

5G-Advanced: 面向未来的持续技术演进

5G-Advanced: Future Oriented Continuous Technology Evolution

薛松岩, 庞继勇, 汪少波, 高全中 (上海华为技术有限公司, 上海 201206)

Xue Songyan, Pang Jiyong, Wang Shaobo, Gao Quanzhong (Shanghai Huawei Technologies Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

摘要:

随着 5G 网络在全球范围的大规模商用部署, 运营商正在依托 5G 网络的优异性能兑现商用价值。预计到 2025 年底, 全球范围内的 5G 基站部署量将突破 650 万, 为全球 58% 以上的人口提供累积 1 000 亿次的链接服务。从产业发展驱动角度看, 5G 网络被认为是个人消费体验升级和工业数字化的关键使能技术, 并将长期在全球经济发展中扮演重要角色。从技术演进角度看, 新兴业务的出现对 5G 网络提出了全新的需求, 从而推动着产业界持续思考 5G 的持续演进, 即 5G-Advanced。

Abstract:

With the global commercialization of 5G network, operators are relying on the excellent performance of 5G network to realize commercial value. It is expected that more than 6.5 million 5G base stations will be deployed until 2025, which will provide 100 billion link services for more than 58% of the global population. From industry development perspective, 5G is considered as a key enabling technology for upgrading personal consumption experience and industry intelligence, and will keep playing an important role in global economic development in the long term. From technology evolution perspective, various emerging services pose new requirements for 5G networks, so as to promote the industry to continuously think about the continuous evolution of 5G, that is, 5G-Advanced.

Keywords:

5G; NR; Wireless communication network; 5G-Advanced

引用格式: 薛松岩, 庞继勇, 汪少波, 等. 5G-Advanced: 面向未来的持续技术演进[J]. 邮电设计技术, 2022(8): 17-22.

关键词:

5G; NR; 无线通信网络; 5G-Advanced

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2022.08.004

文章编号: 1007-3043(2022)08-0017-06

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):



0 引言

20 世纪 80 年代以来, 无线通信系统的发展经历了 5 个主要代际。从 1G 到 5G, 无线技术本身取得了巨大的发展, 同时也对各行各业产生了潜移默化的影响。近年来, 随着 5G 通信系统在全球范围内的大规模商用, 万物互联、万物智联正在逐渐走进千家万户, 并改变人们的日常生活方式。3GPP 于 2016 年开始 5G 的标准化工作。ITU 也确定了 5G 的三大应用场景, 包括增强移动宽带(eMBB)、大规模机器类型通信(mMTC)

和超高可靠性低时延通信(uRLLC)^[1-2]。

过去的几年里, 5G 网络正在以前所未有的速度在全球部署和商用, 引发移动数据流量的爆炸式增长。预计到 2025 年底, 全球范围内的 5G 基站数将突破 650 万, 为全球 58% 的人口提供累积 1 000 亿次的链接服务。5G 网络大规模部署的同时, 也在潜移默化地影响个人消费体验和工业数字化进程。预计到 2025 年, 高清视频和增强现实(eXtended Reality, XR)业务催生的个人用户每月流量需求将达到 50G~100G, 2030 年最高将超过 250G。与此同时, 港口、钢铁等 5 000 多个 5G 工业数字化试点项目也已初具规模^[3]。面向未来, 业内普遍认为在 2030 年之前 5G 仍将是最主要移动通

收稿日期: 2022-06-30

信技术,并将持续服务到2040年左右。因此,5G系统的持续演进和增强就变得尤为重要。华为在2020年11月提出了5.5G的愿景,在2021年4月举行的3GPP第46次PCG会议上,5G演进被正式命名为5G-Advanced^[4-5]。

本文首先介绍5G-Advanced的驱动力和主要应用场景。其次,详细介绍5G-Advanced的潜在技术方向。最后,将会对5G-Advanced的标准路线图进行梳理并总结全文。

