),边链路通信以 广播为主,并没有分配类似于蜂窝链路上终端专用的小区无 线网络临时标识(C-RNTI)去加扰 PSSCH和 PSCCH。在 4G LTE V2X中,具体的加扰方式<sup>[5]</sup>为:PSCCH采用以固定初 值  $c_{init} = 510$ 初始化的加扰器生成的加扰序列进行加扰, PSSCH采用初值为 $c_{init} = n_{ID} \cdot 2^{14} + n_{ssf}^{PSSCH} \cdot 2^{9} + 510初始化的$  $加扰器生成的加扰序列进行加扰。其中,参数<math>n_{ID} = \sum_{i=0}^{L-1} p_i \cdot 2^{L-1-i}, p和L分别为指示该 PSSCH 传输的控制信道 PSCCH$ 的循环冗余校验(CRC)序列的相关比特位取值和长度;参 数 $n_{ssf}^{\text{PSSCH}}$ 取值为 $t_k^{\text{SL}}$  mod 10,  $t_k^{\text{SL}}$ 为PSSCH传输所在的子帧号。 5G NR V2X中,虽然引入了单播和组播传输模式,但是 PSCCH和PSSCH的加扰方式基本延用了LTE V2X的加扰机 制。NR PSCCH采用以固定初值 $c_{\text{init}} = 1010初始化的加扰器$ 生成的加扰序列进行加扰;NR PSSCH采用初值为 $c_{\text{init}} = 2^{15}n_m + 1010初始化的加扰器生成的加扰序列进行加扰,不$ 再与PSSCH传输所在的子帧号绑定<sup>[6]</sup>。

LTE V2X 终端检测 PSSCH和 PSCCH 的基本流程为:在 网络配置的 PSCCH资源位置上采用盲检的方式检测 PSCCH, 在解扰 PSCCH上承载的边链路控制信息(SCI)之后,进一 步在 SCI指示的 PSSCH资源位置上接收检测 PSSCH,并对 PSSCH进行解扰解析。NR V2X引入了 2阶 SCI设计<sup>[7]</sup>,其中 PSCCH承载1<sup>st</sup> SCI, PSSCH承载2<sup>nd</sup> SCI。2<sup>nd</sup> SCI的格式在1<sup>st</sup> SCI中指示。终端根据检测的1<sup>st</sup> SCI的指示,在 PSSCH上先 检测 2<sup>nd</sup> SCI信息,再根据2<sup>nd</sup> SCI信息中指示的 HARQ信息检 测 PSSCH中的数据部分。在引入单播和主播之后,NR V2X 会在 SCI信息中指示目的节点层 1–ID 信息。如果检测到 SCI 中的身份标识(ID)与自身 ID 信息匹配,接收终端则会进 一步检测对应的 PSSCH,否则不做进一步检测。

在解析出物理层 PSSCH 的数据部分之后,接收终端会 将数据进一步传递给媒体接入控制(MAC)层,并识别 MAC层的包头内容。MAC层包头中也包含 ID 信息,这些信 息为源节点和目的节点层 2-ID 的部分信息。接收终端会进 一步判断该 ID 信息所配置的源节点与目的节点的层 2-ID 信 息是否匹配。如果匹配,接收终端会进一步将解析的 MAC 层数据上传给 PDCP 层,否则将丢弃数据。在不同传输模式 下,SCI 和 MAC 包头指示节点的 ID 信息会有所不同,具体 如表1所示。

由上述 PSSCH 和 PSCCH 的加扰方式以及终端检测数据 流程可知,物理层信道的解扰检测并未与源节点层 2-ID、 目的节点层 2-ID 以及组层 2-ID 实际绑定,终端仅通过接收 的 SCI 和 MAC 包头中的 ID 信息来判断是否与自身的 ID 相匹

传输模式	SCI中指示ID(层1-ID)	MAC包头指示ID
广播(LTE-V2X)	无	源节点 ID : 源节点层 2–ID 24位信息 目的节点 ID : 目的节点层 2–ID 24位信息
组播(NR-V2X)	源节点ID:源节点层2-ID <sup>1</sup> 低8位 目的节点ID:组节点层2-ID <sup>2</sup> 低16位信息	源节点ID:源节点层2-ID高16位 目的节点ID:组节点层2-ID高8位信息
单播(NR-V2X)	源节点ID:源节点层2-ID低8位 目的节点ID:目的节点层2-ID低16位信息	源节点 ID : 源节点层 2–ID 高 16位 目的节点 ID : 目的节点层 2–ID 高 8位信息

▼表1 C-V2X 中物理层节点ID 指示<sup>18-91</sup>

注1:源节点层2-ID和目的节点层2-ID应用层业务相关,通过应用层ID与层2-ID的映射关系确定。

注2:组节点层2-ID为组播模式下接收组的ID信息,应用层提供V2X组标识以确定组节点层2-ID。

C-V2X:蜂窝车联网 ID:身份标识 LTE-V2X:长期演进车联网 MAC:媒体接入控制 NR-V2X:新空□车联网 SCI:边链路控制信息

配,进而选择是否将数据进一步传递给上层。一个非目的节 点或者非组内成员的终端,也可直接将监听的单播或者组播 的物理层数据(不管是否与自身设备的层2-ID匹配)传递 给上层进行解析。一个恶意的节点可以在单播通信的连接建 立过程中利用监听获取源节点层2-ID和目的节点层2-ID的 信息,恶意占用信道资源向源节点和目的节点发送信息,干 扰正常的单播通信,如图1所示。

