

5G-A 毫米波移动通信产业现状与 应用挑战

Analysis for 5G-A Millimeter Wave Mobile Communication Industry Status and Application Challenges

高 帅,李福昌,张忠皓,马静艳(中国联通研究院,北京 100048)

Gao Shuai, Li Fuchang, Zhang Zhonghao, Ma Jingyan (China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China)

摘 要:

国内毫米波产业链趋于成熟,但在后续的场景应用和自主可控性方面仍面临挑战,亟需明确研究方向及产业化发展方向。介绍了毫米波技术的优缺点,详细阐述毫米波通信的产业化进展,并基于 5G-Advanced 毫米波关键应用场景需求,探讨毫米波通信技术的未来研究和发展方向。

关键词:

5G-A;毫米波移动通信;产业现状;应用挑战

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.01.006

文章编号:1007-3043(2025)01-0033-06

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

The domestic mmWave industry chain has approached maturity, challenges remain in the application of scenarios and the autonomy of technology control, necessitating a clear understanding of research and application challenges, as well as the direction of industrial development. It introduces the advantages and disadvantages of mmWave technology, elaborates on the progress of mmWave communication industrialization, and discusses the future research and development directions of mmWave communication technology based on the key application scenario requirements of 5G-Advanced.

Keywords:

5G-Advanced; Millimeter mobile communication; Industry status; Application challenge

引用格式:高帅,李福昌,张忠皓,等. 5G-A 毫米波移动通信产业现状与应用挑战[J]. 邮电设计技术,2025(1):33-38.

0 引言

随着 5G-Advanced (5G-A) 商业化的推进,8K、XR、无人机和工业数字化等新业务对移动网络的容量、感知精度和时延等的要求日益提高,仅靠 Sub 6 GHz 频段无法满足这些需求。毫米波相较于 Sub 6 GHz 频段具备更大带宽、更高速率、更低时延等优势,但毫米波仍面临覆盖受限、产业链不成熟、高低频综合解决方案未落地等挑战^[1-8]。针对这些挑战,需提出针对性解决方案,助力 5G-A 移动通信产业的发展。

本文介绍国内外毫米波技术的关键技术特性的

研究现状,并从毫米波频谱划分、标准制定、技术进展和应用场景等方面展望毫米波的产业化进程,为 5G-A 时代的移动通信价值创造和数字经济活力的持续提升奠定基础。同时,针对毫米波频段的研究及应用挑战,本文研究分析了毫米波在覆盖增强和可靠性提升等方面的性能,为毫米波技术在商用场景中的高效使用提供理论支撑。

1 毫米波技术研究现状

1.1 毫米波优势特性

1.1.1 大带宽

国内 IMT-2020 主要测试毫米波 n258 频段 (24.75~27.5 GHz,共 2.75 GHz 带宽)。对于公网服务,

收稿日期:2024-12-16

国内毫米波网络上下行均可支持800 MHz总带宽。对于专网服务,IMT-2020(5G)推进组中关于专网毫米波基站设备的技术要求下行必选支持600 MHz总带宽,上行必选支持400 MHz总带宽。毫米波网络的带宽为Sub 6 GHz频段的2~4倍(考虑中国电信和中国联通共建共享)。

1.1.2 超高速率通信能力

当前3.5 GHz频段低频3载波下行峰值速率约为5 Gbit/s,无法满足5G-Advanced万兆无线网络构建需求。毫米波凭借超大带宽的优势,具备超高速率的通信能力。在IMT-2020测试中,MU-MIMO、4T4R、DDDSU帧结构、256QAM配置下的高低频组网架构的下行网络峰值速率可达10 Gbit/s,MU-MIMO、4T4R、DSUUU帧结构、64QAM配置下的高低频组网架构上行网络峰值速率可达7.2 Gbit/s以上,满足5G-A万兆无线通信的高速率需求。

1.1.3 低时延

毫米波120 kHz子载波间隔的时隙(slot)长度为0.125 ms,而Sub 6 GHz(如3.5 GHz)30 kHz子载波间隔的时隙长度为0.5 ms,为毫米波时隙长度的4倍。在