1 驱动力和应用场景

1.1 驱动力

虽然5G发展迅猛,但是和历代移动通信技术一样,5G也需要实现代际内技术的不断演进,5G演进的驱动力可以总结为商业驱动和技术驱动2个方面。

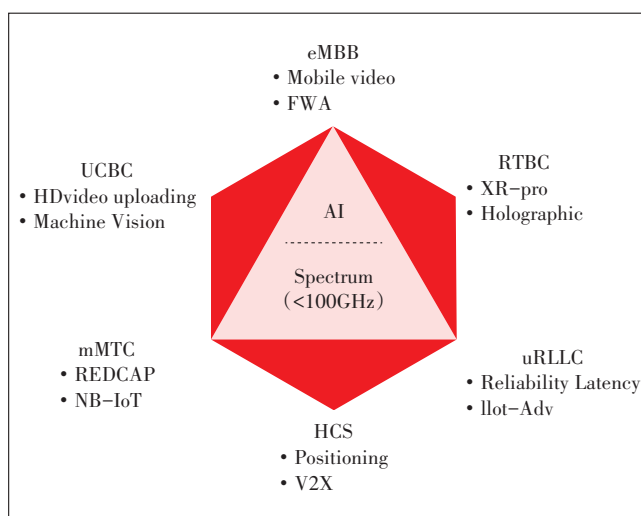
从商业驱动角度来看,5G已经进入商用的关键阶段,在ToC市场上有上亿用户,在ToB市场上也进入了更多垂直行业。在不断的产业实践过程中,5G技术本身也暴露出了一些问题,需要进一步改进才能持续释放商用价值。例如,普通消费者用户只能感受5G带来的网速提升,缺少杀手级应用使得5G相比4G的代际升级并不明显。在未来几年,XR类业务将有机会成为主流,以弥补5G在消费者业务类型上的欠缺。面向ToB市场,主要业务还是依托现有网络的eMBB能力,目前看来,在5G大上行、高精度定位等能力上距离行业需求还有一定差距,这也需要在5.5G阶段解决。

从技术驱动角度来看,5G网络本身就是移动通信技术融合的产物。面向未来,以人工智能(AI)为代表的驱动类技术有机会进一步拓展通信系统的能力,使5G网络变得更加高效、灵活和智能。同时,为了更好地融入工业场景类应用,5G技术也需要和运营相关技术有机融合。

1.2 应用场景

5G-Advanced是基于5G的技术演进,在5G的三大业务场景(eMBB、mMTC和uRLLC)的基础上进一步扩充到了如图1所示的六大业务场景,以应对日益复杂的应用场景和业务需求,从支撑万物互联到使能万物智联。

a) 上行超宽带(UL Centric Broadband Communication, UCBC):大幅提升现有通信网络的上行传输性能,例如实现高清视频上传、机器视觉等业务。同时,依托其更深的覆盖、更大的上行传输带宽,UCBC还可



以大幅提升室内场景的用户体验速率。

b) 宽带实时交互(Real-time Broadband Communication, RTBC):支持更大带宽和低时延通信,使能沉浸式互动业务增强。

c) 通信感知融合(Harmonized Communication and Sensing, HCS):将传统通信和感知业务相融合,赋予无线通信网络全新的业务能力。

2 潜在技术方向

2.1 Massive MIMO持续增强

2.1.1 高精度MIMO

MIMO技术已经在实际系统中得到了广泛的应用,为了进一步提升通信系统频谱效率,大规模MIMO正逐渐成为无线通信网络的关键技术之一。从标准演进的角度来看,3GPP Rel-15针对频分双工系统(FDD)支持了空域高精度码本,即Type-II码本。Type-II码本利用量化信道特征反馈向量,有利于支持向多个用户的空间复用数据传输^[6]。Rel-16中,eType-II码本利用信道频域相关性实现多个子带的联合压缩量化,同时节省的传输开销可以用于提升码本精度。Rel-17中,上下行信道的角度延迟互易性被用于进一步提高信道状态信息精度^[7-8]。

现有MIMO系统的测量开销也需要被进一步考虑。对于FDD系统,可以通过在时延域中复用CSI-RS端口以降低现有FDD系统导频开销^[9]。对于TDD系统,信道探测参考信号(Sounding Reference Signal, SRS)的容量提升同样重要,例如在Rel-17中引入了SRS跳频^[10]。基于Rel-17的SRS加强,SRS容量预期

可以提升2倍或4倍。在5G-Advanced周期内,SRS需要进一步加强,协议需要考虑新的SRS设计。

2.1.2 超大孔径阵列(ELAA)