#### 1.2 C-V2X终端自主资源分配方案中的安全问题

LTE-V2X 和 NR-V2X 都支持终端自主资源分配方案。 该方案的基本设计思路为:源节点首先侦听信道占用情况, 在一个资源选择窗 $\left[n + T_1, n + T_2\right]$ 内基于信道侦听结果确定 一个候选资源集,然后在候选资源集中选择传输资源。其 中, n为资源选择触发时刻。候选资源集主要由源节点判断 的未被占用的信道资源组成,或者由已被占用但是测量的参 考信号接收功率(RSRP)低于设定阈值的信道资源组成。 为了保证源节点有足够的候选资源可使用,并且每个信道资 源上的业务量是平均化的, 候选资源集中的资源数量应不低 于资源选择窗中总资源数量的占比X。其中,X在LTE-V2X 中固定为20%,在NR-V2X中则可配。在资源选择过程中, 如果候选资源集的资源数量低于上述占比X,系统将会降低 判定被占用资源的RSRP阈值,将更多的资源判定为候选资 源, 直到候选资源数量达到占比要求。在资源选择过程中, 不论信道是否拥塞,发送数据的源节点都可以通过上述方法 选择到资源以用于发送数据。尽管如此,源节点的发送参数 配置仍然受到拥塞控制机制的限制。拥塞控制机制规定了不 同优先级下不同信道拥塞状态的信道占比限制情况。如果源 节点不同优先级传输选择占用的资源总量超过规定的信道占 比限制,则需要丢弃低优先级的传输,以缓解信道拥寒,减 少资源碰撞。



由此可见, 拥塞控制机制在一定程度上保证了高优先级

▲图1 恶意节点对单播通信的监测及干扰

业务的传输。为了进一步保障高优先级业务的传输,NR-V2X引入了资源抢占机制<sup>10</sup>,即高优先级业务可以抢占低优 先级业务占用的传输资源。在发送SCI指示占用的传输资源 之后,源节点在利用传输资源发送数据之前会持续进行信道 侦听。当侦听到有更高优先级业务抢占指示的传输资源时, 且测量的RSRP高于阈值,源节点则判定资源被抢占,需要 进行资源重选。因此,一般节点如果亟需接入信道而无合适 的资源选择时,可以将被低优先级业务占用的信道资源作为 候选资源。低优先级业务对应的源节点会通过信道侦听发现 资源抢占,从而退避并进行资源重选,避免传输碰撞。

在终端自主资源选择的模式下,拥塞控制机制和资源抢占机制在保障高优先级业务传输的同时也引入了一定的安全问题。例如,当某个节点拥塞控制机制出现故障或者不使用该机制,同时该节点仍处于信道拥塞环境中并且需要大量业务进行传输时,信道拥塞的程度无疑会加重,传输干扰也会增加。此外,如果一个功能故障节点或者恶意节点将其传输业务设置为最高优先级,持续地发送数据占用或者抢占信道,则在NR-V2X场景下,低优先级业务的节点在移动到功能故障节点或者恶意节点附近时就无法接入信道,功能故障节点或者恶意节点的周围就形成一个通信盲区,如图2所示。这将带来一定的安全隐患。

## 2 C-V2X 物理层安全方案设计

在本节中,我们提出相应的解决方案,以应对上述C-V2X的物理层安全问题。这些方案主要包括:单播通信中物 理层安全通信方案和在终端自主资源分配模式下可能出现的 持续非正常信道占用的解决方案。

## 2.1 单播通信中的物理层安全通信方案

在单播通信中,为了确定物理层数据只有源节点和目的 节点能解码检测,可以对业务信道PSSCH的数据采用只有 源节点和目的节点获知的专用标识进行加扰,其他周围节点



▲图2 节点非正常占用信道形成的通信盲区

技术广角

由于未获知该专用标识则无法解扰该单播业务信道。一个实 现方法就是借助基站为C-V2X通信指示用于单播通信的专 用标识。具体流程可以设计为:终端节点获取周围节点的层 2-ID信息,然后将获取的层2-ID信息连同自身的层2-ID信 息形成一个节点层2-ID列表并上报给基站,基站依据上报 的层2-ID为每两个节点之间的单播通信分配一个专用标识, 最后基站将分配的单播专用标识发送给节点。如图3所示, 假设图中源节点和目的节点的层 2-ID 分别为层 2-ID1 和层 2-ID2, 基站分别为层 2-ID1 和层 2-ID2 的节点之间的单播 通信分配一个单播专用标识(专用标识1),并告知源节点 和目的节点。源节点利用专用标识1加扰向目的节点发送的 单播通信业务信道 PSSCH, 控制信道 PSCCH 中仍采用原广 播模式下的加扰方式。源节点在PSCCH承载的SCI中直接指 示单播通信源节点和目的节点相关的ID信息(一般为节点 层2-ID的部分比特信息)。目的节点在检测到SCI中的ID信 息之后,如果和自身的ID匹配,则进一步用和源节点层2-ID1、目的节点层2-ID2对应的单播专用标识1解扰业务信 道。为节省信令开销,节点向基站上报的节点层2-ID信息 可以是24 bit 的层2-ID 的部分比特信息。由于除源节点和目 的节点之外的其他节点未获知源节点和目的节点之间单播专 用标识1,因此这些节点无法解扰业务信道PSSCH,从而无 法检测相应的单播通信物理层数据。

同样地,假设目的节点周围有一个恶意节点在SCI中指示目的节点的ID信息,并计划向其发送干扰信息。此时,即使目的节点判断该ID和自身相匹配,由于之前该节点未分配可信的单播专用标识,该目的节点仍可以不做接收检测处理。

