

5G-NR XR 网络架构 关键技术与演进

Research and Evolution Progress of XR Key Technologies of 5G-NR

王丽萍,张银成,邓一伟,唐小勇(TCL 新技术有限公司,广东 深圳 518055)

Wang Liping,Zhang Yincheng,Deng Yiwei,Tang Xiaoyong(TCL New Technology Co.,Ltd.,Shenzhen 518055,China)

摘 要:

为了使5G-NR系统更好地支持XR媒体业务的传输,满足其QoS需求,3GPP从Release 17开始就从5G网络架构演进、关键技术增强等方面对XR进行了深入研究,包括XR媒体业务特征指示、网络信息开放、空口协议增强等。首先介绍了3GPP 5G XR项目研究背景以及3GPP Release 17、Release 18 XR相关的项目立项情况,随后详细阐述了5G XR Release 18演进的网路架构关键技术研究进展。最后对XR在未来Release 19、6G的演进增强技术进行了预测和展望。

关键词:

5G-NR;RAN;XR

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.02.002

文章编号:1007-3043(2025)02-0006-06

中图分类号:TN915

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

In order to better support the transmission of XR media services in 5G-NR systems and meet their QoS requirements,3GPP has conducted in-depth research on XR in the direction of 5G network architecture evolution and key technology enhancement since Release 17,including XR media service feature indication,network information openness,and air interface protocol enhancement. It first introduces the background of the 3GPP 5G XR project research and the study item/work item of 3GPP Release 17 and Release 18 XR. Then, it elaborates on the research progress of key technologies in the network architecture evolution of 5G XR Release 18. Finally, predictions and prospects are made for the evolution and enhancement technologies of XR in future releases such as Release 19 and 6G.

Keywords:

5G-NR;RAN;XR

引用格式:王丽萍,张银成,邓一伟,等. 5G-NR XR网络架构关键技术与演进[J]. 邮电设计技术,2025(2):6-11.

1 概述

扩展现实(XR)是当前行业中最重要5G媒体应用之一^[1-2]。XR是指由计算机技术和可穿戴设备生成的,结合了真实和虚拟环境以及人机交互的综合体验。XR是一个涵盖不同现实类型的总称,主要包含以下3种现实类型^[3]。

a) 虚拟现实(Virtual Reality,VR)。VR是通过渲染呈现的视觉和音频场景的版本。渲染旨在尽可能

自然地模拟真实世界的视听刺激,以便观察者或用户在应用程序定义的界限内移动时可以体验到。

b) 增强现实(Augmented Reality,AR)。AR是在用户当前环境上提供额外信息或人工生成的物品或内容的叠加。这些额外信息或内容通常是可视和/或可听的,并且其对当前环境的观察可以是直接的(无中间感知、处理和渲染)或间接的(通过传感器传输环境感知并进行增强或处理)。

c) 混合现实(Mixed Reality,MR)。MR是增强现实的高级形式,其中一些虚拟元素被插入到物理场景中,旨在让这些元素看起来是真实场景的一部分。

收稿日期:2024-12-30

XR具有广泛的应用前景,涵盖游戏娱乐、教育培训、医疗保健、工业制造等多个领域^[4]。随着XR技术的快速发展,对更高带宽、更低延迟和更可靠的移动通信需求日益增加^[5]。随着5G、6G技术的迅猛发展,新的业务特征对无线网络架构和技术增强提出了更高的要求^[6]。业界对XR业务的性能增强也展开了大量的研究^[7-9]。