不开启超高可靠与低时延通信(Ultra-reliable and Low Latency Communications,uRLLC)功能时,Sub 6 GHz频段业务面时延 ≥ 4 ms,而在基于毫米波用户面ping包的时延测试中,32 B小包ping包的最小时延为2.8 ms,1 500 B大包ping包的最小时延为3.5 ms,相比Sub 6 GHz更易满足XR、工业机器人等低时延敏感型业务的低时延需求。

1.1.4 灵活帧结构

5G-A时代的安防监控、3D质检等行业对大带宽上行的需求日益增长,需要更灵活的资源配置和协同融合的弹性网络。中国联通在2019年提出毫米波的灵活帧结构,如图1所示,包括DDDSU、DSUUU、DDSUU 3种帧结构。可根据公、专网不同时间、区域的差异化的业务需求灵活调整帧结构。半静态帧结构调整方式需要基站重启后终端采用新型帧结构重新接入,具有3~5 min的切换时延。动态调整方式基于下行链路控制信息(DCI)动态调度调整帧结构,实际测试时延低于1 min,对端网技术实现及干扰协调要求高。

1.1.5 大规模天线和波束赋形

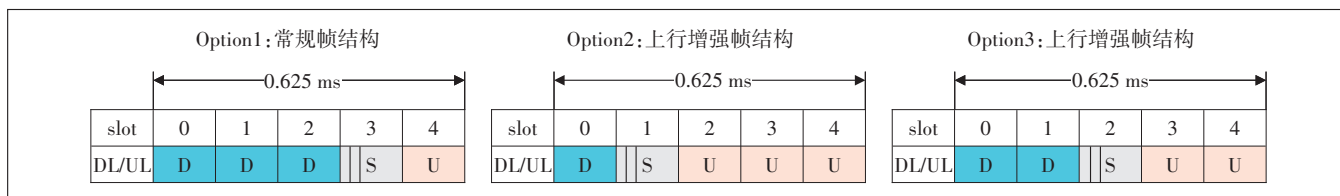


图1 毫米波灵活帧结构

大规模天线技术(Massive MIMO)通过形成窄波束来增强覆盖,而波束赋形技术通过降低干扰提升信噪比。全数字波束赋形能提升系统性能,但会增加射频链路数量,导致功耗和成本上升;模拟波束赋形成本较低,但性能和空间分集效果有限。因此,毫米波系统普遍采用混合波束赋形架构,如图2所示,在波束赋形性能、硬件电路/芯片成本和系统功耗等方面达到综合性能最优。在混合波束赋形架构下,端网侧需维护用于上下行传输的波束对,并进行波束管理。波束管理包括扫描、测量、上报、指示和恢复等步骤,其中波束失败与恢复的过程如图3所示。在IMT-2020测试中,1 000+天线阵子的毫米波基站其等效全向辐射功率(EIRP)较512阵子基站的EIRP提升约3 dB。毫米波波束赋形后的SSB宽波束数量为16~32个,窄波束最高可达100多个。终端在不同移动速率下波束切

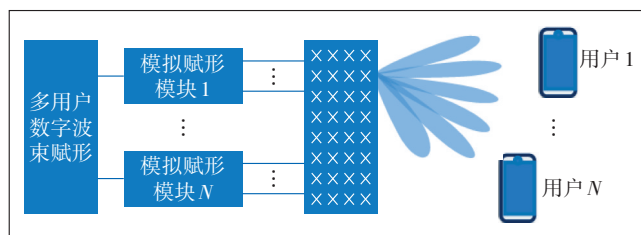


图2 混合波束赋形结构

换均能保持吞吐量稳定,从而验证了毫米波波束管理技术的成熟度。

1.1.6 高精度感知

毫米波大带宽通感技术相比Sub 6 GHz更有助于识别小型物体和精准定位人及物体的路径轨迹。如式(1)所示,距离分辨率 R_{res} 与感知带宽 B_{ss} 成反比关系,其中 c 为光速。表1所示为角度分辨率与感知带宽的关系,3.5 GHz频段100 MHz带宽的理论感知距离分