此外,在设备准入的时候,测试终端可以作为非目的节 点对接收数据的处理单元。如果设备可以正常对相应的物理 层数据做丢弃处理,那么该设备就能满足准入条件。



▲图3 基于基站的终端间单播通信专用标识分配

信道的节点是一个移动节点,则该节点移动经过的区域周围 节点将无法接入信道或者传输会大量失败。如果这些周期节 点将移动区域的信道接入状态或者传输状态上报给网络,那 么网络可以通过历史信道拥塞程度的学习分析识别出通信故 障区域。如图4所示,Zone1至Zone6在正常状态下可以通 过历史数据识别一定车流密度下的正常信道拥塞程度。假设 一个功能故障或者恶意节点从Zone1沿着道路移动到Zone6, 则Zone1至Zone6的信道拥塞程度会在该节点停留的时间内 出现一个超预期的非正常状态,从而可判断Zone1至Zone6 区域内存在一个故障或者恶意节点。结合车流的监控,我们 可以进一步排查该节点。

在加强可信设备准入的监管方面,需要制定相应的设备 拥塞控制和资源抢占功能测试标准,以测试设备是否依据标 准中规定的拥塞控制机制配置相应的发送参数来占用信道, 是否正常根据优先级和信道测量来抢占信道,以及是否按照 标准规定配置资源抢占相关的参数,例如测试物理层SCI中 优先级配置与高层业务之间的QoS映射是否正常等。在蜂窝 覆盖区域,当基站根据用户设备(UE)上报的网络拥塞程 度更改基于基站调度模式和基于终端自主资源分配模式的资 源池配置和拥塞控制配置的参数时,系统将测试非基站连接 下的终端是否可以通过边链路及时更改相关参数配置。例

#### 2.2 持续非正常信道占用的解决方案

在基于终端自主的资源分配 模式下,功能故障或者恶意持续 超标占用信道会引起信道拥塞和 通信盲区的问题。而这一问题很 难被实时解决。对此,一方面可 以通过上报并分析识别功能故障 或者恶意节点的方式,另一方面 也可以通过加强可行设备信道准 入监管的方式来解决这类问题。

如果持续超标准非正常抢占





如,当基于终端自主资源分配模式的信道拥塞导致更多传输 依靠基站调度时,基站可以增加基于基站调度的资源池数 量,调整终端自主资源分配模式下的拥塞控制相关配置参数 (相应的参数配置需及时应用于终端间通信)。

## 3 结束语

本文介绍了 C-V2X 目前主要面临的物理层安全问题, 主要包括终端对单播通信物理层数据的检测获取,以及基于 终端自主资源分配模式的信道拥塞和非正常资源抢占问题。 对于 5G NR-V2X 中引入的单播通信问题,为避免其他终端 的监测,可以借助基站为单播通信分配专用的标识,并在设 备准入测试中测试设备对其作为非目的节点数据的处理功能 是否正常来解决。对于基于终端自主资源分配模式下的非正 常信道占用和资源抢占问题,则可以通过信道拥塞程度的监 测来识别非正常区域以及该区域中的功能故障或者恶意节 点,并借助设备拥塞控制和资源抢占功能的测试来解决。

## 致谢

感谢北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室的冯 志勇教授与尉志青副教授对本研究的指导与帮助。

#### 参考文献

- [1] 曹雅丽. 车联网身份认证和安全信任体系亟待完善 [N]. 中国工业报, 2021-09-17(3)
- [2] 董志国, 吴冬升. 智能网联汽车网络安全标准进展概述 [J]. 智能网联汽车, 2021 (4): 52-56
- [3] 工业和信息化部. 基于 LTE 的车联网通信安全技术要求: YD/T 3594-2019 [S]. 2019
- [4] 3GPP. Security aspects of 3GPP support for advanced vehicle-toeverything (V2X) services: 3GPP TS 33.536 [S]. 2021
- [5] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E–UTRA); physical channels and modulation: 3GPP TS 36.211 [S]. 2021

- [6] 3GPP. NR; physical channels and modulation: 3GPP TS 38.211 [S]. 2021
- [7] 3GPP. NR; multiplexing and channel coding: 3GPP TS 38.212 [S]. 2021
  [8] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); medium access
- control (MAC) protocol specification: 3GPP TS 36.321 [S]. 2021
- [9] 3GPP. NR; medium access control (MAC) protocol specification: 3GPP TS 38.321 [S]. 2021
- [10] 3GPP. NR; physical layer procedures for data: 3GPP TS 38.214 [S]. 2021

#### 作者简介



沈霞,中国信息通信研究院高级工程师;主要从 事5G和无线局域网(WLAN)标准技术研究工 作,参与完成IMT-2020(5G)推进组5G技术研 发试验规范制定、5G新型多址和下一代WLAN等 国家重大专项工作,对5G V2X、随机接入、NTN 等3GPP标准课题开展有深入研究;申请专利40 余项。



**周伟**,中国信息通信研究院工程师;主要从事5G的标准技术研究和仿真平台开发工作。



**王志勤**,中国信息通信研究院副院长、中国通信 标准化协会无线通信技术工作委员会主席、中国 通信学会无线及移动通信委员会主任委员,教授 级高级工程师,"新一代宽带无线移动通信网"国 家科技重大专项副总工程师;主要研究方向为无 线移动通信技术和标准。

# 多元技术深度融合的物联网 设备管理



## IoT Device Management with Deep Integration of Multiple Technologies

#### 房昕/FANG Xin,孟祥东/MENG Xiangdong

(中国信息通信研究院,中国北京100191) (China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China) DOI:10.12142/ZTETJ.202203015 网络出版地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20220620.1545.006.html 网络出版日期: 2022-06-21 收稿日期: 2021-12-23