XR项目是5G的一个非常重要的项目,3GPP在2019年就展开了对其的相关研究工作,早期主要关注XR相关的需求和场景分析,而具体技术相关的研究工作在Release 17和Release 18阶段相继展开^[10]。具体来说,3GPP SA1工作组开展了XR技术相关的触觉通信以及多模态传输的研究,并在Release 18立项制定了XR相关的KPI需求标准规范。3GPP SA4工作组主要聚焦于XR音视频业务流特征研究,并在Release 18立项制定了XR业务相关的流量特征(周期、抖动、往返时延、误包率、包时延预算、包重要性等级等)的技术标准规范。3GPP SA2工作组主要研究如何更好地支持XR业务的5G网络架构和服务质量增强技术,并在2021年确定了Release 18 XRM的立项^[11]。3GPP RAN工作组中的RAN1子工作组最早在全会RAN Meeting #88e会议中确定了Release 17关于XR的立项,该项目主要是对在NR系统中支持XR业务进行了相关的评估,包括业务模型、部署场景、UE功耗、XR覆盖范围、XR移动性性能等,并输出了相应的技术报告规范——3GPP TS 38.838^[12]。而到了Release 18阶段,3GPP RAN工作组正式开始研究5G系统如何在无线空口支持XR业务,并于2022年在3GPP RAN全会RAN Meeting #95e会议中确立了XR的研究立项^[13-14],该项目的主要研究内容包括RAN对XR业务特定的感知技术增强、RAN对XR业务特定的UE省电技术增强、RAN对XR业务特定的容量技术增强。目前Release 18中3GPP SA2工作组和3GPP RAN2工作组的研究工作正在进行中,本文主要介绍这2个工作组的XR相关的标准技术研究工作的进展,并以此为基础对未来XR增强技术进行预测和展望^[15]。

2 3GPP XR网络架构关键技术

在Release 18中,3GPP SA2工作组的研究主要聚焦于对5G网络架构增强以更好地适配5G XR业务特性,包括XR媒体业务特征指示和网络信息开放^[16]。3GPP RAN工作组的研究主要聚焦于无线空口技术的

增强以更好地满足XR业务的传输性能,主要包括空口协议增强。XR网络架构的关键技术增强方向如图1所示,主要包括XR媒体业务特征感知、RAN网络拥塞信息开放、RAN空口协议增强。

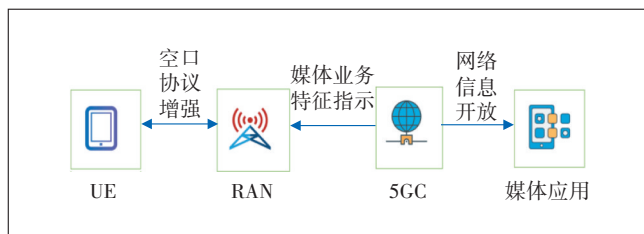


图1 3GPP XR网络架构关键技术增强方向

2.1 XR媒体业务特征感知

5GC将XR媒体应用层业务特征信息转换指示给无线接入网络RAN,由于XR以流媒体为典型业务,流媒体业务有一些特有的业务特征,例如,XR业务最典型的媒体业务数据传输以数据帧为单位(如视频标准264的视频帧:I帧、B帧、P帧)进行,而不再是传统的以数据包为单位进行。同一XR业务流中不同帧类型(如I帧、B帧、P帧)中的数据包对用户体验的贡献是不同的,即不同数据帧拥有不同的重要性,因此要求在进行数据帧传输时对不同的数据帧要进行差异化处理^[17]。目前5G系统采用通用的QoS机制来处理媒体服务数据,而没有充分考虑XR媒体业务典型的特征信息。为了更好地支持XR业务数据的传输,有必要考虑让5GC将XR媒体业务特征信息传递给无线接入网络RAN,让RAN更好地感知5G XR应用,以便RAN更好地分配无线资源,满足XR的传输需求。为了向RAN提供XR业务特征信息,5GC首先需要对XR应用数据流进行基于PDU集的QoS处理,并对PDU集设置相应的特征信息(如误包率、完整性、保障时延、Size等),然后将这些特征信息分成控制面参数和数据面参数分别指示给RAN^[18]。

对于控制面指示,5GC的PCF确定XR业务PDU集QoS流的控制面参数,并由5GC的SMF将该控制面参数通过与RAN的控制面接口NG-C半静态指示给RAN,具体的XR业务PDU集QoS流的控制面参数包含PDU集误包率(PSER)、PDU集延迟预算(PSDB)、PDU集完整性处理指示(PSIHI)等。RAN通过与5GC控制面的接口接收到XR业务控制面参数后,可以了解到承载XR业务的QoS流的空口时延、完整性、误包率等信息,并基于此对XR业务的QoS流进行DRB承

