



中国联通 5G URLLC 技术白皮书

V3.0

中国联通

2022 年 5 月

目录

1	引言	1
2	URLLC 业务需求	4
2.1	典型场景及业务需求	4
2.2	网络能力分级	6
3	URLLC 关键技术	9
3.1	无线网关键技术	9
3.1.1	低时延增强技术	9
3.1.2	高可靠增强技术	14
3.1.3	URLLC 无线灵活智能配置技术	17
3.2	核心网 URLLC 增强技术	18
3.2.1	低时延保证	18
3.2.2	边缘能力增强	18
3.2.3	QoS 增强	20
3.2.4	高可靠保证	21
3.3	移动回传承载网 URLLC 保障技术	23
3.3.1	L3VPN 边缘部署	24
3.3.2	承载网络切片技术	24
3.3.3	基于 SR 的差异化路径优化	25
4	URLLC 网络部署参考设计	26
4.1	网络切片部署参考设计	26
4.2	业务共存部署参考设计	27
4.3	TSN 融合部署参考设计	29
5	中国联通 URLLC 实践	33
5.1	URLLC 能力构建	33
5.1.1	低时延能力	33
5.1.2	高可靠能力	34
5.1.3	确定性能力	35
5.1.4	指标监测能力	35
5.2	5G-A URLLC 技术演进与创新实践	36
5.3	规模实施路径与关键举措	38
6	总结和展望	41

版权声明

本白皮书版权由中国联通研究院拥有，并受法律保护。转载、编摘或利用其他方式使用本白皮书文字或者观点的，应注明来源。

作者

中国联通

李静、李福昌、张涛、王海军、庞冉、
任驰、马瑞涛、魏进武、李红五、马红兵

1 引言

随着 5G 新型基础设施建设政策的发布，我国 5G 网络加速普及，从信息通信实现人与人之间的连接，迈向万物互联的数字化新时代。5G 技术将应用于工业、农业、家居、医疗、物流、交通等各个领域，助力全球数字化转型。其中，工业是 5G 应用的重点领域，“5G+工业互联网”为传统领域带来了新的机遇与挑战。中国联通目前正在加快推进 5G+工业互联网等典型应用从“样板间”推广到“商品房”，助力千行百业转型升级。中国联通董事长刘烈宏题为《锚定数字经济主航道 共赢数字世界新未来》的主演讲中发布了中国联通新定位、新战略、新主业，在新战略新定位下，中国联通将围绕“大联接、大计算、大数据、大应用、大安全”五大赛道作为主责主业，实现发展动力、路径和方式的全方位转型升级，更好地开辟新发展空间、融入新发展格局。

URLLC 是 5G NR 的三大关键应用场景之一。为了满足 URLLC 的要求，5G R15 版本为 URLLC 提供了新的特征，如可扩展的子载波间隔、子时隙级别的 UL 和 DL 传输、业务信道时隙粒度重复、Low SE MCS/CQI 表格、上行免授权、DL eMBB 和 URLLC 多路复用抢占指示和 PDCP 复制等。虽然 R15 版本的 URLLC 可以提供非常低的空中接口延迟和高可靠性，但该版本旨在支持智能电网、娱乐业中的增强和虚拟现实等用例。

R16 版本继续进一步开发 URLLC 的物理层设计，以处理 R15 中未解决的问题，R16 版本中引入了对延迟和可靠性的进一步增强，这是为了扩大工业物联网用例集以支持具有更严格要求的工业物联网，包括对新用例的需求增加，如工厂自动化、配电和运输行业（包括远程驾驶用例）。为支持 URLLC 的新用例，R16 标准化了一些新功能，例如上行多套 CG 配置、下行多套 SPS、增强的物理下行链路（DL）控制信道监控能力、紧凑型的 DCI 格式、子时隙物理上行链路（UL）控制信道传输、子时隙级物理 UL 共享信道重复、增强的 eMBB 和带有取消指示和增强的功率控制的 URLLC 用户间复用。

R17 版旨在通过改进反馈、用户内多路复用和不同优先级的流量优先级、时间同步支持和新的服务质量相关参数等机制，进一步增强 URLLC 功能。此外，URLLC R17 版中已授权和未授权频谱中的 URLLC 功能都在标准化，R17 版旨在增强 R16

版的功能,并将URLLC扩展到除R15版和R16版中许可频谱之外的未许可频谱上,以便URLLC传输实现更好的性能。

5G URLLC 技术的能力与以往追求速率的通信技术有很大不同,其主要特点是具备低时延和高可靠性,为工业自动化、智慧电网等应用场景提供了实时信息的高可靠传输保障。但是从技术方案到应用的落地,如何打通 URLLC 通信技术与传统行业之间的壁垒,释放出 URLLC 技术的能力成为了目前亟待解决的问题。

ITU 制定了 5G 网络空口侧在 URLLC 场景下所需要满足的时延与可靠性关键性能指标要求。但是,对运营商而言,分析端到端的业务需求,并从端到端的角度设计 5G URLLC 网络性能指标的提升方案,是推动 5G URLLC 网络成熟的重要因素。相比 eMBB 网络, 5G URLLC 网络需要满足以下要求:

- 在 eMBB 网络基础上,可以在尽量不影响网元硬件部署方案的情况下,通过软件功能升级的方式,一定程度提升网络低时延与高可靠通信能力;
- 可以通过软硬件结合的 5G 网络部署与升级方案,提供极低时延、超高可靠性的业务端到端保障能力;
- 通过 5G 网络协议升级,融合部署协议转换单元,支持时间敏感网络(TSN)功能,实现特定业务的确定性传输;
- 支持工业协议与 5G 的共存互通,推动 5G 广泛应用于工业领域,打造智能制造产业生态;
- 支持网络能力管理,在网络的能力范围内,可以按照业务需求,实现端到端业务保障能力的定制化;
- 支持网络能力监测,可以实时或者周期性的监测网络 URLLC 能力,监测结果可以辅助进行网络故障定位,实现网络 URLLC 能力快速恢复;

具备增强的时延与可靠性保障能力的 5G 网络初期主要应用于垂直行业领域,以园区的局域性覆盖方式为主,对于网络覆盖范围内的不同终端,可以提供基本一致的端到端业务保障能力,助推 5G 网络与垂直行业融合。此外,在广域的宏网覆盖场景下,网络覆盖区域内不同终端受传输网影响会带来差异化的端到端业务时延,URLLC 网络方案可以通过空口侧的软件升级,提升空口的网络时延与保障能力,优化业务体验,同时为满足未来新兴的 URLLC 业务奠定基础。因此,在广域与局域的应用场景下,5G URLLC 网络需要有不同的评价标准。

工业应用是 5G URLLC 网络与垂直行业融合的一个重要应用领域，而 TSN 网络是下一代工业网络的发展方向，因此，5G URLLC 网络需要具备支持 TSN 功能的能力，通过增强 5G 协议功能或者 5G 网络融合 TSN 协议转换单元的方式，提升 5G URLLC 网络的 TSN 保障能力。

在 5G URLLC 网络可以提供的业务保障能力范围内，网络需要具备按照业务需求提供定制化的网络部署方案的能力，或者，可以依据覆盖范围内的不同业务种类，提供定制化的业务性能保障能力。

2 URLLC 业务需求

2.1 典型场景及业务需求

5G 网络具有全灵活性、适配性和可扩展性的特点，不仅可以满足公众个人娱乐的需求，更是社会数字化转型的基石，可以为垂直行业提供泛在连接和智能化服务。传统的 eMBB 类业务可靠性要求为 99%，对于时延没有特殊要求，广义的 URLLC 类业务应包含低时延类 eMBB 业务和超高可靠低时延类业务。为了更好地阐述广义 URLLC 类业务场景和需求，我们选取典型的业务，从业务应用的地理区域、面向的对象可分为如下几类：

(1) 广域，消费类——典型业务：XR

XR 包括 AR、VR 和 MR 等，基于云计算的 Cloud VR/AR 在云端完成大量的应用处理，降低了头显设备和终端的性能要求，在个人消费市场中有巨大的市场潜力。XR 业务对网络的带宽、时延、云渲染等能力提出了较高要求，是区别于 5G eMBB 的新兴业务。面向公众的 XR 业务应用包含 VR 游戏，VR 影视，VR 直播，AR 辅助旅游应用。XR 在垂直行业也具有巨大潜力，如 VR 教育，VR 培训，AR 多人协作，AR 远程协助等，属于局域行业类业务，对时延、可靠性的要求比公众 XR 更高。

(2) 广域，行业类——典型业务：智能电网

随着新能源的快速发展，传统电网升级到智能电网是必然趋势，5G+智能电网是成熟的 5G 垂直行业应用，已在多地开展试验验证。5G 网络可以为终端节点提供无线接入，相比于传统的专用光缆或专线具有成本优势。毫秒级精准控制业务在电网直流线路发生故障时，在毫秒级时间内通过控制可控电力用户负荷、分布式能源等，恢复电网稳定，业务需求具有低时延高可靠性特点。此外，自动化配电和差动保护也是智能电网中典型的 URLLC 业务。