随着超大规模MIMO系统的发展,单一天线面板的射频通道和天线阵子规格不断增加,然而在实际部署中,天线面板的尺寸、重量和风载都会受到严格限制,传统演进思路受到限制。超大孔径阵列(Extremely Large Aperture Array, ELAA)可以将天线单元分布式的部署在一片区域内,避免了集中式部署的工程限制。如图2所示,天线面板分块部署在了建筑物墙壁上。

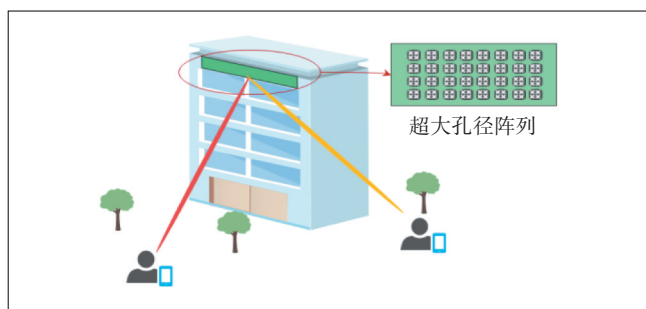


图2 超大孔径阵列

虽然ELAA采用分布式部署,其同样具有超大规模MIMO系统的典型特征,例如信道硬化和有利传播等^[6]。此外,ELAA的超大孔径导致服务用户可能处于阵列天线的近场传输范围,因此传统MIMO系统的平面波假设不再成立,对于近场用户需要考虑球面波模型。ELAA信道的另一个重要特性是空间非平稳,即天线阵列的不同部分可以看到不同的散射导致接收功率不同。此外,由于天线阵子数量剧增,ELAA系统的基带处理复杂度和前传带宽需求也急剧增加,低复杂度、低前传开销的分布式基带处理算法和架构成为ELAA领域的重要研究方向^[11]。

2.2 宽带实时交互(RTBC)

RTBC作为5G-Advanced六大核心场景之一,代表了5G ToC业务演进的重要方向。XR、触觉互联网等一系列新兴业务通过打造现实与虚拟世界的桥梁,实现了身临其境的沉浸式用户体验。由于XR业务具有高速率、高可靠性、低时延的要求,在当前5G网络上承载大量XR业务是非常具有挑战性的。从传输速率角度来说,视频分辨率和帧率的不断提升将传输速率要求提高到了100 Mbit/s~1 Gbit/s。对于强交互XR应用程序和云渲染,需要达到20 ms的响应延迟才能满足沉浸式体验要求。从可靠性角度来分析,传输可靠

性要达到 10^{-3} ~ 10^{-4} 以满足业务QoE需求。根据3GPP的初步评估结果,一个小区能支持的XR用户数还远远不能满足大规模商用的诉求^[12]。

2.2.1 Layered QoS

XR业务的多个数据流具有不同流量特征和QoS要求,例如视频的I帧/P帧、视频景深和姿势/控制等。上述多种视频流在XR业务中具有不同的优先级,其中部分数据流主导用户体验,部分起辅助作用。现有的5G QoS架构中,同一XR业务的多个数据流是在相同QoS流上进行传输,视频流的差异性没有被考虑,造成非重要信息传输开销冗余。

为了适配XR业务中多个数据流不同优先级的特点,可以考虑具有多个QoS流的分层QoS传输机制,如图3所示。QoS要求较高的数据流称为基本流,而QoS要求较低的数据流称为增强流。

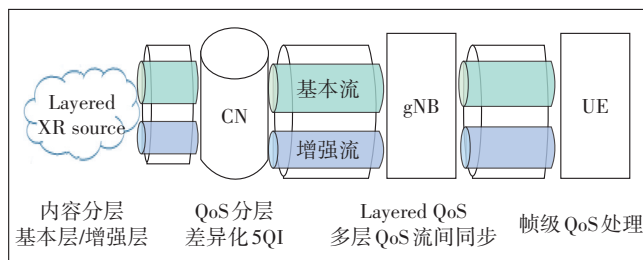


图3 多个QoS流的分层QoS机制

另一方面,现有协议还支持将多个XR数据流映射到单个QoS流中,并且仍然可以考虑分层QoS机制。这种场景下,需要额外引入一些端到端的交互机制,以支持基础数据和增强数据的区分^[12]。