载映射以及空口配置,以支持XR业务数据在RAN的高效传输,并满足其QoS要求。

对于数据面指示,5GC的PSA UPF识别应用数据包中属于PDU集的PDU,并从应用数据包RTP/SRTP头部来识别、确定PDU集信息,然后通过RAN的数据面接口NG-U动态指示给RAN,具体的XR业务PDU集信息包含PDU集序列号、PDU集大小、PDU集中的PDU序列号、PDU集的结束PDU指示、PDU集重要性(PSI)等。RAN接收来自5GC的XR业务数据包,通过解析数据包头可以了解到XR业务的数据PDU集的重要性、序号等信息,并基于此对XR业务数据以PDU集为单位进行处理,如PDU Set粒度的丢弃等。

通过5GC提供的控制面和数据面的XR业务特征信息,RAN可以更好地感知XR业务数据流量(上行和下行)特征、QoS指标和应用层属性,以更好地支持RAN对XR业务特定的处理满足其QoS要求。

2.2 RAN网络拥塞信息开放

网络能力开放支持5GS和应用程序之间的交互,由5GS将无线网络RAN的传输拥塞信息公开给应用程序,以便应用程序基于网络RAN的传输状态进行快速编解码器/速率自适应,进而帮助缓解网络的拥塞并提供所需的服务质量保障。具体采用的方案是通过L4S(ECN-marking)机制进行网络拥塞反馈。L4S(低延迟、低丢包和可扩展吞吐量)是一种应用层的拥塞指示机制,它最早在IETF RFC 9330中被定义描述。它通过在UE和应用服务器之间的用户IP数据包的IP头中标记ECN(explicit congestion notification)位(即ECN-marking)来公开拥塞信息,通知应用层,以触发应用层的速率自适应。

在5G系统中,也支持通过L4S的ECN标记来支持无线网络RAN向应用层(应用服务端)进行拥塞反馈。对于上行和下行方向的网络传输拥塞,可以基于对每个QoS流启用L4S的ECN标记来向应用层反馈。对于执行L4S在IP头中的ECN标记操作,执行主体可以是RAN,也可以是5GC中的PSA UPF,既支持UPF进行ECN标记的网络拥塞上报,也支持RAN进行ECN标记的网络拥塞上报。

为了支持在PSA UPF中进行L4S的ECN标记,5GC中的SMF可以向PSA UPF发送需要执行L4S ECN标记的QoS流信息。此外,SMF还需要指示RAN监控并上报网络拥塞状况,具体地,SMF指示RAN上报UL或DL指定QoS流的拥塞状态信息,并将拥塞状态信息

传递给PSA UPF。基于RAN提供的拥塞状态信息,PSA UPF对相应方向指定QoS流的数据包进行L4S的ECN标记,并通过ECN标记将相应方向指定QoS流拥塞信息指示给应用层。

为了支持在RAN中进行L4S的ECN标记,5GC需要使用专用的QoS流来承载启用了L4S的ECN标记IP数据流。同时5GC还会配置RAN对专用QoS流的数据包进行UL或DL方向的ECN标记指示,该拥塞信息会进一步地指示给应用层。图2所示为RAN进行拥塞检测和ECN标识的示意。

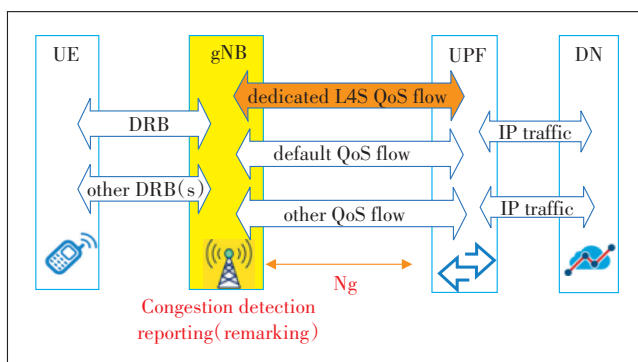


图2 RAN进行拥塞检测上报和ECN标识

对于网络能力开放,除了支持上述以L4S ECN标记的方式进行网络拥塞信息上报以外,5G系统还支持QoS流的UL或DL的数据速率信息上报以及QoS流的往返时延(包括UL和DL数据流的时延)上报。具体可以由应用层提供速率或时延上报需求,进一步的由5GC的PCF指示SMF多PSA UPF进行指定QoS流速率或时延监测上报配置,PSA UPF获得指定QoS流速率或时延测量结果后进行上报,最终将指定QoS流速率或时延信息指示给应用层。