摘要:针对物联网设备类别划分不明确、设备编码规则不统一等问题,探索一种面向多元技术深度融合的物联网设备监管新方法。提出在以应 用领域和使用场景为依据划分物联网设备分类目录的基础上,建立行业统一的编码规则,实施自愿性产品认证。从行业、市场、政府3个角度 给出未来加强物联网设备管理的发展策略。

关键词:物联网;多元技术;设备管理;统一编码;产品认证

Abstract: In view of the problems such as unclear classification of Internet of Things (IoT) devices and inconsistent coding rules of devices, a new method of IoT device supervision for the deep integration of multiple technologies is explored. On the basis of classifying the catalog of IoT devices based on application fields and use scenarios, unified industry coding rules are established and voluntary product certification is implemented. Some strategies for strengthening the management of IoT equipment from the perspective of the industry, the market, and the government are proposed.

Keywords: IoT; multiple technologies; equipment management; unified coding; product certification

## 1 中国物联网设备发展特点

## 1.1 蜂窝物联网设备数量高速增长

★ 球移动通信系统协会(GSMA)发布的报告显示,2020 年全球物联网总连接数达到131亿,预计到2025年, 全球物联网总连接数将达到240亿<sup>□1</sup>。2020年中国授权频谱蜂 窝物联网连接数13.4亿,预计到2025年将达到22.9亿<sup>121</sup>。工 业和信息化部(简称工信部)的数据如图1所示,2020年中 国蜂窝物联网连接数达到11.36亿。2021年前3季度中国蜂窝



▲图1 中国蜂窝物联网终端用户数量(数据来源:工信部)

物联网连接设备数已达到13.64亿,比2020年末净增2.29 亿<sup>[3-4]</sup>,预计到2023年底中国物联网连接数突破20亿<sup>[5]</sup>。

## 1.2 多技术深度融合创新推动物联网设备跨行业应用

中国正处于数字化转型关键期,物联网技术赋能数字经 济且广泛应用于制造业、公共服务、交通运输、医疗卫生、 能源等传统行业,推动传统产业转型优化升级。工业互联 网、车联网、智慧城市等发展势头强劲,传感器、芯片等领 域技术推陈出新,智慧农业、智慧医疗等新产品、新模式不 断涌现。这正是物联网技术与5G、大数据、人工智能、云 计算、区块链、边缘计算等技术深度融合的表现。万物互联 给人们的生产方式和生活方式创造无限变革的可能,为中国 实体经济发展带来新的生机。

#### 1.3 物联网设备种类繁多,应用场景丰富

智能门锁、智能音箱、可穿戴设备等消费物联网设备仍 占据主要市场。随着物联网技术在智慧城市、智能交通、智 能制造等领域应用的扩张,预计到2025年,产业物联网连 接数将占到总体的61.2%<sup>61</sup>。从工信部发布的数据来看,截 至2020年底,应用于智能制造、智慧交通、智慧公共事业 的终端用户占全国蜂窝物联网用户比重分别达18.5%、 18.3%、22.1%<sup>[3]</sup>。截至2021年9月末,应用于智能制造、智 慧交通、智慧公共事业的终端用户占全国蜂窝物联网用户比 重分别达17.5%、16.6%、22.4%。其中,智慧公共事业终端 用户同比增长25.5%,增势最为突出<sup>[4]</sup>。未来,物联网还将 大力应用于交通、能源、市政、卫生健康等社会治理领域, 农业、制造业、建筑业、生态环境、文旅等行业应用领域以 及民生消费领域<sup>[5]</sup>。

## 1.4 物联网设备潜在安全风险较高

近年来,酒店摄像头偷拍事件层出不穷,由人脸信息泄 露导致的人身财产侵害行为不断出现,无人驾驶汽车的安全 性引发担忧。类似问题的出现,一方面是由于物联网设备缺 乏内置风险防范功能,存在严重的安全漏洞,因此一旦遭到 病毒或恶意程序软件的攻击,用户隐私就会遭到侵犯,数据 安全无法得到保障;另一方面,物联网设备使用周期较长, 设备更新迭代速度加快,用户已购买的物联网设备软硬件无 法及时获得更新,设备老化引起产品质量有所下降,由此产 生的漏洞增加了物联网设备被攻击的风险<sup>[7]</sup>。

## 2 中国物联网设备主要监管手段

中国物联网设备监管有3种途径,分别是中国强制认证 (CCC)、电信设备进网许可和无线电发射设备型号核准。

## 2.1 CCC

CCC是原国家认证认可监督管理委员会(简称国家认监 委,2018年划入国家市场监督管理总局)根据《强制性产 品认证管理规定》制定的产品认证制度。市场监管总局最新 发布的强制性产品认证目录明确了,可连接到公共通信网 (包括公共交换电话网络/无线通信网络/公共互联网)的电 子产品需要进行强制性产品认证。物联网设备一般归类到移

## ▼表1 中国强制性认证目录中对移动用户终端的描述

动用户终端(如表1所示)进行强制性认证,主要测试项目 包括电气安全和电磁兼容等<sup>[8]</sup>。

## 2.2 电信设备进网许可

国家对接入公用电信网使用的电信终端设备、无线电通 信设备和涉及网间互联的电信设备实行进网许可制度,以保 证公用电信网的安全畅通,维护电信用户和电信业务经营者 的合法权益<sup>[9]</sup>。物联网设备进网测试项目包括网络信息安 全、射频接收性能、数据接收性能、音频性能、互联互通协 议、电磁兼容、电磁辐射、网络互通性、卡接口以及互联网 协议第6版(IPv6)等项目<sup>[10]</sup>。需要办理电信设备进网许可 的设备目录见表2。