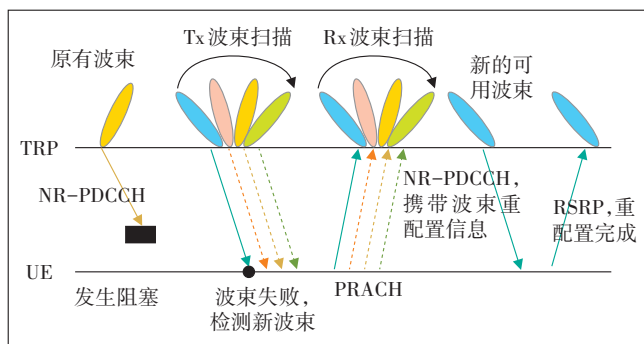


图3 波束失败和恢复流程

表1 角度分辨率与感知带宽的关系

带宽/MHz	距离分辨率/m
100	1.50
200	0.75
500	0.30
800	0.19
1 000	0.15
2 000	0.075

分辨率为1.5 m,毫米波800 MHz带宽的理论感知距离分辨率为0.19 m,精度达分米级。

$$R_{\text{res}} = \frac{c}{2B_{\text{sw}}} \quad (1)$$

感知角度分辨率 A_{res} 的计算如式(2)所示:

$$A_{\text{res}} = \frac{0.886\lambda}{D} \quad (2)$$

其中 D 为天线阵列孔径, λ 为波长,3.5 GHz的波长为0.086 m,26 GHz的波长约为0.01 m。由式(2)可知,频段越低波长越大,要达到相同的角度分辨率,对应的天线尺寸越大,因此相同口径面下,26 GHz毫米波角度分辨率约为3.5 GHz角度分辨率的8.6倍。

借助毫米波高精度感知及大带宽能力,可满足无人机监管、车路协同、灾害预警、医疗康养的感知及通信需求。在实际测试中,基于毫米波频段的通感测试可达到分米级感知精度。

尽管毫米波技术具有显著优势,但由于其高频的特性,其也存在一些覆盖受限及高穿透损耗等方面的挑战,这些挑战需要在实际网络部署中充分考虑,从而降低毫米波在公、专网中的性能损失,使毫米波技术能够在实际应用中发挥其最大带宽、容量、低时延等潜力。

1.2 毫米波技术缺点

1.2.1 高路径损耗

根据3GPP TR 38.901中规定的0~100 GHz无线电波在城市区域内直射路径的损耗模型:

$$PL_1 = 28.0 + 22 \lg d_{3D} + 20 \lg f_c \quad (3)$$

由式(3)可知,自由空间损耗 PL_1 与载波频率 f_c 成正相关。在相同发送功率配置下,毫米波的理论通信覆盖距离也远小于5G低频设备。以26 GHz和3.5 GHz为例,比较和评估高频毫米波段与5G sub 6 GHz低频频段的传播路损差异,结果如图4所示,假设 f_1 与 f_2 分别代表高低频载波,则频点带来的路损差值为 $20 \times \lg(f_1/f_2)$,计算可得26 GHz载波比3.5 GHz载波路损高 $20 \times \lg(26/3.5) \approx 17.42$ dB,也即在发射天线和接收天线增益不变的情况下,3.5 GHz载波的理论传播距离是26 GHz载波理论传播距离的 $10^{17.42/20} \approx 6.2$ 倍。

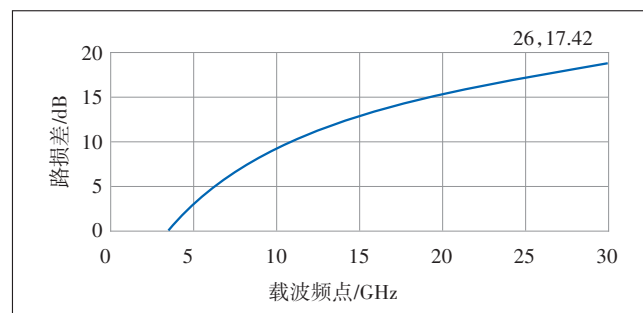


图4 不同毫米波频点相比3.5 GHz频点的路损差

在实际测试中,对比26 GHz与3.5 GHz频段在LOS路径上的下行拉远覆盖距离,在毫米波DDDSU帧结构配置下,26 GHz手持原型终端与3.5 GHz手机在直射(LOS)路径的上行覆盖距离均超过1 600 m,但3.5 GHz频段的上行拉远掉线距离比26 GHz的上行拉远掉线距离远170 m。在实际组网中,叠加复杂的环境遮挡、非直射(NLOS)等因素,26 GHz频段的实际覆盖距离会进一步降低。