2.3 RAN空口协议增强

空口协议增强主要基于5G XR业务QoS需求,对XR的基本数据单元PDU Set所具有的特征进行差异化的数据处理,包括数据丢弃适配、数据时延信息上报、无线资源配置优化等。RAN空口协议增强包括物理层RAN1增强和高层RAN2/RAN3增强,本文中主要描述高层的协议增强。

对于RAN空口高层协议增强,由于XR业务具有准周期性流量(可能带有抖动)特征,在下行链路(即视频流)具有较高的数据速率,同时结合了频繁的上行链路(即姿态/控制更新)和/或上行视频流。无论是下行链路还是上行链路的流量都具有相对严格的分

组时延预算(PDB)。为了更好地支持XR业务,RAN空口高层技术增强主要集中在RAN感知、RAN节能、RAN能力增强等方面。部分增强的具体技术细节包括如下几个方面。

a) 基于PDU Set的数据包丢弃。在RAN空口进行数据传输时,支持发送端PDCP层对定时器超时的数据包进行丢弃以更好地清空缓存。由于XR具有典型的流媒体业务特征,XR业务在RAN空口以PDU Set数据集为单位进行处理。基于此,支持发送端PDCP层对XR业务以PDU Set为粒度进行丢弃。此外,由于5GC对有些XR业务的PDU Set配置了PSI完整性要求,对于有完整性要求的PDU Set,也支持以PDU Set进行整体性的数据包丢弃。例如,当一个有完整性要求的PDU Set中某一个数据包未被正确传输而需要丢弃时,PDU Set中其他的数据包也不再有用,故发送端会将整个PDU Set中剩余的数据一并丢弃。该方式能够减少空口的非必要传输,减少资源浪费,有利于节省RAN资源。

b) 基于PSI的差异化数据处理。由于XR业务数据帧的基本数据单元PDU Set具有不同的重要性,例如,业务层I帧的数据帧要比B帧或P帧的数据帧更为重要。因此,5GC对不同的PDU Set会配置不同的PSI重要性等级,该PSI重要性等级可以用于在无线空口发生拥塞时进行丢弃。例如当拥塞出现时,基站指示UE激活可以基于PSI的差异化数据处理机制。UE可以基于基站的配置,对PDU Set数据包PSI重要性低的数据包启动新的更短的丢弃定时器,这样该部分的PDU Set的数据包会很快由于丢弃定时超时而丢弃,从而可以更好地利用有限的资源对重要性高的数据进行传输,有利于RAN能力增强。

c) 对XR业务使用新的BS表。由于XR业务具有周期性大流量并伴随有突发性的业务特征,UE在对XR业务进行BSR上报时,现有的数据总量BS表在指示大流量数据包的数据总量时出现较大的量化误差,即无法精准地反映UE缓存中XR业务数据包的精准数据总量。基于此,3GPP RAN2在研究和讨论中支持为XR业务设计新的BS表以更好地支持UE对XR业务缓存数据的精准上报,从而使基站能准确地为UE分配上行资源。

d) UE向基站上报DSR。由于XR业务是时延敏感型业务,基站在对XR业务进行资源分配时,需要考虑当前数据的时延信息,即当前数据包PDU Set的预

算总时延PSDB信息以及该数据在缓存中消耗的时间,两者之差反映的是该数据剩余待调度的时间,数据所剩待调度时间进一步反映的是该数据待传输的紧急程度。对于上行,基站无法获知UE的上行数据缓存的时延情况,不知道当前UE缓存中的上行数据待调度的紧急情况。基于此,3GPP RAN2在研究和讨论中支持UE对XR业务上行链路中缓冲数据的剩余时延信息进行上报,即UE向基站上报DSR。具体地,当UE上行缓存数据的剩余时延低于基站配置的阈值门限时,UE统计当前缓存中各个LCG组内PDU Set的剩余时延信息,对于时延低于阈值门限的数据,UE在DSR中以LCG为粒度同时上报将该部分数据的时延和数据量信息给基站,基于此,基站能清晰地获知当前UE缓存中紧急待调度的数据量,从而精准地为UE分配上行资源,有利于RAN感知,从而提高资源分配和使用的效率。