(3) 局域，行业类——典型业务：工业互联网

工业互联网是 5G URLLC 的典型应用，部署范围是工业园区或工厂车间，对

于广覆盖的 5G 网络呈现点状部署特点。在工业领域，一般采用工业以太网作为连接技术，限制了工业制造的灵活性、柔性和高效性，5G 可以将传感器、机器臂等工业设备以无线方式接入工业以太网，是未来工业互联网重要的使能技术。智能工厂中的典型 URLLC 业务包括远程控制，离散制造，运动控制等。

3GPP 关于 URLLC 典型业务的关键需求指标如下表。

表 1 典型业务需求指标

用例	可靠性	时延	数据包大小和流量模型	说明
配电	99.9999	E2E: 5 ms 空口: 2~3 ms	DL & UL: 间隔 100 ms、100 字节、ftp 模型 3	配电、电网故障和停电管理 (TR 22.804:5.6.4)
	99.999	E2E: 15 ms 空口: 6~7 ms	DL & UL: UE 之间有 250 字节的周期和确定性，间隔为 0.833 ms 随机偏移	差动保护 (TR 22.804:5.6.6)
工业自动化	99.9999	E2E: 2 ms 空口: 1 ms	DL & UL: 数据到达周期间隔为 2 ms、32 字节确定性流量模型	运动控制
R15 用例 (如 AR/VR)	99.999	空口: 1 ms @ 32B 空口: 1 ms 和 4 ms @ 200B	DL & UL: 周期性的具有不同的到达率 32 和 200 字节的 FTP 模型 3	
	99.9	空口 7 ms	DL & UL: 周期性的具有不同的到达率的 4096 和 10K 字节的 FTP 模型 3	
运输业	99.999	E2E: 5 ms 空口: 5 ms	UL: 2.5Mbps: 包大小 5220 字节 DL: 1Mbps: 包大小 2083	智能交通系统 ITS (TS 23.501, TS 22.261)

			字节 注：数据到达速率为每秒 60 个数据包的周期性流量模型	
	99.999	E2E: 10 ms 空口: 7 ms	UL & DL: 1.1Mbps: 包大小 1370 B 注：数据到达速率为每秒 100 个数据包的周期性流量模型	智能交通系统 ITS (TS 23.501, TS 22.261)

对于电网和工业互联网类业务，除了表内所列的需求指标外，其对数据包确定性、高精度时钟同步和时延抖动都有非常苛刻的要求。

2.2 网络能力分级

对 URLLC 类典型场景和业务需求分析，可以看出：

- 某些带宽要求较高的业务在时延和可靠性指标上没有严苛要求，可基于 5G 大网叠加增强技术来满足业务需求；
- 电网业务和部分工业互联网业务的指标要求近似，典型的面向行业的 URLLC 类业务时延需求为端到端 10~50ms，可靠性需求为 99.9%~99.999%；
- 工业互联网业务的时延和可靠性指标要求最为严苛，可靠性需求达到 99.9999%，端到端时延需求达到 ms，而对于带宽要求不高；
- 运输行业业务对上行速率较高，对带宽要求较高。

为了匹配不同等级的 URLLC 类业务需求，我们提出对 URLLC 网络能力进行分级，分阶段分级构建不同的 URLLC 网络能力，打造中国联通高质量 5G URLLC 网络。



图1 5G URLLC 网络能力分级

5G 网络能力分级如图 1 所示，从 L0 到 L3，对网络的覆盖区域要求逐级递减，对时延和可靠性的要求逐级递增，具体定义如下：

- **L0：5G 广覆盖网络**

从 2019 年开始，国内三家运营商开始 5G 规模试验和商用部署，建设 5G 广覆盖网络面向个人消费者提供 eMBB 业务，中国联通和中国电信采用共建共享方式，依托 3.5GHz/2.1GHz 频段快速推进 5G 部署范围，打造 5G 品牌竞争力。

- **L1：URLLC 入门级网络**

URLLC 入门级网络是指基于 5G 广覆盖网络，面向个人消费市场满足的对时延、可靠性有进一步要求的业务需求，例如视频游戏、AR/VR 等；升级部分 URLLC 技术方案进一步增强网络性能。潜在的技术方案包括：网络切片（软隔离），QoS 保障，空口时延增强方案，UPF 按需下沉，MEC。L1 级也可视为 L0 增强网络。

时延要求：百毫秒量级

可靠性要求：99.9%

- **L2：URLLC 增强网络**

URLLC 增强网络主要面向行业用户，网络覆盖范围按行业用户需求建设，一般为区域范围内部署，如电力配电自动化以及差动保护，港口远控等业务，后期部署范围可扩展至全国。L2 级网络承载的业务为典型的 URLLC 业务，实现低时延和高可靠的网络能力，针对不同的行业用户，在网络安全性、高精度时间同步授时等方面也有相应的增强能力。潜在的技术方案包括：网络切片（硬隔离），针对 URLLC 业务的 QoS 增强，空口低时延增强方案，空口高可靠方案，冗余传输，

传输网 FlexE 方案，专用 UPF，MEC。

时延要求：几十毫秒量级

可靠性要求：99.9% ~ 99.999%

- **L3：极致 URLLC 网络**

极致 URLLC 网络面向特定行业用户，网络覆盖范围一般为园区或工厂级，例如工业现场实时控制、运动控制等业务。L3 级网络承载的业务复杂多样，对网络性能要求严苛，在确定性通信、高精度时间同步、安全性、高精度定位等方面都有增强要求。L3 级的目标是为特定行业打造极致体验的 URLLC 网络，潜在的技术方案包括：针对 URLLC 业务的 QoS 增强，空口低时延增强方案，空口高可靠方案，5G 和 TSN 融合，NPN，冗余传输，专用核心网等。

时延要求：几毫秒量级

可靠性要求：99.999% ~ 99.9999%

综上，我们提出三级 URLLC 网络能力，包括 URLLC 入门级网络，URLLC 增强网络和极致 URLLC 网络，结合产业现状和发展目标，随着 5G/5G-A URLLC 标准演进和网络及终端产品的能力提升，针对不同的业务和场景构建差异化的 URLLC 网络能力。随着研究不断深入，我们将继续完善网络能力分级框架，研究潜在的细分方案，搭建能力分级和技术元素之间的映射关系。

3 URLLC 关键技术

3.1 无线网关键技术

3.1.1 低时延增强技术

(1) 非时隙调度

4G 与 5G 网络均支持在时域采用连续的 14 个 OFDM 符号为粒度，进行业务数据传输。以 15 kHz 的子载波间隔为例，每次调度占用的时长为 1 ms，而即使在 30 kHz 的子载波间隔情况下，14 个 OFDM 符号的占用时长仍需 0.5 ms，对于有极低时延需求的 URLLC 业务，该调度粒度仍然有优化的必要。

实现业务的“随到随传”在部分 URLLC 场景下是至关重要的，5G 网络在业务的调度机制中制定了基于 slot 以及 mini-slot 的调度方案，两种调度方案的主要区别在于一次调度中包含的 OFDM 符号数以及调度的起始位置。基于 mini-slot 的业务调度可以实现在上下行链路中采用较少的 OFDM 数这种更小的调度粒度完成业务的传输，而且调度起始位置不需要与时隙起始位置对齐，可以灵活配置调度起始位置，降低业务传输所占用的时间。3GPP 定义的基于 slot 及 mini-slot 传输的配置如下表所示：

表 2 基于时隙与非时隙调度的配置

调度方案		普通循环前缀		扩展循环前缀	
		起始符号	调度符号	起始符号	调度符号
下行	slot 级调度	{0, 1, 2, 3}	{3, ..., 14}	{0, 1, 2, 3}	{3, ..., 12}
	mini-slot 级调度	{0, ..., 12}	{2, ..., 13}	{0, ..., 10}	{2, 4, 6}
上行	slot 级调度	0	{4, ..., 14}	0	{4, ..., 12}
	mini-slot 级调度	{0, ..., 13}	{1, ..., 14}	{0, ..., 11}	{1, ..., 12}

(2) 配置授权调度

基站作为蜂窝无线接入网的控制单元，负责所有上下行业务的数据调度。终端存在上行调度需求时，需要向基站申请调度授权，以获取相关的调度参数以及

时频域资源等信息。5G 网络支持传统的业务调度机制，该机制下终端与基站的调度请求及授权交互需要跨越多个时隙，在 URLLC 场景下，该机制将带来较大的数据发送等待时延。

上行配置授权调度机制采用了基于非动态授权的业务传输方案，基站发送 RRC 消息对上行传输的周期、时频域资源、MCS 等参数进行配置，通过激活相关授权，在业务数据到达后，终端即可以进行多次上行传输。5G 网络支持 Type 1 及 Type 2 两种配置授权激活方案，其中，Type 1 方式下，终端在接收到 RRC 消息后，根据时域偏置进行授权配置的激活；Type 2 方式下，终端通过接收 DCI 消息激活配置授权。

针对不同的业务、业务类型、增强可靠性和减小时延等情况，同一个 BWP 内可激活最多 12 个上行 CG 配置。对于下行半静态调度，同一个 BWP 内可激活最多 8 个 SPS 配置。