2.2.2 帧级完整性传输

从网络传输的角度来看,XR业务中的每个视频帧可以被分割成1个或多个关联的IP/PDCP数据包。一般情况下,视频帧的正确解码和重建依赖于其所有关联的数据包都被正确接收的前提。然而,XR业务中数据包之间的相关性在现有的RAN侧并不被感知。当这些相关数据包到达RAN时,RAN将把所有数据包视为彼此不相关。因此当一个视频帧关联的一个数据包丢失时,后续传输变得没有意义,因为即使后续传输成功,也无法成功解码该视频帧,导致无线传输资源的浪费。

为了支持帧级完整性传输,5G核心网需要和应用进行协调,识别哪些数据包属于哪一个视频帧,从而有利于网络满足XR业务需求。然后,这些数据可以被指示给RAN侧,从而可以从这种帧级完整性传输中

受益,以实现高效的无线资源管理。

2.3 超高可靠性超低时延通信(uRLLC)

3GPP Rel-15 确认了 uRLLC 业务的关键性能指标,例如 1 ms 传输时延和 10^{-5} 可靠性。Rel-16/17 中对 uRLLC 做了进一步增强,包括提升可靠性至 10^{-6} 和潜在的在用户间实现业务复用的功能。然而,实际系统中影响 uRLLC 业务性能的因素多种多样,例如在 eMBB 和 uRLLC 共存场景下的 TDD 子帧配比和小区间干扰等。针对 uRLLC 业务,5.5G 演进存在如下几个潜在技术方向。

a) 重传增强:重传是降低 uRLLC 业务时延、提高可靠性最直接的方案之一。但是受限于交互时延,传统的重传方案无法满足 uRLLC 业务的低时延要求。因此,在 5G NR 中引入了盲重传,通过在接收反馈之前重传来减少时延。重传增强可以显著提升 uRLLC 系统的传输可靠性,但是也会降低频谱效率。为了取得时延和频谱效率之间的平衡,近年来涌现出了不少新的方案^[13]。

b) uRLLC-eMBB 共存:uRLLC 和 eMBB 业务共存是 5G 中的一个重要问题,在许多场景中,无线通信网络将同时支持多种不同时延可靠性要求的任务。一种方式是不同业务提前预留资源,但是这样会造成频谱效率的降低。另一种方式是允许 uRLLC 抢占 eMBB 时频资源,如图 4 所示,这样又会造成 eMBB 业务的性能下降。因此,如何高效地实现多种业务的有效共存是 5.5G 一个重要的研究方向^[14]。

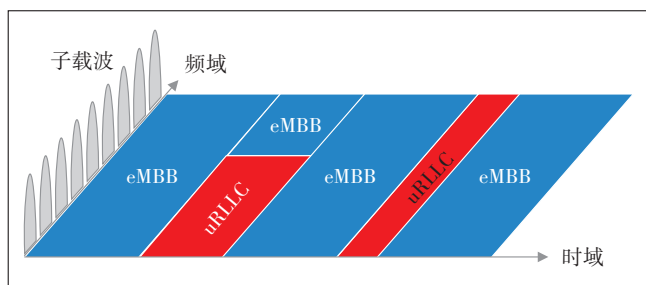


图4 uRLLC 抢占 eMBB 时频资源

c) 互补 TDD:使用灵活的 TDD 帧结构,在一个时隙内配置多个上行和下行子帧的切换^[15]。但是,频繁切换会造成保护间隔的冗余;另一种方案是使用 FDD 频段,但是上下行分处 2 个频段的普适性较差,同时 FDD 频段带宽往往较小,可能无法满足数据传输速率要求。针对上述场景,理想的解决方案是采用全双工技术,但是现阶段还具有很大挑战性,因此这里提出

了互补 TDD 方案,在非重叠频率的子带上配置完全互补的 TDD 子帧,以实现系统在任意时隙都可以同时实现上行发射和下行接收。

2.4 通信感知融合(HCS)