1.2.2 高穿透损耗

毫米波在传播过程中容易受到降雨、树丛以及其他遮挡物的遮挡与吸收,毫米波基本无法穿透传统混凝土承重墙。此外,不同降雨量和雨水密集程度对毫米波速率也有不同程度的影响,不同遮挡物、不同情况的毫米波穿透损耗相关测试结果如表2所示。

在26 GHz毫米波与3.5 GHz的穿透对比测试中,

表2 毫米波穿透不同材质的损耗

树冠(直径4 m)/dB	人体(单侧/周围)/dB	混凝土承重墙/dB	木门(5 cm)/dB	普通玻璃门/dB	房车车体/dB
20	11~28	无法穿透	6	5	1 723

3.5 GHz穿透树木的损耗比毫米波约低10 dB、穿透人体的损耗比毫米波约低5 dB、穿透玻璃的损耗比毫米波约低2.5 dB,且3.5 GHz可以穿透混凝土墙。由此可见,在室外组网时,毫米波在面对玻璃、车辆、人体等常见遮挡物时较3.5 GHz的穿透损耗更大,从而导致毫米波覆盖距离较3.5 GHz进一步缩小。

在公网部署初期,应考虑毫米波以热点覆盖为主,在室外覆盖时应优先将毫米波部署在直射LOS场景或近似LOS场景下,如大型露天体育场、机场、大型广场等,搭配其他中低频移动通信系统保证接收终端的通信质量,并需要充分考虑恶劣天气如雨、雪、雾对毫米波的影响。此外,毫米波外场测试中验证,非直射NLOS场景比LOS场景下的SSB RSRP衰减10~14 dB,因此可以判定毫米波适合部署在信号反射丰富的室外NLOS场景,如商业区、写字楼、商业街、工厂等。在室内覆盖方面,由于毫米波无法穿透混凝土墙,且穿透玻璃时具有较高损耗,因此采用毫米波室外穿透室内进行覆盖时,只能满足室内浅层或楼宇楼道等入口处的覆盖需求,楼宇内的毫米波室内深度覆盖还需要采用毫米波室内分布式一体化微站进行覆盖。同时,室内组网时尽量在开阔无遮挡环境部署基站。

2 毫米波移动通信产业化进程

2.1 毫米波频谱分配及使用现状

国际电信联盟(ITU)在2019年将24.25~27.5 GHz等毫米波频率标识为用于全球5G及国际移动通信系统(IMT)未来发展。3GPP RAN4工作组牵头开展FR1(450 MHz~6 GHz)、FR2-1(24.25~52.6 GHz)、FR2-2(52.6~71 GHz)相关频段的标准讨论与制定。

欧美、日、韩等国家已率先开展高频毫米波频段的拍卖及商用部署,我国也积极探索高频毫米波技术。2017年,中国工业和信息化部批复24.75~27.5 GHz和37~42.5 GHz频段用于我国5G技术研发毫米波实验频段,从2019年开始,IMT-2020(5G)推进组持续组织开展毫米波内外场试验验证工作。

2.2 国内外毫米波行业标准研究现状

3GPP在5G NR标准框架中为Sub 6 GHz和毫米波频段提供统一的技术规范,其中在Rel-15至Rel-18版本定义了毫米波的关键技术参数,包括子载波间隔、载波带宽等,此外在Rel-17版本中研究FR2-2频段(52.6~71 GHz),在Rel-18版本中引入基于AI/ML的波束管理优化。目前,在Rel-19版本中,3GPP进一步讨

论采用AI增强毫米波的可靠性和移动性。在国内,IMT-2020(5G)推进组制定了公、专网场景下的毫米波端网设备要求及测试方法等规范,CCSA也开展了毫米波宏站和终端设备的技术及测试规范制定工作,为毫米波端网设备正式商用做准备。