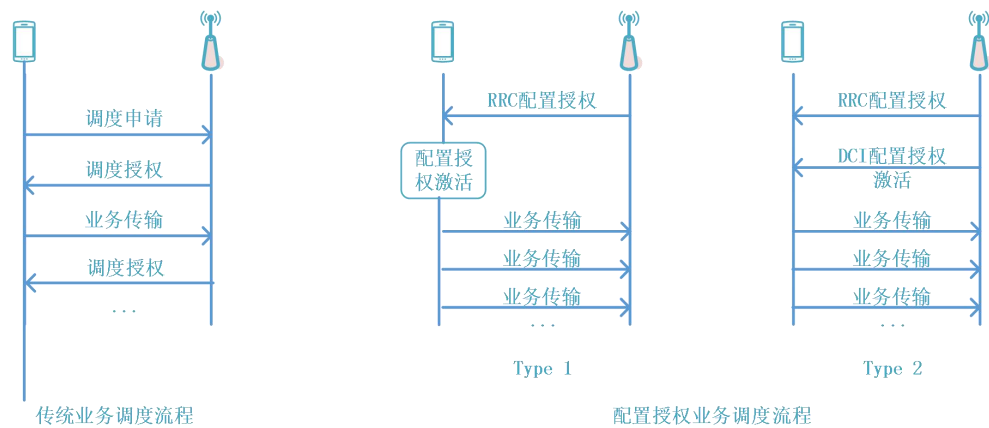


图 2 配置授权调度

(3) 传输反馈增强

• 基于 CBG 的 HARQ-ACK

5G 网络的业务数据支持以 TB（Transmission Block，传输块）为粒度进行调度传输，一个 TB 可能包含非常多比特，LDPC 编码下，TB 中的一个 CB（Code Block，编码块）最大可以有 3840 或 8448 比特，而一个 TB 可以包含数十个以上的 CB。在 TB 传输发生错误的情况下，存在一个 TB 内部可能只有少数 CB 产生误传的情况，以基于 TB 的 HARQ 机制进行完整传输块的重传，会造成物理层资源的浪费。

通过将 CB 分组形成 CBG（Code Block Group，编码块组），以 CBG 为粒度，设计基于 CBG 的 HARQ 机制进行重传，可以仅重传包含错误 CB 的 CBG。因此，基于

CBG 的反馈可以降低重传的资源消耗，间接提升网络的频谱效率。此外，在资源复用的场景下，基于 CBG 的反馈可以在保障 URLLC 业务低时延的同时，降低 eMBB 业务的受影响程度。

一个 TB 中可配置的 CBG 数量包括：

表 3 CBG 配置

	单码字	多码字
可配置最大 CBG 数量	2, 4, 6, 8	2, 4

• 时隙内多 HARQ 反馈

面向 URLLC 业务，在单次传输失误的情况下，降低数据传输反馈的时延，在业务时延允许范围内完成重传是提升用户业务体验的重要方案之一。

随着 5G 网络对非时隙调度的支持，在终端业务并发的场景下，可以在一个时隙内完成多次基于 mini-slot 的数据传输，因此，在一个时隙内完成对多次基于 mini-slot 传输数据的反馈是优化反馈时延的重要方向之一。提升可携带 HARQ 的 PUCCH 数量以及每个 PUCCH 中可携带的 HARQ 码本数量可以实现时隙内多 HARQ 的反馈。R16 协议定义了 sub-slot 的 PUCCH HARQ 反馈的时间单元长度：

- 常规 CP 长度：sub-slot 长度为 2 或 7 OFDM 符号；
- 扩展 CP 长度：sub-slot 长度为 2 或 6 OFDM 符号；

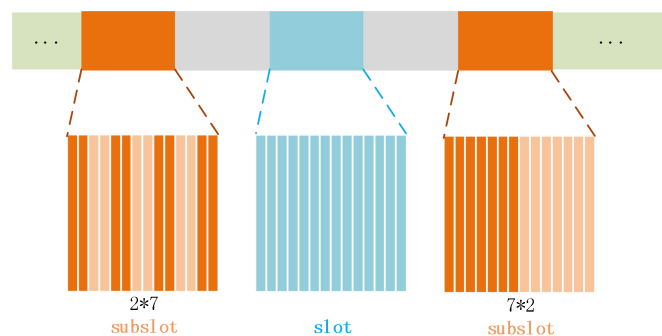


图 3 时隙内多 HARQ 反馈

基于 sub-slot 的 HARQ 反馈可以加速 PDSCH 的 ACK/NACK 反馈，进一步加强 URLLC 业务的低时延特性。时隙内多 HARQ 反馈机制的增强设计，意味着 5G 网络对 URLLC 业务低时延特性支持度更加成熟，也可以提升 5G URLLC 网络应对不同 URLLC 应用场景的灵活性与普适性。

- CA 场景的 ARQ-ACK 反馈

CA 场景下，主辅载波可采用不同的帧结构，如果 PCell 是 TDD 制式并且下行时隙占比远高于上行时隙，则 HARQ 反馈可能有很长的延迟。为了解决此问题，3GPP 支持在多载波配置下，对发送 PUCCH 的载波进行切换。通过 RRC 或者 DCI 的指示，基站可以通知 UE 可以在候选的载波群组内对所使用的 PUCCH 进行切换，以获得低时延收益。

- SPS 的 HARQ 反馈

在 TDD 系统中进行 DL SPS 传输时，PDSCH 与对应的 HARQ-ACK 反馈之间的时隙间隔为通常被提前指定为固定值 K_1 。在 5G 系统中，若 SPS 对应的 HARQ-ACK 反馈与动态调度发生传输冲突，可能存在 UE 的 HARQ-ACK 无法反馈从而被丢弃的情况。因此 3GPP 定义了针对 DL SPS 传输的 HARQ-ACK 反馈延迟后发送机制，可支持 UE 将 HARQ 反馈的时间推迟至最近的上行子帧，有效降低反馈时延。

- 复用情况下的 HARQ-ACK 反馈

为了实现对不同的业务提供不同 HARQ-ACK 码本构建的能力，URLLC 的 UCI 增强方案包含了对双码本反馈方案的设计，支持 URLLC 下行数据和 eMBB 下行数据的 HARQ-ACK 分别反馈，降低了 URLLC 业务的 HARQ 反馈时延。

(4) URLLC 与 eMBB 资源复用

- 下行资源复用

5G 网络下，低优先级业务与高优先级业务存在并发的场景，低优先级业务的时延容忍度较高，可以采用基于 slot 的调度方式，当高优先级业务触发后，为满足其业务的时延需求，网络可以将已分配用于低优先级业务调度的空口资源复用于高优先级业务，保障高优先级业务的随到随传。在资源复用的场景下，低优先级类业务将受到影响，因此，需要网络发送相关的 PI (Preemption Indication, 抢占指示) 信息，向低优先级业务的终端指示业务潜在的受损风险。

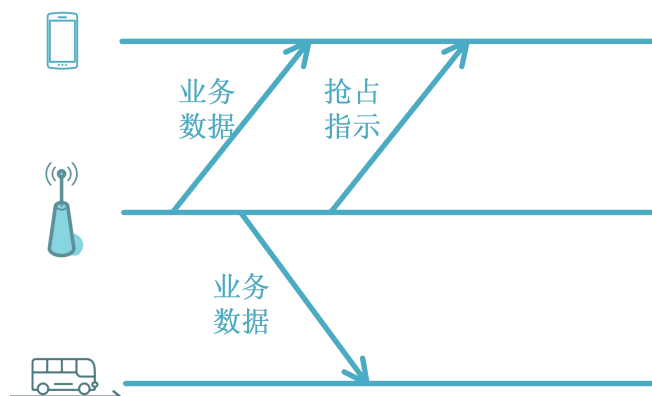


图 4 下行资源复用

下行的资源复用需要考虑同一终端内部的资源复用以及不同终端间的资源复用。在下行资源复用的场景下，可以由网络向低优先级业务的终端发送专有的 DCI Format 2_1 格式的信息进行复用资源的指示，该格式 DCI 指示了低优先级终端被抢占的资源情况，该 DCI 可以由高层进行配置。

下行动态资源复用的机制为 eMBB 业务与 URLLC 业务共存场景下业务传输提供了有效的资源保障与复用方案，提升了业务共存场景下的资源利用效率，并保证了 URLLC 业务的低时延特性，同时也将对于 eMBB 业务终端的影响降到了最低。

• 上行资源复用

上行资源复用方案是指 5G 无线网络中空口已经分配用于用户 A 上行业务数据传输的时频资源可以被用户 B 复用（优先）进行上业务数据传输。5G 网络支持上行的资源复用机制，相比于下行的资源复用机制，上行资源复用需要结合终端行为完成动态调度处理，因此，设计难度远比下行复杂，目前上行资源复用确定了两种不同的复用方案。

第一种是基于取消指示的上行资源复用方案：以保障低时延业务优先传输为原则，基于上行取消的信令指示，当业务资源发生冲突时，优先级较低的业务可通过发送上行取消指示，取消正在传输的上行数据或还未开始的上行数据。