## 2.3 无线电发射设备型号核准

无线电发射设备型号核准由工信部无线电管理局主管。 除微功率短距离无线电发射设备外,生产或者进口在中国销 售、使用的其他无线电发射设备,应向国家无线电管理机构 申请型号核准,以维护空中电波秩序,有效开发、利用无线 电频谱资源,保证各种无线电业务的正常进行,保障设备本 身无线性能<sup>[11]</sup>。设备类型主要包括公众网移动通信设备、专 用通信设备、无线接入设备、广播发射设备、雷达设备、导 航设备、卫星通信设备及其他设备八大类。测试项目主要包 括工作频率、发射功率、频率容限、占用带宽、频谱模板、 带外发射、杂散发射等发射机射频参数<sup>[10]</sup>。

## 3 物联网设备监管的主要问题

## 3.1 物联网设备监管仍存在盲区

可以看到,接入公共移动通信网中的产品需要办理 CCC,而其他无线通信产品以及由通信运营商管理维护的 用户端通信产品则无须强制认证。各类智能家居、车载智 能、健康医疗等采用Wi-Fi、蓝牙等短距离通信方式的非

产品种类及 代码	对产品种类的描述	产品适用 范围	对产品适用范围的描述或列举	说明
52.移动用 户终端 (1606)	在为社会公众服务的公共移动通 信网络中使用,实现通信功能的 各类制式蜂窝移动终端设备,包 含移动通信模块	移动用户 终端	GSM/GPRS 用户终端设备、CDMA、 CDMA1X、CDMA2000 用户终端设备、 TD-CDMA用户终端设备、WCDMA用户 终端设备TD-LTE 用户终端设备等,以及 使用以上制式的其他终端设备(包括车载、 终端台、通信模块、无线数据终端、可穿戴 设备等)	1.适用标准: GB4943.1、GB/T19484.1、GB/T22450.1、 YD/T1592.1、YD/T1595.1、YD/T2583.14 2. 不包括 PHS 收集、对讲机、SCDMA 终 端、工业环境和预定仅在室外环境中使用 的模块
CDMA. 码分多	。 GPRS·通用无线分组训络 GSM·	全球移动通信	■ ■ A PHS:小灵通 SCDMA:同步码分多址	TD-CDMA.时分码分多址 TD-ITE.时分长期

CDMA:哈尔多亚 GPRS:迪用无线分组业务 GSM: 全球移动通信系统 PHS: 小灵通 SCDMA: 同步码分多址 TD-CDMA: 时分码分多址 TD-LTE: 时分长期 演进 WCDMA: 宽带码分多址

序号	设备名称	序号	设备名称	序号	设备名称
1	电话机	10	调制解调器	19	接入网系统设备
2	移动电话	11	计费设备	20	光电通信设备
3	无线电寻呼接收机	12	数据通信终端	21	数字微波通信系统
4	程控用户交换机/调度机	13	语音设备	22	网管设备、112测试系统
5	集团电话	14	信令设备	23	数字环路设备
6	排队机	15	ISDN终端	24	智能网设备
7	电话附属终端	16	多媒体设备	25	同步设备
8	电话报警设备	17	移动通信设备	26	卫星通信设备
9	传真机	18	局用程控交换机		

技术广角

#### ▼表2 电信设备进网许可设备目录

ISDN:综合业务数字网

蜂窝类物联网产品,同样尚未纳入电信设备进网许可监管 范畴。尤其需要指出的是,大部分物联网设备采购已办理 进网许可的独立通信单元(模块),而设备本身并未办理 进网许可。另外,还有部分小规模物联网设备制造企业, 其单款产品产量小,出于成本考虑,也未办理进网许可, 因此处于监管灰色地带。这样一来,不仅物联网设备的安 全无法得到保障,也给网络系统安全和数据信息安全带来 巨大风险隐患。

#### 3.2 物联网设备类别划分不清晰

物联网设备形态及使用场景复杂多样,各企业对设备的 定义标准不统一,且不同企业对同一种功能的设备命名差异 较大。因此,无论是从监管层面还是电信运营企业层面来 看,都无法确定设备准确的形态。这给产业结构性分析和持 续性研究带来一定的困难。

#### 3.3 行业内尚未制定统一的物联网设备编码规则

蜂窝类物联网设备普遍使用国际移动设备识别码 (IMEI)进行设备标识,但设备企业通常使用独立通信单元 (模块)的IMEI号码,这使IMEI信息与终端产品信息无法 准确对应。对于非蜂窝类物联网设备,部分设备制造企业为 方便产品管理自行定义设备编码;运营商也各自建立了物联 网设备编码体系,用于设备的标识及分类管理,但在编码规 则和类别划分上存在较大差异。同时,全球也缺少对物联网 终端统一编码的标准,各个行业组织编制的物联网终端编码 并未考虑与IMEI号码的兼容性。

#### 3.4 物联网设备测试项目重叠

目前,中国移动、中国电信、中国联通3家运营商对物 联网设备入库的基本要求是获得CCC、进网许可以及无线电 型号核准证。另外,各运营商内部额外附加的测试要求有所 重叠,这都给设备企业带来一定负担,也给运营商带来了较 大的测试压力。