2.4.1 低功耗高精度定位

5G 定位技术在安全监控、应急救援、行程监控等方面起到了重要的作用,面向 5G-Advanced 技术演进,高精度不再是定位业务的唯一衡量指标,低功耗变得愈发重要^[16]。降低功耗的关键是最大限度地降低通信传输需求,可以通过计算上行到达时间差实现低功耗高精度定位(Low Power High Accuracy Positioning, LPHAP)。因为终端只需要和网络保持同步,并且接收和发射参考信号,其余时间可以进入深度睡眠状态以大幅降低功耗。有 4 种潜在的技术可以降低设备功耗,同时保持高精度。

a) 通信和定位带宽解耦。LPHAP 预计将同时支持窄带通信和宽带定位,使设备可以在窄带模式下实现低功耗,并在宽带模式下实现高精度定位。

b) 移动性增强。Rel-17 支持的 RRC_INACTIVE 定位不足以支撑长时间续航,需要进一步优化。例如,现有协议架构下用户移动导致小区切换需要重新配置 SRS 资源,这将导致用户睡眠时间减少,功耗随之增加。因此,可以引入定位区域的概念,在同一个定位区域内,小区切换可以保留原有 SRS 资源。

c) SRS 聚合。上行 TDOA 定位首径到达时间估计误差与等效带宽成正比,当前协议 sub-6G 频段单载波最大带宽 100 MHz 限制了定位能力。因此可以通过聚合来实现 SRS 带宽的扩展,提升上行 TDOA 定位精度。

需要注意的是,实际工程中的非理想因素,如站间同步误差、网络参数不准确,会极大地影响定位精度,从而造成终端功耗提升。在 LPHAP 中还应考虑更鲁棒的定位技术,如通过具有已知位置的参考终端进行定位的相关技术。

2.4.2 高精度感知

精准感知是打造智慧道路的基础,目前以视觉为主的道路感知系统受限于光线、3D 感知精度、障碍物遮挡等,还存在很大的提升空间。而车载感知系统同样受到探测距离、周边车辆遮挡等限制,且感知器件性能受成本约束。通过各种尖端传感器的辅助,车辆将不再仅仅是运输工具,车辆对车辆(V2V)和车辆对基础设施(V2I)通信的进步使它们成为无线网络中信息交互的智能节点。通过这种方式,可以实现基于先

进智能交通系统的实时高清地图下发和分布式传感器共享等广泛的垂直应用,提高车联网的驾驶安全性和运营效率。

2.5 人工智能(AI)

AI是目前最受关注的前沿技术,也是最热门的研究方向。经过几十年的摸索、研究,AI在图像处理、语言处理、自动驾驶等领域都取得了巨大突破,在部分领域甚至超越了人类算法的极限性能。因此,越来越多的行业开始研究AI,希望通过AI给自身赋能,通信也不例外。

通信行业对AI的迫切需求,是由网络发展的现状和未来决定的。持续的技术演进将通信网络变成了一个空前复杂的异构多域系统,各种技术混杂其中,给网络优化、运维带来了巨大挑战。随着5G时代的到来,空口设计的灵活性被进一步放开,网络复杂程度也进一步提升,在通信网络中应用AI技术的动机和优势也显得愈发明显。首先,AI可以用来解决复杂模型的优化问题,通过模型训练对优化问题进行收敛求解,避免了传统迭代算法的巨大开销。其次,传统信号处理算法依赖精确的数学模型对问题进行刻画,但是实际系统受限于非理想和随机性,往往难以被精准地描述,导致传统算法性能受限。而AI算法,例如深度学习,可以很好地对复杂模型进行拟合,从而避免了数学建模误差导致的性能损失,提升网络性能。

另一方面,通信对于AI技术来说,也是一块肥沃的土壤,AI的三大要素可以被通信系统完美支持。数据是AI的根本,可以说数据越多、越丰富,AI算法训练的性能就越好。5G网络中每天都会生成海量的数据,这些数据格式相对统一,颗粒度也较小,非常适合用于模型训练和算法学习。其次是算力,5G网络具有大量云计算资源,这些资源可以为AI训练提供有效的算力支持,同时,5G通信网络还会部署大量边缘计算节点,为分布式训练提供良好的算力支持。最后是算法,通信行业在AI算法开发上也有显著优势,近些年涌现出诸如数据驱动、模型驱动、知识驱动等多种通信和AI相结合的算法,在利用AI技术本身优势的同时,也很好地继承了传统通信算法的理论框架。

标准研究层面,3GPP Rel-18也对3个物理层典型用例进行了学习,包括AI CSI、AI定位和AI波束管理,图5给出了AI波束管理示例。尽管AI和通信的结合看上去是水到渠成,但是在实际通信系统中引用AI技术也面临着不少挑战。首先,通信网络是一个时变的