第二种为基于功率控制的上行资源复用方案：通过动态功率提升的方式，增大优先级较高的业务的发射功率，而优先级较低的业务则保持原有发射功率不变。

两种方案可以由运营商依据应用场景以及部署需求自由选择。方案流程示意图如下：

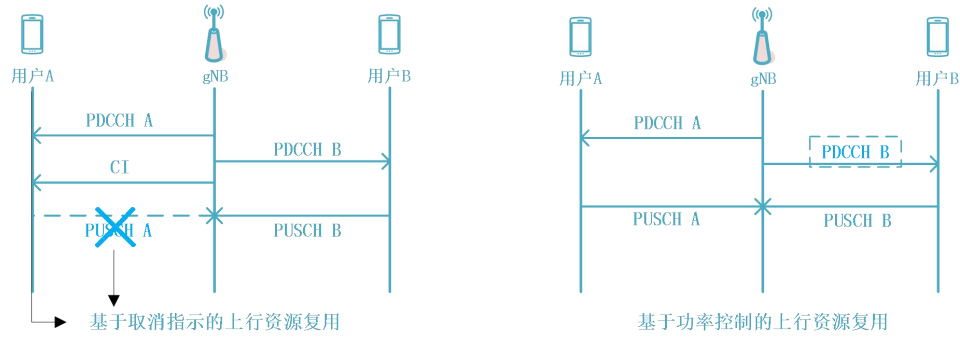


图 5 上行资源复用

相比传统上行仅采用时频资源的硬分割方案来保障业务调度的传输方式，引入上行动态资源的优先与复用机制可以进一步提升 URLLC 业务调度的灵活性与网络资源利用效率。其中，上行取消方案可消除 eMBB 对 URLLC 数据的同频干扰，提高 URLLC 数据的可靠性，减少时延。上行功控方案通过灵活的开环功控参数选择，在保证 URLLC 业务时延可靠性的同时，提高复用效率。

• UE 内优先级处理

当同一 UE 终端上存在不同优先级 UCI 传输时，若低优先级 UCI 被取消发送，则会导致对低优先级 UCI 的不必要的重传。R17 定义了 PUCCH 和 PUSCH 的复用策略，支持将同一终端上不同优先级的 UCI 复用在一个 PUCCH 或 PUSCH 内进行发送。

对于动态调度和配置授权调度之间的冲突处理，若存在不同的业务优先级，则不再按照动态调度优先的方案进行传输，而是按照业务优先级进行划分，此种冲突下终端采取取消较低优先级的资源调度上的传输的策略，优先保证高优先级业务的传输。

3.1.2 高可靠增强技术

(1) 下行控制消息增强

在业务调度与发送的过程中，灵活与适配的 DCI 设计是数据传输的基础。对于 URLLC 业务，针对其业务调度特性的 DCI 设计也可从另一个方面保障 URLLC 的业务特性。

一方面，URLLC 场景的技术设计考虑了专有的上下行 URLLC 业务调度的 DCI 设计方案。首先从可靠性方面，减小 URLLC 业务调度所使用的 DCI 的最小比特数，可以降低对物理层资源的需求，且在相同聚合等级下可以支持更低的码率，进一

步增加了传输的可靠性并缓解控制消息调度阻塞的概率。而在灵活性方面，设计了更多可配置的 DCI 域，使得 URLLC 业务调度在不同场景下都可得到适配。NR R16 共引入 2 个新的 DCI 格式，上行 DCI format0_2 和下行 DCI format1_2，通过改变指示域的指示方式以及灵活配置每个指示域的大小，可以实现比 DCI format 0_0/1_0 更小的有效载荷大小，也可以实现与 DCI format 0_1/1_1 可比的调度灵活性。

另一方面，3GPP 对 URLLC 场景下的 PDCCH 检测能力进行了增强：将 PDCCH 盲检测候选次数按照 span 进行划分，支持以 span 为单位进行 PDCCH 盲检测。此方案增加了一个时隙内候选 PDCCH 的总个数，保证了时延和可靠性。

表 4 R16 每个时隙内最多的 PDCCH 盲检测次数

μ	PDCCH 检测候选位置的最大值		
0	14	28	44
1	12	24	36

此外，对于 URLLC 而言，因其业务的高可靠性特点，支持将 PDCCH 的控制信息配置为 AL=16。

(2) 调制与编码方案增强

在 URLLC 场景下，为了满足 99.999% 的可靠性要求，3GPP 定义了支持 10^{-5} 目标 BLER 的 CQI 新表格和 MCS 新表格。引入了 $\pi/2$ BPSK 的调制方案，同时可以支持更低的编码效率。新的 64QAM MCS 表可支持目标 BLER 配置为 10^{-5} 。通过降低 MCS 等级的方案，可以在恶劣信道环境以及边缘覆盖中进一步增强 URLLC 单次业务传输的可靠性。此外，提高单次传输的可靠性，可以降低业务对重传的需求，从而间接减小业务时延。

(3) 物理层重复传输

• PUSCH 重复传输

数据采用不同冗余版本进行重传是 HARQ 过程的典型特征。5G 网络在 URLLC 场景下，在无传输反馈的前提下，可以将不同冗余版本的数据在物理层不同时隙重复传输。而通过该物理层重复传输机制，接收端可以获取额外的分集与数据合并增益，从而实现对传输数据可靠性的提升。

PUSCH 重复传输类型 A 在 R15 中被定义，其特征在于 PUSCH 在多个连续时隙

中的相同时域符号上重复传输，重复次数由高层参数配置。PUSCH 重复传输类型 A 支持时隙内和时隙间跳频。

R16 引入了 PUSCH 重复传输类型 B，并对 PUSCH 重复类型 A 进行增强。对于 R16 PUSCH 重复类型 A，需在 RRC 消息 PUSCH-Config (动态调度) 或 ConfiguredGrantConfig (配置授权调度) 中将重复类型置为 “pusch-RepTypeA”，时域资源分配由 SLIV 表的索引值指示传输的起始位置 S 和长度 L，传输不可跨越时隙边界，在每个时隙的固定位置传输；对于 R16 PUSCH 重复类型 B，需在 RRC 消息 PUSCH-Config (动态调度) 或 ConfiguredGrantConfig (配置授权调度) 中将重复类型置为 “pusch-RepTypeB”，时域资源分配由 TDRA 表分别指示起始位置 S 和长度 L，传输可以在一个 slot 内，也可以跨越连续可用的 slot 的边界。

PUSCH 重复类型 A 可提高 URLLC 业务传输的可靠性、增强覆盖。PUSCH 重复类型 B 与类型 A 相比，更加灵活，不仅可以提高 URLLC 业务传输的可靠性、增强覆盖，还可以兼顾到 PUSCH 传输的时延。

• PDSCH 重复传输

为提高下行数据信道的可靠性，URLLC 可支持为 UE 配置 PDSCH 重复。R16 可支持的 PDSCH 重复传输次数可以为 {2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 16}。

• PUCCH 重复传输

对于 PUCCH 信道上传输的 HARQ 反馈，由于 R16 协议仅支持 Slot 级别的 PUCCH 重复，为保证 sub-slot 级别的 HARQ 反馈的可靠性，R17 提出 sub-slot 级别的 PUCCH 重复方案，新的标准方案支持动态指示 PUCCH 重复传输次数，且增加了 HARQ 反馈码本的鲁棒性。

(4) PDCP 层数据复制

PDCP 数据复制是 5G 网络高层基于载波聚合或双连接提升可靠性的传输方式。该传输方式下，相同的数据包将会被复制为多份，经不同的无线空口资源进行传输，从而在接收端可获取相应的分集增益以提升传输可靠性。

PDCP 数据复制，会在 PDCP 层将同一份数据包复制多份，映射到不同的逻辑信道，对应不同的 RLC 实体，原始的 PDCP 数据包和复制的 PDCP 数据包将会在不同的载波上进行传输。当在载波聚合的场景下，不同的逻辑信道属于相同的 MAC

实体，而在双连接的场景下，不同的逻辑信道属于不同的 MAC 实体。

R16 中最多可以支持 PDCP 重复关联到 4 个 RLC 实体，即可以配置最多 4 条腿，如下图所示：至多 4 条腿可以是配置在一个基站侧，即 CA duplication 架构，也可以配置在两个基站侧，形成 DC duplication 或 DC+CA duplication 架构。基站指定其中的一条腿为主腿（primary leg），主腿总处于激活状态，无法通过控制信令进行去激活；除主腿外的腿为辅腿（secondary leg）。