2.3 国内外毫米波基站设备演进现状

国内外主流厂商已推出室外宏站、微站以及室分一体化微站设备,可实现3.5 GHz+26 GHz高低频组网,提供超过10 Gbit/s的下行容量和超过7.2 Gbit/s的上行容量,符合3GPP Rel-16协议。设备后续发展趋势主要集中在高带宽聚合、高阶MIMO层数、高EIRP输出和融合能力提升。针对毫米波高精度定位和高可靠性提升,以及引入3GPP Rel-17、Rel-18的功能等方面,目前仍需进一步推动其研发和验证工作。

2.4 国内外毫米波终端及芯片发展现状

根据GSA报告,全球已有65家以上终端供应商推出5G毫米波终端设备,包括智能手机、客户终端设备(CPE)、电脑等。国内如MeiG等厂商也推出可商用毫米波终端。在芯片模组方面,高通X75芯片已正式商用,X80芯片也已于2024年MWC发布。国内在高频功率放大器、低噪声放大器、滤波器等关键器件的研发方面也取得进展,但在材料工艺成熟度上与国际领先企业仍有差距。

2.5 毫米波关键应用场景展望

截至2023年8月底,中国5G基站总数达404.2万个。在公网方面,5G网络利用率仍处于提升阶段;在专网工业场景方面,仅靠3.5 GHz频段无法满足部分Gbit/s+的大上行、高精度定位、超低时延等场景需求。同时,中国宽带业务飞速发展,截至2023年9月底,我国已建成开通光纤到户(FTTH)端口10.8亿个,光纤网络基本通达全国现有行政村,因此目前采用毫米波FWA作为无线宽带接入的方式仅适合光纤不易达的极个别场景。结合毫米波优缺点,毫米波可主要用于5G-A热点大容量及XR场景、感知定位、工业互联网(大上行+工业超低时延)三大典型场景。

a) 大容量及XR场景。现网5G流量分布不均衡,无线侧局部热点区域(如购物中心、交通枢纽)的PRB利用率达80%至90%,对千兆无线网下行造成压力,亟需增强无线网络能力,毫米波是实现无线网络扩容的首选频段。万兆网发展过程中,将持续赋能全新视听体验变革。为满足XR/裸眼3D新业务的业务需求,实现8K及90FPS舒适沉浸式体验,需要300~500 Mbit/

s的速率,要达到16K及120FPS愉悦体验要求,则需要1 Gbit/s的速率。因此,XR等新业务规模化应用的发展需要借助大带宽大容量的毫米波来实现。

b) 感知定位场景。在无人机轨迹跟踪导航、辅助自动驾驶等场景中,对感知精度的需求已达到分米级,目前仅靠Sub 6 GHz无法满足要求。由1.1节可知,毫米波频段具备高感知精度及低杂波特性的,因此是建立通感专网的理想选择。通过结合毫米波与中频的多频协同感知方案,可满足高感知精度需求。同时,在工厂中的AGV小车等应用需要厘米级高精度定位服务,而传统的超宽带、蓝牙、激光和红外等定位技术和方案很难满足此要求,且传统定位技术无法与工厂中的通信技术融合管理。业界开展了基于Sub 6 GHz NR的定位测试,3.5 GHz频段的室内定位精度达到米级,而26 GHz大带宽毫米波理论上可达厘米级的定位能力。因此,毫米波网络同样适用于室内高精度定位场景。

c) 工业互联网场景。工业场景的多样化需求涵盖对低延迟和高可靠性至关重要的业务,如机器人控制和柔性产线,以及需要大上行容量的应用,例如3D质检和机器视觉。对于大上行应用,如钢板检测需要22~24个摄像机进行视频上传,上传速率需求达3.7~5.5 Gbit/s,仅靠目前5G单一频率能力无法满足。此外高精度运动控制、柔性产线增强等业务要求端到端时延低于4 ms,需毫米波来满足。因此,结合NR低频、RedCap和毫米波的工业专网解决方案,能够支持室内可靠性、大上行带宽和低延迟连接等特性,满足工业场景的综合性需求。