拓扑结构,AI算法模型需要具备较强的鲁棒性和泛化性以支撑不同场景、架构的应用。其次,数据标签获取难度较大,监督学习可能需要被半监督或非监督学习替代,以降低网络实现复杂度。在5G-Advanced中,上述问题都需要被仔细研究并解决,才能推动AI技术最终大规模应用于无线通信系统。

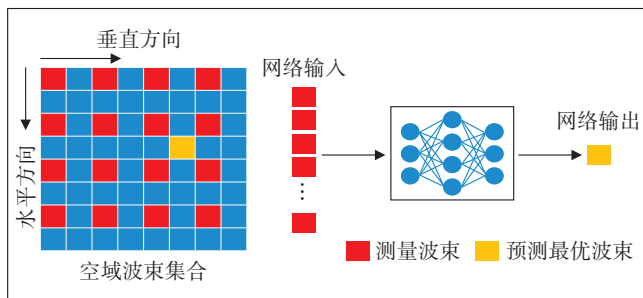


图5 AI波束管理

2.6 频谱技术演进

3GPP Rel-16标准中,5G NR Rel-15定义了2个频率范围FR1(410 MHz~7.125 GHz)和FR2(24.25 GHz~52.6 GHz),涵盖了从450 MHz到52.6 GHz的所有IMT频谱。在正在定义的R17标准中,52.6 GHz以上频谱用于5G NR成为了重要课题之一,FR2的频率范围扩展到了71 GHz,这标志着100 GHz以下频谱全面向5G演进已经成为了业界共识。然而每个频段各有各的特征,如何结合业务需求,合理利用是Sub100G频谱重构的关键挑战。

FDD频谱较为零散且带宽小,以欧洲为例,90%的运营商拥有FDD频段,并且95%的单个FDD载波频谱的带宽小于等于30 MHz。为了充分利用离散的FDD频谱资源,当前的方法主要是利用载波聚合技术,然而这也造成了2方面的影响:一是每个FDD频段都需要独立地发送广播、寻呼等公共信道信息,造成了比较大的开销冗余和基站能耗;二是每个辅载波的管理需要经过测量、添加、同步、激活等处理,耗时数十毫秒,影响用户体验。为了解决这一问题,提出了多频段服务小区(Multi-band Serving Cell, MB-SC)的技术,将多个离散的FDD载波构建成一个虚拟大载波,并且可以通过BWP实现载波间的频谱灵活调度使用,从而减少公共开销,提高用户体验,如图6所示。

在MB-SC中,对于IDLE/INACTIVE状态的用户,服务小区的系统信息只需能在服务小区内的多个下行载波中的一个进行发送即可。根据系统信息,终端可以选择任何一个上行载波进行初始接入,而无需

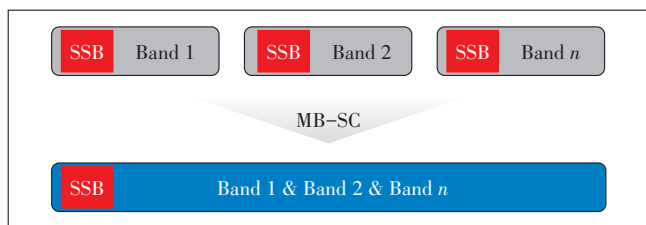


图6 多个离散载波重构为一个虚拟大载波

添加和激活辅小区。通过这种方式,MB-SC可以减少公共信令的开销,实现不同上行载波的负载均衡,降低接入时延,提高网络灵活性,甚至提高能效。对于连接态的用户,可以利用来自多个频段的频率资源。当无数传需求时,网络可以让用户在一个较小的BWP上进行驻留,以降低用户功耗。当有突发业务时,网络可以进行快速BWP激活或切换,以便在突发流量到达时聚合使用多个载波带宽,提高瞬时传输速率。为了实现上述好处,MB-SC需要解决多个技术挑战,如跨载波的宽带发送和接收、载波之间的精确时频同步、多载波信道信息融合等。

3 结语

移动通信的历史发展规律表明,代际内的技术演进也是推动行业发展的必要条件。5G网络在全球化部署的同时,也在推动着技术本身向5G-Advanced持续演进。在3GPP层面,5G-Advanced从Rel-18开始,并可能横跨未来3个版本,即Rel-18至Rel-20。5G-Advanced在不断增强5G的3个标准场景之外,还将进一步扩展UCBC、RTBC和HCS 3个全新应用场景,以支持万物互联、万物智联的未来愿景。