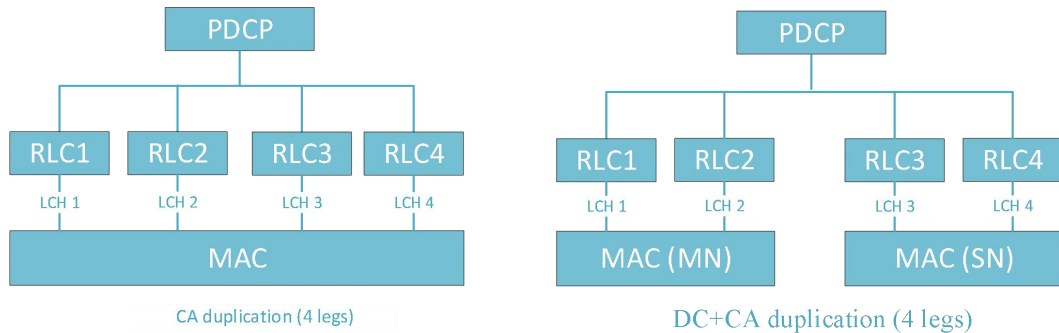


图 6 PDCP 层数据复制流程示意图

PDCP 数据复制支持把相同的 PDCP 包重复传输最多 4 次，可减少无线链路失败导致的可靠性降低。对于 URLLC 而言，PDCP 数据复制也是在时延保证的基础上进行可靠性提升的一种手段，相对于重复发送对于时延的控制更为灵活。然而，也为可靠性的提升牺牲了一定的无线资源，降低了无线资源的利用效率。

3.1.3 URLLC 无线灵活智能配置技术

“灵活”是 5G 网络的重要特征之一，为了支持低频、中频以及毫米波多种频段和不同带宽的通信，在考虑设备实现复杂度的情况下，5G 网络定义了灵活可配的多种子载波间隔：低中频支持 15 kHz、30 kHz、60 kHz 的子载波间隔配置，而毫米波频段可以支持 60 kHz、120 kHz 的子载波间隔配置。子载波间隔的大小决定了调度采用的 OFDM 符号长度，因此，更大的子载波间隔也更有利于单位调度时延的降低，有利于 URLLC 通信的低时延保障。

“控制+业务”的传输机制是蜂窝通信网络设计的重要原则，5G 在无线接入网的上下行控制信道方面，设计了不同能力的配置方案。下行控制信道通过 CORESET（Control Resource Set，控制资源集）承载，而 CORESET 在时域以及频域均支持灵活起始 OFDM 符号、灵活子载波的配置，时域的灵活配置可以缩短控制信息与数据信息的时间间隔，有利于时延降低。此外，上行控制信道支持短格式

UCI 的传输，通过配置短格式 UCI，有利于降低 URLLC 业务数据的反馈时延，优化业务时延的体验特性。

参考信号的合理设计是实现无线通信系统可靠传输的重要保障，5G 网络采用 DMRS 辅助完成信道估计以及信息解调，保障信息传输的可靠性。在 DMRS 的设计中，控制信道以及数据信道均包含了 DMRS，尤其是针对数据信道，支持前置的 DMRS 配置方案，通过提早接收机开始信道估计的时间，可以有效降低数据解码所需时间。此外，5G 网络支持多个 DMRS 发送时刻的配置，通过增加 DMRS 时域密度，可以提高数据传输的可靠性。

此外，双工方式、TDD 帧结构、BWP 等不同的 5G 网络部署配置方案，会对业务体验带来不同的网络时延以及可靠性影响。通过合理配置 5G 网络功能和参数，一定程度上也有利于 5G 网络在 URLLC 场景中的部署。

3.2 核心网 URLLC 增强技术

3.2.1 低时延保证

无线网络端到端时延包括了终端到基站的空口时延以及基站到核心网 UPF 之间的传输时延，此外，还包括各类业务的业务计算与处理时延、UPF 到本地数据网络内的传输时延以及本地数据网络内部的拥塞时延。空口时延可以通过无线侧 URLLC 增强技术进行优化；业务计算与处理时延可以优化业务自身流程和计算处理单元结构来完成；本地数据网络内部的拥塞情况主要影响信令下发和业务结果上传，需要优化本地数据网络内部网络架构和信令流程来实现。本节主要聚焦核心网低时延保证的几种方法。

3.2.2 边缘能力增强

5GC 从设计之初即考虑对边缘计算的支持，并为此定义了多种网络能力增强机制，包括通过上行分类器或者分流点进行上行数据分流机制、应用触发数据分流机制、用户面变化上报、本地接入数据网络等，结合核心网网元下沉，5GC 将比 4G 核心网更好地支持边缘服务。但针对边缘服务的增强也需要整个产业链实现端到端的支持，从终端、网络到业务，从基础设施资源管理到应用的动态编

排以及应用的移动性角度考虑，还有诸多关键问题需要进一步解决。

3.2.2.1 核心网网元下沉

基站到核心网 UPF 之间的传输时延，主要受到 UPF 网元部署位置的影响。目前，UPF 可选的部署位置覆盖整个通信云，包括各级区域 DC 与边缘 DC。UPF 部署位置越高，其服务业务覆盖范围就越广，同时基站与 UPF 交互所需的时延也越大。为了支持低时延通讯，应该尽可能的减少基站到 UPF 之间的转发跳数、传输光纤长度和汇聚网元的数目，以降低基站到核心网之间的传输时延。因此，需要将 UPF 尽量部署在靠近基站的位置，从物理上降低基站到 UPF 的传输距离，同时保证传输不上承载网，减少拥塞的可能性。但 UPF 下沉也会导致核心网用户面网元的覆盖范围受限，且需要进行低层级机房的按需改造，一定程度会加大 5G 网络的建设成本。此外，低时延业务需求也带来了更加本地化、更具实时性的网络能力开放要求，在一些业务场景下，网络所开放的信息的时效性直接决定了用户的业务体验。基于此类要求，UPF 可以进一步支持用于能力开放的服务化接口，结合本地 NEF (L-NEF)，实现面向本地业务服务器实时性更高的网络能力开放服务。

同时，为了满足 URLLC 场景下控制面信令的实时处理需求，也可以针对特定场景（如业务仅覆盖特定区域，且要求数据不出园区的企业），考虑将 SMF、AMF 等控制面网元，同 UPF 一起下沉部署于边缘云平台，实现 UPF、SMF 等众多虚拟化网元与 MEC 业务的共平台部署。控制面网元下沉可以实现用户面控制面同位置部署，避免控制面信令回传受传输时延和承载网拥塞的影响，保障实时信令交互和处理。

3.2.2.2 边缘应用服务器发现

在边缘计算的部署场景中，5GC 可以通过特定的部署形态，实现业务的本地化支持。但针对同一个应用业务，同一个运营商的网络可能支持同时和多个边缘应用服务器 EAS 互联，以实现灵活的业务接入需求，如：针对 UE 所在的不同位置，网络需协助 UE 发现并接入最近的 EAS 以达到最优化的业务体验，并且在 UE 从一个 EAS 服务区域移动到另一个 EAS 服务区域时，及时的将用户的业务路由切换到对应的用户面路径之上。为此，网络应能够支持通过 UE 路由选择策略增强、

本地 DNS 配置、部署 EAS 发现功能 EASDF 等技术,实现不同业务场景下的最优 EAS 发现、选择及重选。

3.2.3 QoS 增强

3.2.3.1 5QI 的定义

为了辅助支持空口的低时延,3GPP 定义了一些新的 5QI,针对垂直行业的应用,还定义了新的以时延为主的 GBR 类型,即 Delay-critical GBR,该类型通讯主要应对周期性突发的数据传输,新增一个 QoS 参数用于指示最大突发性数据量。针对不同垂直应用,定义了 82、83、84 和 85 等新的 5QI,建立 PDU 会话的过程中,基站可以根据新的 5QI 进行资源调度,以支持空口低时延高可靠通信。同时针对 Delay-critical GBR 定义了动态 CN BDP 参数,动态 CN PDB 可以预配置在 NG-RAN 节点上,或由 SMF 下发给 NG-RAN,以实现当特定 QoS 流用户面路径发生变化时(如插入 I-UPF,PSA UPF 改变等)CN PDB 的动态适配,更好的支持业务的实时性需求。

3.2.3.2 QoS 监控

QoS 监控可以完成终端和 PSA UPF 之间数据包时延的测量,包括无线空口以及无线基站与 PSA UPF 之间的上行/下行数据包时延。通过时延的监控和测量,可以实施对 URLLC 业务进行低时延的保障。其中,无线接口的时延由 NG-RAN 提供,而无线基站与 PSA UPF 之间的时延可在 2 个级别进行监控,即终端每 QoS 流级别和每 GTP-U 路径级别。

- 终端每 QoS 流级别的 QoS 监控方案

PCF 可以根据 AF 的 QoS 监控请求为业务数据流生成授权的 QoS 监控策略,PCF 将该策略包含在 PCC 规则中发送给 SMF。

SMF 在 PDU 会话建立或修改过程中向 NG-RAN 和 PSA UPF 发送 QoS 监控请求。根据该请求,NG-RAN 监控无线空口的上行/下行数据包时延,并将测量结果上报 PSA UPF;PSA UPF 和 NG-RAN 监控二者之间的时延。最终,PSA UPF 可以依据

上述 2 个时延计算出自身与终端之间的上行/下行数据包时延。如果该时延满足特定的条件，如达到了向 SMF 发送报告的阈值门限，则 PSA UPF 将时延上报 SMF。