e) 预配置资源CG下多个传输机会。由于XR业务具有周期性的特点,对于上行XR业务传输,支持预配置资源的方式以减少信令开销,即支持Configure Grant(CG)。此外,为了提供更高效率的资源分配和调度机制,以适应XR服务特征(周期性、多流、抖动、延迟、可靠性等),还支持在单个CG PUSCH配置的周期内进行多个CG PUSCH传输时机,这样能更好地匹配XR业务的抖动特性,而抖动是具有随机性特征的,因此,对于单个CG PUSCH中配置的多个CG PUSCH传输时机,UE可能不会使用全部的传输时间。为了有效利用资源,UE需要通过UCI动态指示给基站未使用的CG PUSCH时机,以让基站了解资源的使用情况而合理地分配资源,该机制有利于RAN节能。

3 XR RAN增强技术演进

目前3GPP各个工作组(SA2、RAN1、RAN2)Release 18关于XR的研究已进入尾声,下一个阶段关于XR技术增强方向的立项在3GPP Release 19已经基本落地。此外关于6G演进的预研工作在业界正在全面展开,其中XR沉浸式通信依旧是6G的一个主要研究课题。由此可以预见,在3GPP Release 19以及未来的6G技术演进中还会有更多更先进的技术涌现,以更好地支持XR应用场景的多样化发展。以RAN高层为例,下述几个增强技术可能在Release 19或6G中被研究或采纳。

3.1 支持多模态数据在RAN同步传输机制

对于XR业务,多模态传输是其典型特征,而多模态业务数据流可能来自同一个终端,也可能来自多个不同的终端(如VR眼睛、手柄、眼镜等),多模态业务之间的实时互操作性必然要求多模态业务的同步传输以更好地满足用户体验。为了实现端到端多业务同步传输(包括单UE的多业务以及多UE的多业务场景),通过发送端和接收端应用层的时间戳设计与处理可以一定程度上实现同步需求,但是应用层的同步机制无法保证空口的同步传输。为了提升用户的体验效果实现多流业务的高精度同步,除了依靠传统的应用层的同步机制,多UE多模态业务在RAN的同步传输机制也是非常值得研究的内容。

图3所示为一种多UE的多模态业务在空口下行同步传输的机制,即对来自不同UE的多模态业务数据在基站的MAC层进行复用组包处理,该机制从资源调度的角度进行增强,保证了业务数据流之间在传输上的同步性。此外,还可以考虑对多模态业务数据的传输资源进行同步调度和指示,也可以间接保证多模态数据的同步传输。该机制适用于多个不同UE之间的下行多模态业务数据同步传输。除此之外,单个UE内部的下行多模态业务同步处理也可以参考该机制,即从资源调度的角度实现传输的同步性。而对上行多模态业务传输来说,由于各个UE之间是独立的,故只能考虑UE通过相关信息的上报让基站实现上行资源分配的同步性,进而间接实现上行传输的同步性。