## 4 面向多元技术深度融合的物联网设备监管思路

近年来,行业协会作为政府与企业间沟通的桥梁,积极 履行服务、咨询、沟通、监督等组织职能。自改革开放以 来,在为政府提供咨询、服务企业发展、加强行业自律、创 新社会治理等方面,行业协会发挥着积极的作用。2015年 中共中央办公厅、国务院办公厅印发的《行业协会商会与行 政机关脱钩总体方案》出台,更是加速了"政会脱钩"改革 进程,进一步激发行业协会商会内在活力和发展动力,提升 其专业化水平和能力,推动服务重心从政府转向企业、行 业、市场。通过提供指导、咨询、信息等服务,该方案能够 更好地为企业、行业提供智力支撑,规范市场主体行为,引 导企业健康有序发展,促进产业提质增效升级<sup>1121</sup>。

2007年正式成立的电信终端产业协会(以下简称"协 会")目前承担着物联网设备的主要管理工作。通过组织企 业共同研制信息通信领域技术标准,协会支撑政府制定电信 终端管理政策,协助行业发展,规范市场行为。2017年8 月,协会成立物联网工作组,聚焦物联网终端、系统、模组 芯片等领域团体标准的制定,满足市场及创新需要。自 2020年起,协会筹备物联网设备管理体系的构建,积极发 挥行业协会建设性作用,助力物联网行业规范管理。

#### 4.1 规范统一的管理模式

物联网设备管理体系(如图2所示)以在中国境内地区 销售使用的所有物联网设备为实施对象,以团体标准为实施 基础,依据应用领域及使用场景对物联网设备进行细致分 类;通过备案生产企业信息、产品信息及产品所使用的独立



▲图2 物联网设备管理体系管理思路

通信单元(模块)的信息,为物联网设备核发统一编码,实现编码与设备的对应关系;与电信运营商建立信息共享平台,有效掌握物联网设备市场销售信息;结合自愿性产品认证,减少重复性测试,推动政府、运营商及业内市场活动过程中采信认证结果。物联网设备管理体系在减轻企业负担的同时有效提升物联网产品安全质量,满足市场需要,填补政府监管空白,促进物联网产业健康有序发展。

#### 4.2 建立物联网设备分类标准

当前,中国物联网设备分类标准主要采用《物联网设备 统一编码方法》(T/TAF 072-2020)。该方法是2020年8月由 电信终端产业协会联合中国电信、中国移动、中国联通、中 国信息通信研究院及相关企业发布的团体标准。按照应用领 域、使用场景及功能,该编码方法将物联网设备分为11个 大类、23个中类、153个小类,具体如表3所示。

#### 4.3 实行物联网设备统一编码

对于物联网设备,各厂商通常有自己的标识和分类方

式,不同厂商之间通常互不兼容。这不利于 不同厂商设备之间的相互识别和通信,也不 利于设备的管理。为便于设备监管、信息收 集、产品及服务优化以及产品互联互通能力 的提升,急需建立设备的唯一性识别号码 机制。

第一,《物联网设备统一编码方法》参 照国际通用的国际移动设备识别码(IMEI) 编码规则,提出使用物联网设备统一编码 (UIDI)标识未使用蜂窝通信技术的物联网 设备以及集成了蜂窝物联网模块的物联网设

备。UIDI由15位数字组成,每位的取值范围为0~9,分为物 联网型号分配码(ITAC)、序列号、校验码3个组成部分, 具体如图3所示。

编码规则如下[13]:

•第1~8位为ITAC,包含设备的分类信息,由发放机构(TAF)统一核发并管理。其中,前两位固定为"86", 第3~8位为设备型号识别码(DMI),用于标识设备的厂商 及型号信息。

•第9~14位为序列号 (SNR),用于厂商对同型号的不同产品进行编号。

• 第15位为校验码(CD),根据国际标准化组织(ISO)/国际电工委员会(IEC)7812-1中规定的Luhn算法 对前14位进行计算后得出,用于检验UIDI的合法性。

第二,蜂窝类物联网设备需要依据《物联网设备统一编码方法》明确设备类别并申请ITAC(申请流程如图4所示)。 通过设备IMEI与UIDI数据匹配的方式,实现每一台设备的准确标识。对于采购已获进网许可证的独立通信单元(模

设备大类	设备中类
智能家用电器类	冷藏冷冻类;洗涤类;空气调节类;烹调类;水处理类;照明类等
安防监控类	安防报警类;视频监测控制类;楼宇对讲类等
环境监控类	空气环境监测控制类;水环境监测控制类;声光环境监测控制类;综合环境监测控制类等
公共服务类	水电燃气类等
音视频类	娱乐类;传输类等
智能穿戴类	智能穿戴类等
车载终端	车载终端等
智能健康类	智能健康类等
智慧金融类	POS机;扫码终端等
网络接入类	网络接入类等
公共安全类	公共安全类等
其他	其他

## ▼表3团体标准中规定的物联网设备类别



随着政府、市场、企业、消费者对产品安全的愈加重 视,自愿性产品认证需求急剧增长。自愿性产品认证可填补 强制性认证监管空白,快速响应市场及企业的需求,促进产 品质量优化提升,提高行业管理水平<sup>[14]</sup>。

对于未纳入进网管理监管范围的物联网设备,由协会联 合第三方认证机构开展自愿性产品认证。自愿性产品认证机 制的施行,既有助于规范企业市场行为,提升产品质量安全 和市场竞争力,又对当前电信设备管理体系进行了有益补 充,能够更好地发挥行业协会职能,为政府管理提供支撑。