通常，NG-RAN 和 PSA UPF 之间可能时间同步，也可能不同步。若 NG-RAN 和 PSA UPF 时钟同步，则 NG-RAN 和 PSA UPF 可以根据 GTP-U 头中的时间戳和本地时间计算二者之间的单向数据包时延。若时钟不同步，则为触发监控过程，PSA UPF 向 NG-RAN 发送下行监控数据包，并在数据包的 GTP-U 头中包括 QFI、TEID、序列号和 QMP 指示，同时记录发送数据包的本地时间。NG-RAN 接收到下行监控数据包，记录 GTP-U 头中的序列号和接收到数据包的本地时间，然后监控自身和终端之间的数据包时延。

• GTP-U 路径级的 QoS 监控方案

该方案中，SMF 分别向 UPF 和 NG-RAN 节点发送 QoS 监控策略，UPF 和 NG-RAN 根据该策略执行 QoS 监控。

为了监控传输路径时延的变化，GTP-U 的发送者周期性地计算 RTT 以及对比累计数据包时延和本地存储的 QoS 参数中的期望时延，如果高于期望时延，则 GTP-U 发送者向控制面网络功能，如 SMF 或 OA&M 功能发送 QoS 监报告警信令。其中，RTT 是 GTP-U 发送者和 GTP-U 接收者之间的往返时延，该时延可以基于 Echo 请求/应答消息完成测量，累计数据包时延是 $RTT/2$ 、本地处理时延和直接上游 GTP-U 发送者提供的累计数据包时延的总和。

3.2.4 高可靠保证

在 5G 端到端通信达有高可靠性要求的场景下，空口技术、传输技术以及核心网技术均需要进行增强以满足高可靠性需求。

数据传输过程中的可靠性主要通过建立备份路径来保证。目前出现的备份传输路径方案分为三种：建立双 PDU 会话进行端到端的备份数据传输；建立双核心网隧道进行核心网内的备份数据传输；建立传输层备份路径进行数据传输。

3.2.4.1 基于双 PDU 会话的备份传输

为了支持高可靠性服务，终端可以在 5G 网络中建立两个冗余 PDU 会话，两

个 PDU 会话要求使用通过不同的基站、不同的 UPF，使核心网建立的两个冗余 PDU 会话的用户面路径不相交。基站通过双连接或者 CU/DU 分离等技术，实现两个 PDU 会话通过不同基站传输，应用层完成数据包复制和冗余数据包的检测。

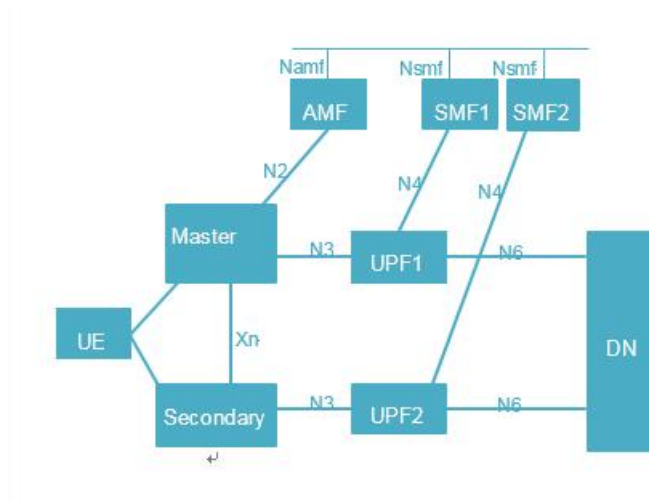


图 7 双 PDU 会话示意图

3.2.4.2 基于双核心网隧道的备份传输

基于双核心网隧道的备份传输方案可以用于 N3/N9 隧道可靠性的增强。该方案通过建立冗余传输，通过将两个独立的 N3 隧道部署在锚点 UPF 与 RAN 之间，关联到同一个单独的 PDU 会话，实现可靠性的提升。为了确保两个 N3 隧道通过不相交的传输层路径传输，SMF 或 PSA UPF 应在隧道信息中提供不同的路由信息，并且将这些路由信息根据网络部署配置映射到不相交的传输层路径。

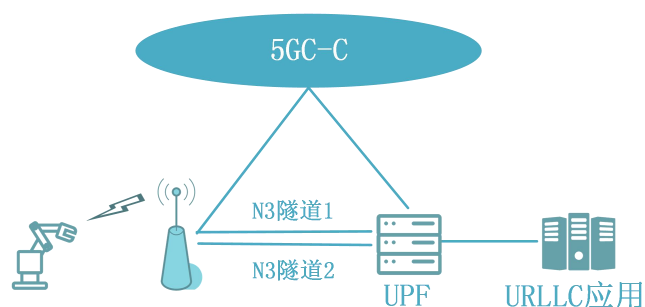


图 8 双核心网隧道备份示意图

在 URLLC 场景下 QoS 流建立过程中，若 SMF 决定冗余传输基于授权的 5QI、NG-RAN 节点能力和/或运营商配置来执行，则 SMF 通知 PSA UPF 与 NG-RAN 相应地通过 N3/N9 接口建立冗余隧道以执行冗余传输。对锚点 UPF 从数据网络接收到

对应该 QoS 流的每个下行数据包，锚点 UPF 复制数据包，分配相同的用于冗余传输的 GTP-U 序号，NG-RAN 在接收后基于 GTP-U 序号消除冗余的数据包并发送给 UE。对于无线基站从终端接收的对应该 QoS 流的每个上行数据包，NG-RAN 复制数据包，分配用于冗余传输的相同 GTP-U 序号，锚点 UPF 在接收后基于 GTP-U 序号消除冗余的数据包并发送给应用服务器。

3.2.4.3 业务连续性增强

为了减少或避免在 PDU 会话锚点更换时出现业务中断和丢包，5G 核心网应支持与应用功能单元的实时协作。URLLC 场景对于可靠性和业务连续性提出了更高的要求，因此需要避免业务在切换过程中丢包。

核心网 AF 在向 SMF 订阅事件时，会提供“AF 期待的确认消息”指示，SMF 根据该指示，可以在选择新的 DNAI 时，不立刻激活到新 DNAI 的用户面路径，而是向 AF 发送通知并等待 AF 关于应用层是否准备好的响应。SMF 发送给 AF 的通知中会指示用户面路径的管理事件，如 PSA 改变或 DNAI 改变。AF 根据该通知决定是否需要执行应用重定位，如果不需要，AF 可以立即向 SMF 提供正面响应，指示应用层准备好；否则，AF 在应用重定位完成后提供正面响应或者在决定应用重定位不能按时完成时提供负面响应。

AF 在发送给 SMF 的正面响应中还可以提供与新 DNAI 相关的 N6 流量路由信息。一旦 SMF 收到正面的 AF 响应，则 SMF 可激活到新 DNAI 的用户面路径。在激活用户面路径时，SMF 向用户面的 PSA 配置 N6 流量路由信息。当激活到新 DNAI 的用户面路径后，数据将被路由到新的 DNAI。如果 SMF 收到负面响应，SMF 会保持使用之前的 DNAI 并取消 PSA 重定向过程。

3.3 移动回传承载网 URLLC 保障技术

承载网时延由光纤传输时延和设备转发时延组成，其中光纤传输时延 5 us/km，按照中国联通智能城域网设备技术规范要求，在非拥塞情况下，接入设备转发时延小于 15us，核心设备转发时延小于 50us。对在非拥塞情况下典型场景的传输时延预期如下：

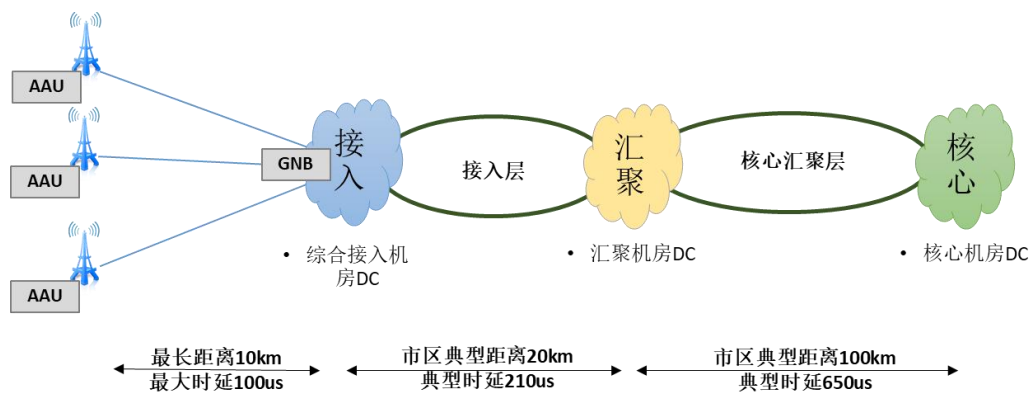


图 9 城域承载网侧典型时延测算示意图

核心网 UPF 与基站同址部署在本地综合接入机房时承载侧引入时延主要是前传时延，最大 100us（最大传输距离 10km），部署在本地汇聚机房时承载侧的典型传输时延 210us（典型接入层传输距离 20km，4 跳接入设备+1 跳汇聚设备），部署在本地核心机房时承载侧典型传输时延 650us（典型核心汇聚层传输距离 100km，3 跳核心汇聚设备），因此部署在本地的 UPF 可以满足 eMBB 和部分 URLLC 业务低时延的需求。传输距离是造成传输时延的主要原因，对于极限指标需求的 URLLC 业务，核心网 UPF 结合 MEC 下沉部署是降低业务传输时延的关键。此外，可结合路径优化降低传输时延，以实现整体降低端到端网时延的目标。