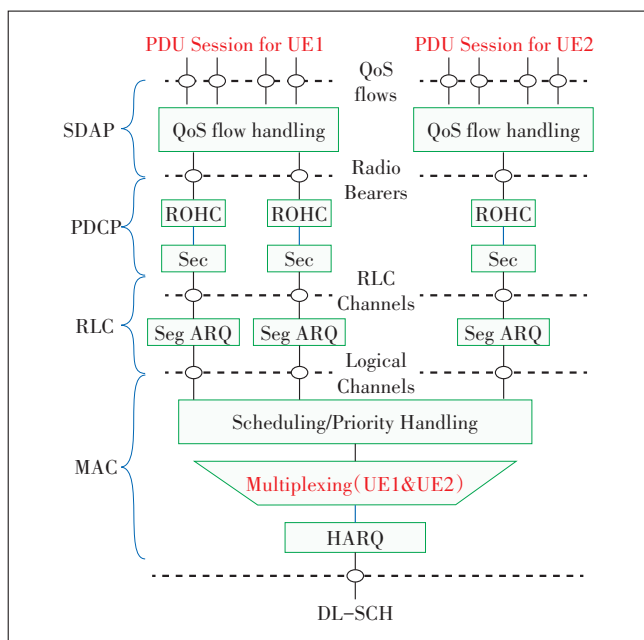


图3 多UE多模态数据在MAC层复用

3.2 支持数据包按比例丢弃机制

由于XR应用层接收端在解析数据时可能并不需要数据帧内全部的数据包,如某些数据帧PDU Set的数据包可能只需要一部分即可全部正确解析;此外XR应用层发送数据时可能一并携带FEC纠错校验包以辅助接收端应用层正确解析数据(见图4),但是当源数据全都被正确传输的情况下纠错数据就不再需要继续被传输。基于上述XR业务的特性,为了节省空口资源,有必要考虑在一定条件下支持非必要数据的丢弃。从数据的传输路径来看,无线空口上的传输性能的好坏很大程度上能决定数据传输的正确性,即如果无线空口传输性能好的话,一个数据从发送端能大概率被接收端正确接收;而反之则可能无法被正确接收。因此,在无线空口传输性能好的情况下,可以考虑支持基于非必要数据包的丢弃,该机制要求对RAN空口的数据发送端丢弃机制进行增强以节省资源,从而更好地满足XR业务的低时延高可靠数据的传输性能需求。

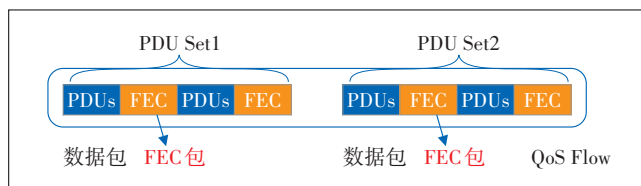


图4 XR业务数据包与FEC数据包的组成形式

3.3 支持动态可变QoS需求的数据传输机制

在实际XR业务传输过程中,有不同的QoS要求的XR和交互式媒体服务数据可能复用在同一个QoS flow中。此外,XR业务的流量模式可能会根据不同的场景发生动态变化,如媒体帧大小、到达时间等都可能动态发生变化。当前的QoS框架无法支持同一个QoS flow中差异化的QoS处理,也无法较好地支持动态变化的数据流量模式。基于此,RAN有必要考虑在Release 19中对动态QoS的XR业务进行支持。如图5所示,为了适配XR业务的动态QoS的变化需求,可以考虑RAN在进行DRB承载映射时进行动态切换,或提前为可变QoS的业务建立预备DRB,在业务特征发送变更时激活预备DRB进行数据传输,通过这种方式可以较好地支持XR业务的动态QoS需求。

以上XR相关的RAN增强技术方向只是其中的一部分,且具体的方案细节和标准影响需要在Release 19中进一步被详细讨论和研究。除此之外,随着XR

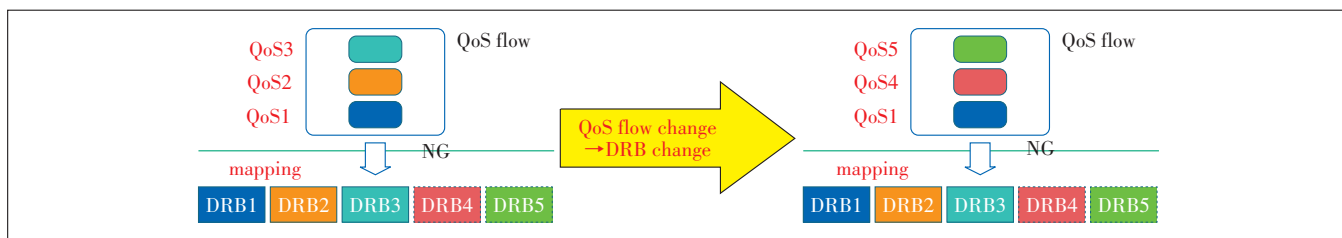


图5 支持动态QoS

应用场景的多样化发展,更多的增强技术可能会在未来被考虑,例如,XR业务回环时延保证机制,即研究如何支持上下行数据流的传输协调以满足UE和UPF之间的往返时延(RTT)要求。XR Mobility机制,即如何在移动性场景下,满足XR业务的高可靠性和低时延的要求等。在XR技术增强方面,值得进行深入研究的技术点非常多。