当前正在开展的"蜂窝物联网设备认证",就是依据团体标准《物联网设备技术要求和测试方法》(T/TAF 089-2021),针对蜂窝物联网设备在业务能力、基本性能、信息安全、互联互通、拥塞和速率控制、节电特性等方面进行的认证。蜂窝物联网设备认证的主要服务对象是蜂窝物联网设备(其使用的独立通信单元(模块)已获进网许可证)。蜂窝物联网设备认证的实施主要起到两方面的作用:一方面,结合ITAC/UIDI的核发管理及证后监督,明确物联网设备类别,支撑物联网设备监管;另一方面,有助于提升物联网产品质量性能,促进终端和网络之间的互联互通,助力产业良性发展。同时,蜂窝物联网设备认证采用轻量级测试项目,能够满足运营商入库测试要求,减轻运营商测试压力,有效避免重复测试。

## 5 进一步加强物联网设备管理的若干建议

## 5.1 行业层面

首先,应建立设备分类更新机制。需要结合市场及产业 发展需求及时对新型物联网设备尤其是融合设备类别进行更

> 新维护,为产业发展和应用拓展情况的评 估分析提供支撑。其次,丰富认证项目, 将非蜂窝类物联网设备纳入认证范畴,进 一步规范认证流程,完善认证制度,提升 自愿性产品认证质量和品牌权威性,将认 证品牌做大做优做强,增强行业认可度。 最后,推进能源系统物联网技术及产品的 融合发展。能源行业是物联网的重要应用 场景,而物联网技术在能源领域的运用过 程中,在系统稳定性、可靠性、安全性和 可控性等方面仍然存在诸多问题。规范物 联网设备在光、电、气等垂直行业的应用 迫在眉睫。



▲图3 物联网设备统一编码

块)的蜂窝物联网,同样依据《物联网设备统一编码方法》 明确物联网设备类别并申请ITAC,生成UIDI,实现设备 UIDI与模块IMEI的匹配对应。对于非蜂窝类物联网设备, 企业依据《物联网设备统一编码方法》明确物联网设备类 别,申请ITAC,完成设备标识。

第三,通过为物联网设备核发ITAC,建立IMEI/UIDI与 物联网设备的唯一对应关系,完成对系统中登记的物联网设 备的精准定位与管理,并与电信运营商共享编码数据,及时 掌握物联网设备数量、形态、网络接入量等行业发展状况。 这样可以加强物联网领域网络安全的管理,实现对物联网设 备销售、使用等市场环节的准确定位,从而为行业提供产品 信息收集与展示平台,为政府提供产业信息、市场监管等多 方面的支撑服务。

第四,设备企业在ITAC申请过程中,以自我声明的方 式向协会备案其物联网设备使用的独立通信单元(模块)的 进网许可证信息,并声明一致性。协会以低成本、低消耗为 原则随机抽取市场在售设备,以比对备案独立通信单元(模 块)信息与产品实际信息的一致性。



▲图4 ITAC申请流程

## 5.2 市场层面

首先,在设备厂商依法依规办理强制性认证的同时,对 于未纳入强制性认证范畴的设备,鼓励企业通过自愿性产品 认证的方式,规范质量管理,打造可信产品,切实履行社会 主体责任。其次,鼓励基础电信企业采信自愿性产品认证结 果,优化运营商入库流程,减轻自身测试压力。最后,鼓励 电商平台及各类型市场活动中采信自愿性产品认证结果,便 利消费者及用户甄选高质量产品。

## 5.3 政府层面

一方面,进一步转变政府职能,在监管行为实施过程 中,充分利用自愿性产品认证结果,比如在强制性认证检测 依据中采纳团体标准对物联网设备分类的结果,优化设备数 据分析结果;另一方面,加强对市场需求度高、认证制度实 施规范的自愿性产品认证品牌及认证项目的扶持力度,双管 齐下规范设备管理。

#### 参考文献

- The mobile economy 2021 [EB/OL]. (2021-06-21) [2021-12-22]. https:// data. gsmaintelligence.com/research/research/research-2021/the-mobileeconomy-2021
- [2] The mobile economy China 2021 [EB/OL]. (2021–02–12) [2021–12–22]. https://data. gsmaintelligence. com/research/research/research-2021/themobile-economy-china-2021
- [3] 2020年通信业统计公报 [EB/OL]. (2021-01-22)[2021-12-20]. https://www. miit. gov. cn/jgsj/yxj/xxfb/art/2021/art\_f2e9a4844b964586bfea3977c2e1baf2. html
- [4] 2021年前三季度通信业经济运行情况 [EB/OL]. (2021-10-20)[2021-12-20]. https://www.miit.gov.cn/gxsj/tjfx/txy/art/2021/art\_565b40118fee499ebf4331 ecd0713ac0.html
- [5]物联网新型基础设施建设三年行动计划(2021-2023年)[EB/OL]. (2021-09-27)[2021-12-20]. https://www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/wjfb/tz/art/2021/art\_ 8b6ed7ce2ba946059f6436a18e375300.html