3.3.1 L3VPN 边缘部署

5G 网络具备组网超密集的特征，基站密度提升的同时，站间协同是 5G URLLC 组网的潜在关键技术之一，而站间的东西向流量带宽需求也会增加。通过将承载 L3 VPN 下沉部署在接入层，减少流量迂回，减少传输距离的同时也减少了设备跳数，可以实现 X2/Xn 流量就近转发，降低交互的时延。

3.3.2 承载网络切片技术

移动回传网 IP 设备转发时延是影响业务传输时延性能的重要因素之一，现有的 IP 设备转发时延已经较低，但当出现网络拥塞时，业务需要缓存排队转发，会造成额外的转发时延。通过网络切片降低在拥塞情况下高等级业务的转发时延。

移动回传切片技术是通过网络硬切片、QoS 等机制，实现为用户提供差异化

SLA 服务，在拥塞情况下，可以保障高等级业务的转发时延、抖动等性能指标，适用于有严格时延要求的 URLLC 业务。

目前承载网络的切片实现技术包括物理端口硬隔离、FlexE 硬切片隔离、VPN 软隔离、QoS 调度等手段，在实际部署中根据业务需求、网络能力按需选择其中一种或多种技术的组合。

3.3.3 基于 SR 的差异化路径优化

对于 URLLC 业务，承载网络可通过采用 SR-TE/SRv6 policy 技术结合 SDN 能力实现承载路径的按需灵活选择，为有严格时延需求的业务选择满足低时延要求的最优路径。SDN 控制器根据 URLLC 业务的 SLA 要求计算隧道的转发路径并生成标签栈下发到转发设备。在 SR-TE 隧道的源节点，转发设备依据标签栈即可控制数据包在网络中的传输路径。网络中间设备不感知隧道，仅通过对源节点的报文进行标签操作即可任意控制业务路径，无需逐节点下发配置。

4 URLLC 网络部署参考设计

4.1 网络切片部署参考设计

网络切片将物理网络切片为针对特定应用和服务优化的逻辑子网络的过程。它旨在为垂直行业分配专用网络资源。网络切片是一种非常有效的技术，可以满足多租户 5G 网络中 URLLC、eMBB 和 mMTC 服务的不同部署需求。它允许服务共存和异构，通过这种共存和异构，每个服务被分配计算和通信资源，在提供性能保证的同时，又实现了与其他服务的隔离。

在关键任务应用中，如车对车通信和工业自动化，很难以非常高的精度对排队延迟进行建模和预测。例如，在工业自动化场景中，由于其应用需求的多样性，可以为远程监控过程（或机器人）的人员和另一个切片之间的高清晰度视频传输分配一个网络切片。

网络切片天然的隔离特点有利于多种业务共存下的性能保障，面向不同业务混合的应用场景，通过制定业务的优先级，结合网络的负载控制，可以使得 URLLC 业务降低传输时延并提高可靠性。依据网络负载量不同，通过负荷均衡、CAG (cell access group) 接入控制等方式牵引或者拒绝低优先级的切片业务或者通过为高优先级业务预留对应的网络切片资源，可以实现端到端的切片和 QoS 保证。

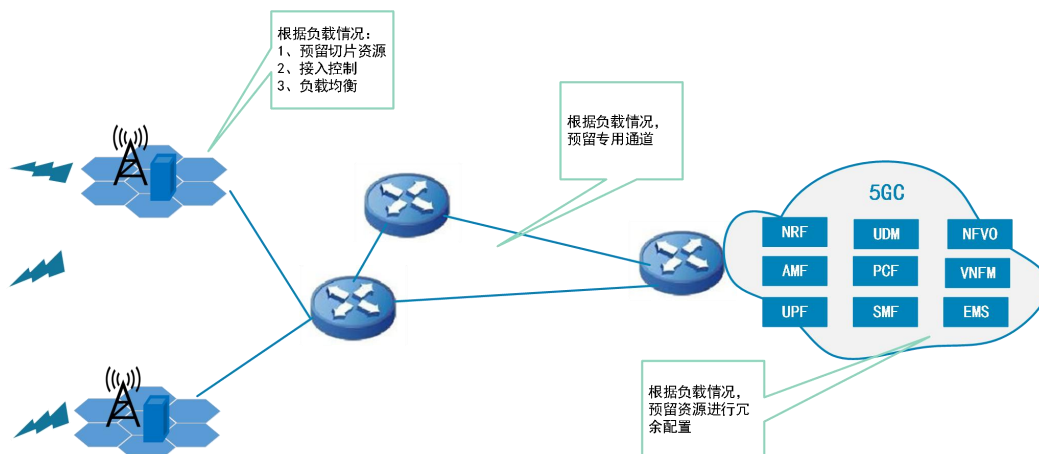


图 10 URLLC 业务的负载控制解决方案

基站协议栈 URLLC 功能设计和算法实现是影响 URLLC 业务 QoS 性能保障能力的关键因素之一。用于 5G 网络 URLLC 能力构建的诸多功能，如调度粒度调整、资源抢占、预授权调度、码率调整以及重复传输等机制均需要依托基站的调度算

法进行实现。基站可以通过对网络参数、基本功能应用策略进行优化,达到满足 URLLC 业务 QoS 要求的目的:

对于 URLLC 业务的低时延特性保障,结合 URLLC 数据包较小且包大小固定的特点,支持将耗时较多的 PDCP 层的加解密和头压缩功能关闭,进一步的,对于静止或者慢速的 URLLC 业务,耗时较多的 RLC 层的 ARQ 重传机制也可以考虑关闭,只依赖利用物理层的 HARQ 进行重传。

对于 URLLC 业务的高可靠特性保障,支持设置低期望目标 BLER、使用低码率的 MCS 与 CQI 映射表格等相对保守的传输策略。从资源利用率的角度,URLLC 的业务主要是牺牲频谱效率来保障可靠性,通过 PDCP 层的复制增强、核心网的冗余传输方式获得传输鲁棒性。

此外,可以考虑对 URLLC 用户设置支持永远在线的 PDU 会话,减少状态转换引入的时延。支持高优先级的 5QI 指示映射到传输网高优先 DSCP 值,减少 URLLC 业务调度排队时延。支持端到端的 QoS 时延监测以及指示最大突发数据量来辅助网络侧调整资源分配策略。支持 URLLC 用户高 ARP 抢占优先级来保证资源拥塞时的优先接入。

4.2 业务共存部署参考设计

超可靠低延迟通信 (URLLC) 预计将支持前所未有的高可靠性和低延迟通信,例如工业自动化和控制、智能电网的实时运行以及实时操作的远程控制。URLLC 用例之一是工厂自动化,其中闭环控制应用程序以短周期运行周期,同时要求极低的错误率。此外,工厂可能位于宏网络的覆盖区域内,如图 1 所示。从共存分析的角度来看,有两种频谱部署方案:同频部署和异频部署。对于同频段覆盖,网络由同一个移动网络运营商 (MNO) 运营,并且相同的频谱在两者中重复使用。在异频部署的情况下,与宏增强移动宽带 (eMBB) 网络相比,工厂网络已部署在单独的频率上,该网络由宏 MNO、相邻 MNO 或本地许可证持有人所有。

为了更好地理解这种共存场景的可行性,必须评估网络间干扰对 URLLC 和 eMBB 网络性能的影响。评估应考虑不同类型的无线网络部署选项,以确定其中哪些选项适用于不同的场景。