3 毫米波通信研究与应用挑战及发展方向

3.1 毫米波通信研究与应用挑战

3.1.1 打造万兆无线网需增强高频无线覆盖

毫米波频段的宽带特性使其成为大容量场景下的理想选择,但其高路径损耗和穿透损耗也带来覆盖挑战,影响服务体验。此外,众多手机的发射功率远小于基站设备发射功率,导致上下行覆盖不平衡,毫米波网络上行覆盖能力较下行覆盖能力更受限。目前,毫米波覆盖难题导致其商用主要集中在FWA和eMBB局部热点场景,尚未实现5G-A时代所需的连续组网,限制毫米波公网规模化部署商用。

3.1.2 实现高精度通感服务需推进产业链成熟

为实现高精度的通感服务,需进一步提升产业链

的成熟度。尽管通感技术发展迅速,但在技术方案、标准制定、设备产业和应用落地等方面仍有待完善。3GPP仍处在通感技术的需求研究和仿真阶段,尚未有标准化的方案设计。基站设备尚处于原型阶段,且在复杂场景下的多用户高精度感知需求,尚未被完全满足。

3.1.3 实现数字工业化需要打造综合解决方案

数字工业化对毫米波技术提出明确需求,但目前缺乏一个融合NR中频、RedCap和毫米波的综合解决方案,以及该综合解决方案在复杂工厂环境中的具体业务需求的落地应用。毫米波的易遮挡特性也要求对毫米波专网部署的可靠性进行进一步研究和验证。

3.1.4 沉浸式媒体业务较少,影响毫米波网络规模化发展

沉浸式媒体业务,如XR和裸眼3D视频,对毫米波公共网络的规模化发展影响较大。目前,XR设备的通信方式主要依赖有线连接或家庭Wi-Fi网络连接,缺乏支持毫米波直连的设备,设备能力方面也尚未能使用户达到完全沉浸式体验,且业务平台尚未出现创新形式或“杀手级”应用。

3.1.5 高频芯片器件的自主可控率较低

对于毫米波基站设备高速高精度的数模及模数转换芯片、高频功率放大器、低噪声放大器、滤波器、集成封装天线等方面,目前国内在技术原型方面已取得进展,但在材料工艺成熟度上与国际领先企业仍存在较大差距。在毫米波终端SoC芯片和射频芯片方面,要达到自主可控还有一定的困难。

3.2 毫米波通信研究及发展方向探索

3.2.1 推进高频覆盖增强技术研究

为了弥补毫米波自身的高损耗易遮挡的劣势,需进行毫米波+RIS、超大规模天线、低频辅助高频等毫米波覆盖增强方案研究与验证,促使高频与Sub 6 GHz低频(如3.5 GHz)实现共站址覆盖。基于RIS的覆盖增强方案需研究低成本、可控波束管理等特性的方案及设备,基于大规模天线阵列的覆盖增强方案需研究MIMO增强、波束管理及设备研发,基于高低频协同的方案需要基于NR-CA和NR-DC 2条技术路径,利用低频覆盖增强解决毫米波上下行覆盖不平衡问题,研究覆盖增强技术及端网实现。高低频NR-DC组网可将上行数据承载到低频,高低频NR-CA组网可将上行数据+上行链路控制信息承载到低频,在毫米波弱覆盖区域,可以采用低频段提供无线通信服务,保障业

务的连续性。此外,在NR-CA组网时,毫米波频段的上行控制信息可以只承载在Sub 6 GHz上(1PUCCH方案),进一步扩展毫米波覆盖。

3.2.2 推进通感端网产业链成熟

通过完善理论、架构设计、端到端研发、外场验证4步推进通感产业链的成熟。需完善通感理论,构建成熟的指标体系。然后通过空口方案、站间交互方案、核心网方案等端到端架构相关方案研究,推进通感技术标准化成熟。最后,结合智能化,进行成熟可商用的通感融合基站、终端、核心网等设备研发,面向无人机监管、边路协同等高精度感知场景进行端网验证,逐步推动商用落地。