- [6] 中国信息通信研究院. 物联网白皮书(2020年) [EB/OL]. (2020-12-25)[2021-12-20]. http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202012/t20201215\_366162.htm
- [7] 吴文博, 刘依卓. 5G 背景下物联网的应用与发展问题研究 [J]. 数字通信世界, 2021, (10):63-64+116
- [8] 市场监管总局关于优化强制性产品认证目录的公告 [EB/OL]. [2021-12-20]. http://gkml.samr.gov.cn/nsjg/rzjgs/202004/t20200428\_314776.html
- [9] 中华人民共和国电信条例 [EB/OL]. (2016-02-06) [2021-12-20]. https:// www.miit.gov.cn/zwgk/zcwj/flfg/art/2020/art\_02c93c77cf684842bd36ae66cf 8e412a.html
- [10] 肖雨,李迈,严涵琦,等.物联网终端设备测试需求分析 [J]. 大众标准化,2021 (13): 37-39
- [11] 中华人民共和国无线电管理条例 [EB/OL]. [2021-12-20]. https://www.miit.gov. cn/zwgk/zcwj/filfg/art/2020/art\_9d66759198324b83a9dfbb44eb292b79.html
- [12] 行业协会商会与行政机关脱钩总体方案 [EB/OL].(2015-07-08) [2021-12-20]. http://www.gov.cn/zhengce/2015-07/08/content\_2894118.htm
- [13] 电信终端产业协会. 物联网设备统一编码方法: T/TAF 072-2020 [S]. 2020
- [14] 曹婧,杨思宇,陈轶群. 认证机构自行开展的自愿性产品认证情况调研 [J]. 大众标准化, 2020(23):128-129

## 作者简介



**房昕**,中国信息通信研究院助理工程师;主要研 究领域为电信设备行业管理,负责团体标准及项 目管理工作,曾参与电信终端产业协会"行业认 证可行性及制度研究"项目研究。



**孟祥东**,中国信息通信研究院工程师;主要研究 领域为通信终端、物联网,曾参与电信终端产业 协会"行业认证可行性及制度研究""eSIM 行业 管理办法研究"等项目研究;发表论文4篇。

## 《中兴通讯技术》杂志(双月刊)投稿须知

## 一、杂志定位

《中兴通讯技术》杂志为通信技术类学术期刊。通过介绍、探讨通信热点技术,以展现通信技术最新发展动态,并促进产 学研合作,发掘和培养优秀人才,为振兴民族通信产业做贡献。

## 二、稿件基本要求

#### 1. 投稿约定

(1)作者需登录《中兴通讯技术》投稿平台:tech.zte.com.cn/submission,并上传稿件。第一次投稿需完成新用户注册。

(2)编辑部将按照审稿流程聘请专家审稿,并根据审稿意见,公平、公正地录用稿件。审稿过程需要1个月左右。

#### 2. 内容和格式要求

(1)稿件须具有创新性、学术性、规范性和可读性。

(2)稿件需采用 WORD 文档格式。

(3)稿件篇幅一般不超过6000字(包括文、图),内容包括:中、英文题名,作者姓名及汉语拼音,作者中、英文单位, 中文摘要、关键词(3~8个),英文摘要、关键词,正文,参考文献,作者简介。

(4) 中文题名一般不超过 20 个汉字,中、英文题名含义应一致。

(5)摘要尽量写成报道性摘要,包括研究的目的、方法、结果/结论,以150~200字为宜。摘要应具有独立性和自明性。 中英文摘要应一致。

(6) 文稿中的量和单位应符合国家标准。外文字母的正斜体、大小写等须写清楚,上下角的字母、数据和符号的位置皆应 明显区别。

(7)图、表力求少而精(以8幅为上限),应随文出现,切忌与文字重复。图、表应保持自明性,图中缩略词和英文均要 在图中加中文解释。表应采用三线表,表中缩略词和英文均要在表内加中文解释。

(8)所有文献必须在正文中引用,文献序号按其在文中出现的先后次序编排。常用参考文献的书写格式为:

•期刊 [ 序号 ] 作者.题名 [J]. 刊名, 出版年, 卷号 ( 期号 ): 引文页码. 数字对象唯一标识符

·书籍[序号]作者.书名[M].出版地:出版者,出版年:引文页码.数字对象唯一标识符

·论文集中析出文献 [序号]作者.题名 [C]//论文集编者.论文集名 (会议名).出版地:出版者,出版年 (开会年):引文页码.数字对象唯一标识符

·学位论文[序号]作者.题名[D].学位授予单位所在城市名:学位授予单位,授予年份.数字对象唯一标识符

・专利 [序号] 专利所有者. 专利题名: 专利号 [P]. 出版日期. 数字对象唯一标识符

·国际、国家标准 [序号]标准名称:标准编号 [S].出版地:出版者,出版年.数字对象唯一标识符

(9)作者超过3人时,可以感谢形式在文中提及。作者简介包括:姓名、工作单位、职务或职称、学历、毕业于何校、现 从事的工作、专业特长、科研成果、已发表的论文数量等。

(10)提供正面、免冠、彩色标准照片一张,最好采用 JPG 格式(文件大小超过 100 kB)。

(11)应标注出研究课题的资助基金或资助项目名称及编号。

(12)提供联系方式,如:通讯地址、电话(含手机)、Email等。

## 3. 其他事项

(1)请勿一稿多投。凡在2个月(自来稿之日算起)以内未接到录用通知者,可致电编辑部询问。

(2)为了促进信息传播,加强学术交流,在论文发表后,本刊享有文章的转摘权(包括英文版、电子版、网络版)。作者获得的稿费包括转摘酬金。如作者不同意转摘,请在投稿时说明。

(3)编辑部地址:安徽省合肥市金寨路 329 号凯旋大厦 1201 室,邮政编码: 230061。

(4) 联系电话: 0551-65533356, 联系邮箱: magazine@zte.com.cn。

(5)本刊只接受在线投稿,欢迎访问本刊投稿平台: tech.zte.com.cn/submission。



## 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、王会涛、 熊先奎、赵亚军、赵志勇、朱晓光

双月刊	1995	年创刊	总第	164 期
2022年	6月	第 28 卷	\$第3	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:蒋贤骏 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: 2022年6月25日 中国标准连续出版物号: <u>ISSN 1009-6868</u> CN 34-1228/TN 定价: 每册 20.00 元