本文介绍了5G-Advanced的关键驱动力、应用场景和关键技术指标,提供了潜在的技术方向,并给出了初步的可行性分析。希望引发学术圈和工业界专家学者对于5G-Advanced演进的全面探索和思考。

参考文献:

- [1] CHEN Y, ZHU P Y, HE G N, et al. From connected people, connected things, to connected intelligence [C]//2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT). Levi: IEEE, 2020: 1-7.
- [2] GHOSH A, MAEDER A, BAKER M, et al. 5G evolution: a view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15 [J]. IEEE Access, 2019(7): 127639-127651.
- [3] LEVY K. IoT & Industry 4.0 in the 5G era Huawei's perspective [EB/OL]. [2022-05-03]. <https://documents.net/document/iot-and-industry-40-in-the-5g-era-huawei-s-perspective.html?page=22>.

- [4] WANG D W. Huawei's David Wang: Defining 5.5G for a better, intelligent world [EB/OL]. [2022-05-03]. <https://www.huawei.com/en/news/2020/11/mbbf-shanghai-huawei-david-wang-5dot5g>.
- [5] 3GPP. 3GPP/PCG46-e draft report V2 [EB/OL]. [2022-05-03]. <https://www.3gpp.org/>.
- [6] MARTÍNEZ À O, NIELSEN J Ø, DE CARVALHO E, et al. An experimental study of massive MIMO properties in 5G scenarios [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66 (12): 7206-7215.
- [7] 3GPP. Discussion on field measurement and evaluation assumptions for FDD CSI enhancements in Rel-17; 3GPP. R1-2006414 [Z]. 2020.
- [8] 3GPP. Discussion on CSI enhancements for Rel-17; 3GPP. R1-2007592 [EB/OL]. [2022-05-03]. <https://www.3gpp.org/>.
- [9] YIN H F, WANG H Q, LIU Y Z, et al. Addressing the curse of mobility in massive MIMO with prony-based angular-delay domain channel predictions [J]. IEEE Journal On Selected Areas In Communications, 2020, 38(12): 2903-2917.
- [10] 3GPP. R1-2007591: Discussion on SRS enhancements for Rel-17; 3GPP. R1-2007591 [EB/OL]. [2022-05-03]. <https://www.3gpp.org/>.
- [11] LI K P, SHARAN R R, CHEN Y J, et al. Decentralized baseband processing for massive MU-MIMO systems [J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2017, 7(4): 491-507.
- [12] 3GPP. Chairman notes: 3GPP. RAN1104b-e [EB/OL]. [2022-05-03]. <https://www.3gpp.org/>.
- [13] ZHAO S Y, WANG Y C, XIE Y C, et al. Joint Time-Frequency diversity based uplink Grant-Free transmission scheme for uRLLC [C]//2019 11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Xi'an: IEEE, 2019: 1-6.
- [14] KARIMI A, PEDERSEN K I, MAHMOOD N H, et al. Efficient low complexity packet scheduling algorithm for mixed uRLLC and eMBB traffic in 5G [C]//2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2019: 1-6.
- [15] 3GPP. Complementary TDD and uRLLC enhancements for NR; 3GPP. RWS-210442 [EB/OL]. [2022-05-03]. <https://www.3gpp.org/>.
- [16] DEL PERAL-ROSADO J A, RAULEFS R, LÓPEZ-SALCEDO J A, et al. Survey of cellular Mobile Radio localization methods: from 1G to 5G [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 1124-1148.

作者简介:

薛松岩, 毕业于英国萨里大学, 高级工程师, 主要研究方向包括物理层技术、人工智能、数学等; 庞继勇, 华为无线网络RAN研究部无线智能空口研究专家, 现任上海华为技术有限公司5G技术验证与标准化总工程师兼组长; 汪少波, 毕业于浙江大学, 华为无线通信空口系统领域的高级研究专家, 华为无线网络RAN研究部副部长, 负责3G UTMS系统基带接收机算法的设计; 高全中, 华为5.5G项目SDT经理, 华为5G产品与解决方案首席架构师、华为TDD和Massive MIMO产品的首席设计师。