4 结束语

本文主要阐述了XR应用在3GPP 5G-NR标准中网络架构关键技术的演进,包括3GPP SA2的技术演进以及3GPP RAN的技术增强。增强的关键技术主要包括XR媒体业务特征感知、RAN网络拥塞信息开放、RAN空口协议增强等。通过这些增强技术,使XR业务能够在5G网络中被更好地支持,在满足业务传输需求的同时提升系统性能。此外,本文还进一步讨论了未来XR应用在无线网络中可能的增强技术演进,结合XR新的需求探讨了可能的技术方向,在保障QoS需求的基础上使网络能够更好地支持XR在未来的应用。

参考文献:

- [1] 赵亚军,郁光辉,徐汉青. 6G移动通信网络:愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学(信息科学),2019,49(8):963-987.
- [2] 陆平,李建华,赵维铎. 5G在垂直行业中的应用[J]. 中兴通讯技术,2019,25(1):67-74.
- [3] 史晓楠,熊春山,倪慧,等. 5G XR及多媒体增强技术分析[J]. 电信科学,2022,38(3):57-64.
- [4] MINOPOULOS G, PSANNIS K E. Opportunities and challenges of tangible XR applications for 5G networks and beyond[J]. IEEE Consumer Electronics Magazine, 2023, 12(6):9-19.
- [5] CHEN W S, LIN X Q, LEE J. 5G-Advanced toward 6G: past, present, and future[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(6):1592-1619.
- [6] 王卫斌,朱进国,王全. 5G核心网演进需求及关键技术[J]. 中兴通讯技术,2020,26(1):67-72.
- [7] KIM Y, KWON H J, AWONIYI-OTERI O, et al. UE power saving

techniques for extended reality (XR) services in 5G NR systems[C]// 2021 IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE, 2021:1-7.

- [8] KOUTLIA K, BOJOVIC B, LAGÉN S, et al. System analysis of QoS schedulers for XR traffic in 5G NR[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2023, 125:102745.
- [9] BOJOVIĆ B, LAGÉN S, KOUTLIA K, et al. Enhancing 5G QoS management for XR traffic through XR loopback mechanism[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023, 41(6):1772-1786.
- [10] Nokia, Qualcomm, Ericsson. Work plan for Rel-18 on XR enhancements for NR: R2-2300149[S/OL]. [2024-01-16]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/3>.
- [11] China Mobile, Huawei, HiSilicon, et al. New SID on study on architecture enhancement for XR and media services: SP-211646[S/OL]. [2024-01-16]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [12] 3GPP. Study on XR enhancements for NR: 3GPP TR 38.835[S/OL]. [2024-01-16]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [13] Nokia. Revised SID: study on XR Enhancements for NR: RP-220285[S/OL]. [2024-01-16]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [14] Nokia, Qualcomm. New WID on XR enhancements for NR: RP-223502[S/OL]. [2024-01-16]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [15] GAPEYENKO M, PETROV V, PARIS S, et al. Standardization of extended reality (XR) over 5G and 5G-advanced 3GPP new radio[J]. IEEE Network, 2023, 37(4):22-28.
- [16] 3GPP. Study on XR (extended reality) and media services: 3GPP TR 23.700-60[S/OL]. [2024-01-16]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [17] 3GPP. Study on XR (Extended Reality) Evaluations for NR: 3GPP TS 36.38.838[S/OL]. [2024-01-16]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.
- [18] 3GPP. System architecture for the 5G system (5GS): 3GPP TS 23.501[S/OL]. [2024-01-16]. <ftp://ftp.3gpp.org/Specs/>.

作者简介:

王丽萍,毕业于武汉理工大学,工程师,硕士,主要从事无线移动通信技术的研究工作;张银成,毕业于西安交通大学,高级工程师,硕士,主要从事5G-A和6G相关的沉浸式通信(XR)、通用数据面、人工智能(AI)及网络架构等方面的研究工作;邓一伟,毕业于重庆邮电大学,工程师,硕士,主要从事移动通信新技术研究与标准制定工作;唐小勇,高级工程师,硕士,主要研究方向为大规模天线、AI通信及低功耗通信等。