3.2.3 推进多频协同综合专网解决方案落地

推进基于NR Sub 6 GHz、NR RedCap、毫米波3种技术融合的综合解决方案的研究落地,在保障毫米波大吞吐量、超低时延性能的前提下,研究实现毫米波的高可靠方案,推动基于厂房内、产线上的NR综合解决方案的落地实现。同时,面向公专网同频不同帧结构的混合部署现状,基于公专网完全隔离、部分隔离等场景,研究验证同频异帧结构的干扰消除方案,减少、规避公专网干扰。

3.2.4 推进XR、裸眼3D业务创新

联合端、网、应用产业链上下游,在设备方面推动研发支持NR高频毫米波直连的、用户沉浸式体验佳的XR及裸眼3D终端设备。在网络方面研究并实现XR等超高清内容新型压缩编码方案及支持XQI、QoE评估的XR业务感知和业务保障方案,研究基于3GPP Rel-18~Rel-19的XR方案落地实现。在内容方面联合内容提供商创新打造覆盖娱乐、经济、生活、工业、教育等多样化的沉浸式媒体新业务。

3.2.5 推动高频设备/终端芯片器件完全自主可控

通过整合产业界的基础研究成果和实际应用需求等产学研合作,逐步提升国内芯片器件的成熟度,提高高频器件材料工艺成熟度。重点关注数模及模数转换芯片、高频功率放大器、低噪声放大器、滤波器以及集成封装天线等关键技术的研发和应用,并进行端、网设备集成,通过迭代式现网验证提示芯片器件成熟度,最终实现毫米波关键芯片、器件的自主可控。

4 总结

毫米波通信技术作为5G-Advanced的关键赋能技术,以其独特的大带宽、低时延、灵活部署能力和高精

度感知等特性,日益展现出满足XR、低空经济、智慧交通、数字制造等前沿领域业务需求的潜力。随着国际与国内产业链在毫米波技术、标准化、终端与网络设备等方面的持续成熟,毫米波网络将在公网部署、专网应用、通感技术、XR业务创新以及关键技术的自主可控等领域实现重要突破,逐步构筑起下一代移动通信的坚实基础。本文介绍了毫米波的优缺点,并通过毫米波频谱现状、标准进展、基站及终端/芯片发展现状来分析毫米波移动通信产业链发展现状,探讨了毫米波的关键应用场景。同时,面向毫米波的商用前景,分析了毫米波通信研究及应用的挑战,并针对性地给出了研究及发展方向的建议。

参考文献:

- [1] RAPPAPORT T S, SUN S, MAYZUS R, et al. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! [J]. IEEE access, 2013(1):335-349.
- [2] RANGAN S, RAPPAPORT T S, ERKIP E, et al. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges [J]. Proceedings of the IEEE, 2014(3):366-385.
- [3] XIAO M, MUMTAZ S, HUANG Y, et al. Millimeter wave communications for future mobile networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(9):1909-1935.
- [4] HOSSAIN E, HASAN M. 5G cellular: key enabling technologies and research challenges [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2015, 18(3):11-21.
- [5] YANG G, XIAO M, AL-ZUBAIDY H, et al. Analysis of millimeter-wave multi-hop networks with full-duplex buffered relays [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2018, 26(1):576-590.
- [6] RANGAN S, RAPPAPORT T S, ERKIP E. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(3):366-385.
- [7] MOHYUDDIN W, WOO D S, CHOI H C, et al. A practical double-sided frequency selective surface for millimeter-wave applications [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(2).
- [8] LI X, ZHU Y, XIA P. Enhanced analog beamforming for single carrier millimeter wave MIMO systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(7):4261-4274.

作者简介:

高帅,工程师,硕士,主要研究方向为5G-A/6G高频毫米波、QoE、AI/ML等;李福昌,教授级高级工程师,博士,国家知识产权局中国专利审查技术专家,主要从事移动通信及固网移动融合等专业的标准制定、测试验证、课题研究等工作;张忠皓,教授级高级工程师,博士,北京邮电大学兼职教授,主要从事移动网无线新技术相关课题研究、标准制定、设备验证和新业务研究工作;马静艳,工程师,博士,主要研究方向为太赫兹、毫米波、5G通信等。