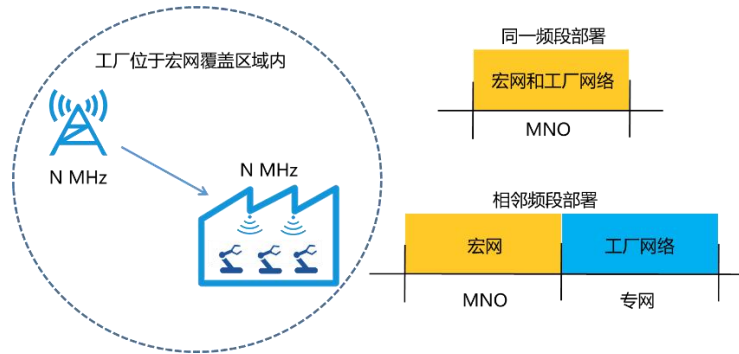


图 10 业务共存部署示意图

对于宏 (eMBB) 和本地 (URLLC) 工厂网络在 NR 中频段 (即 3.5 GHz) 共存的一个重要方面是 eMBB 和 URLLC 网络使用不同双工模式的影响, 即网络不协调的情况。这种差异主要是因为: 对于工厂自动化应用, URLLC 流量在下行链路 (D) 和上行链路 (U) 中主要是对称的, 因此这种工厂网络的 URLLC 优化 TDD 模式将是 DUDU。但是, 传统的 eMBB 业务在下行链路中更重, 因此, 对于宏网络来说, 更优化的 eMBB TDD 模式将是 DDDU。尽管这种不同步的 TDD 部署可以提高时间资源利用率、提高瞬时数据速率并减少无线延迟, 但它会在基站 (BSs) 和用户 (UE) 之间引入干扰。具体而言, 下行链路到上行链路 (BS 到 BS) 和上行链路到下行链路 (UE 到 UE) 干扰场景与传统的下行链路到下行链路 (BS 到 UE) 和上行链路转发 (UE 到 BS) 干扰场景并存。在同步 TDD 的情况下, 宏基站对工厂的高下行链路干扰导致下行链路 URLLC 容量和服务可用性降低, 在不同步 TDD 的情况下, 上行链路 URLLC 容量和服务可用性降低。

但是, 不论同步和非同步 TDD 部署, 异频部署仍然是可行的。在工厂位于宏站点旁边时, 当保证总隔离度时, 本地工厂 URLLC 网络可以与 eMBB 网络共存, 因为所需的隔离可以通过相邻信道衰减来达到, 而剩余的隔离可以通过其他方式来处理, 例如增加墙壁穿透损失 (考虑金属涂层或厚混凝土建筑墙壁)、工厂现场增密、上行功率控制、更大的隔离距离和频带配对等。

作为未来工作的一部分, 在时域和频域和功率域上研究和评估干扰协调机制非常重要 (即控制基站和 UE 功率, 以便可以限制网络之间的干扰, 以降低网络间干扰的水平和影响)。此外, 评估与更密集的工厂网络共存的场景, 以及与位于工厂内的相邻频段 eMBB 用户共存的场景至关重要。

但是公共宏网络和非公共 URLLC 工厂网络之间的非同步部署仍然非常困难, 即便是在保障隔离距离、壁损耗或频率分离等前提下, 异频部署不足以解决所有

共存问题。未来考虑以下解决方案的综合运用思路：

- 保障网络同步，eMBB 用户必须能够连接到工厂内的基站。如果需要非同步部署，解决方案是在隔离频率上部署工厂网络。
- 对于例如远程控制用例有关的更偏重于上行链路的 URLLC 服务，考虑在上行链路中发送高质量视频流，而在下行链路中仅发送一些低比特率控制信息。
- 详细地评估部署公共工厂网络以避免远近问题的可行性。

4.3 TSN 融合部署参考设计

TSN 主要面向具有确定性时延的应用场景。其业务具有确定性，短周期，单个 TSN 设备中存在多个 TSN flow；存在移动性，UE 同时存在确定性业务和非确定性业务等特点。在工业互联网园区，存在着大量对时间非常敏感的应用，如运动控制、机器人协同控制等。需要数据在确定时限内发送到目标，以支持工控设备和应用的正常运转。5G 作为实体信息传输的网络平台，将对工业互联网提供强劲支撑。在低时延高可靠的基础上，5G 融合 TSN 增加网络的确定性能力，针对周期性业务流更进一步降低转发调度时延、精准的时延控制和抖动控制，以及与外部 TSN 网络的对接能力。

5G 系统与 TSN 网络系统在技术上的融合创新以及在方案上的协同部署。一方面，通过 TSN 转换器解决 5G 与 TSN 网络对接的能力；另一方面，完成业务能力的适配，即以太网转发功能、增强的 QoS 和高精度时间同步。5G TSN 融合进一步满足时间同步、低时延、高可靠、资源管理等功能需求。

(1) 网络对接

3GPP 为了支持 TSN 时间同步，5GS 充当 TSN 网络的一个或多个虚拟或逻辑 TSN 网桥，集成在 TSN 系统中。融合架构将 5G 内部系统作为一个黑盒与对 TSN 网络对接，最大限度减少对现有 5G 网络内部机制的影响，需要完成 TSN 网桥能力上报、配置信息下发以及 QoS 映射等功能，此模型包括如下 TSN 转换器功能：

- DS-TT：Device-side TSN translator，设备侧 TT，在 UE 侧，作为网桥 UP 的入口；
- NW-TT：Network-side TSN translator，网络侧 TT，在用户平面功能（UPF）

侧，作为网桥 UP 的入口/出口；

- TSN-AF: TSN Application Function，代表异构应用系统与 5G 核心网交互的接口网元，用于适配 5GS 接口与 TSN 协议，实现控制面交互。

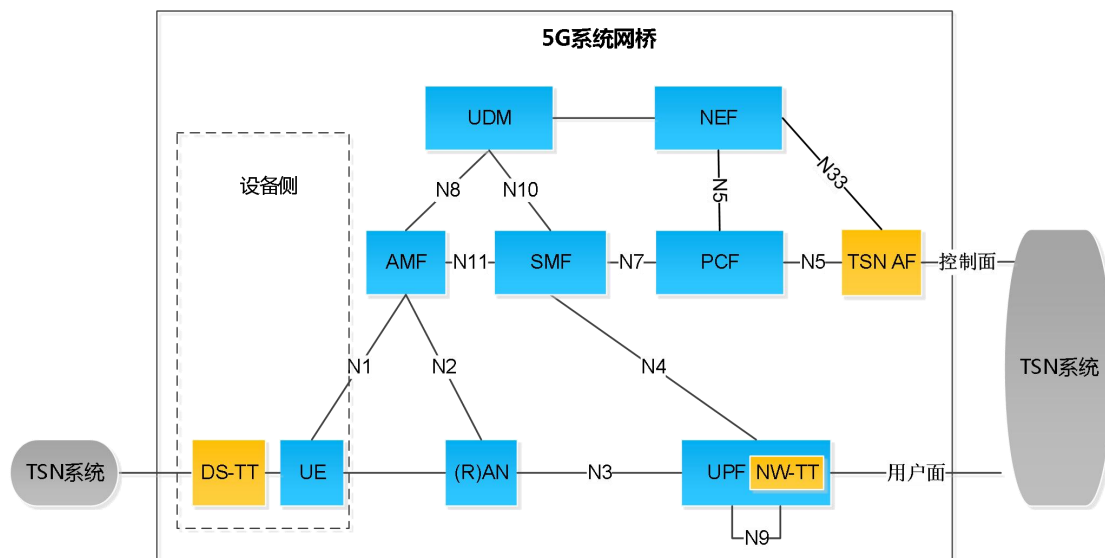


图 11 5G TSN 融合架构

(2) 时间同步

端到端传输延迟具有难以协商的时间界限，因此网络的所有设备都需要共同的时间参考，即时钟同步。5G 网络是一个对 TSN 来说透明的逻辑网桥，但是 5G 网络与 TSN 有各自的主时钟。因此，在通过 5G 网络对 TSN 的主时钟信息进行端到端的透传时，需要良好的时间同步(即把时间同步误差控制在一个可接受的限度之内)。

在 5G 系统内部，gNB 从 5G GM(5G 内部主时钟，例如 GPS 卫星)获取时钟，将时钟传递给 UE、UPF，实现 5G 系统内高精度时钟同步；在 TSN 时钟域，基于 IEEE802.1AS 实现域内时间同步。5G 系统边缘的 TSN 转换器需要支持 IEEE802.1AS 的相关功能。

- 5G 时钟同步：用于 NG-RAN 同步，通过无线接口的 SIB9 系统广播消息或 RRC 消息实现时钟同步，UE 同步 5G 时钟 (802.1AS、1588、GPS)；
- gPTP 同步：为(g)PTP 网络提供时间同步服务。此过程遵循标准 IEEE Std 802.1AS 或 IEEE 1588 操作。

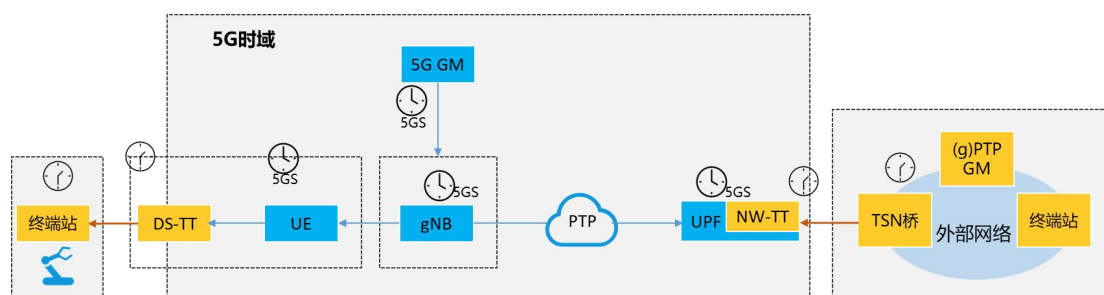


图 12 5GS 与 TSN 时钟同步

对于 TSN 时钟传递，需要支持 gPTP 和时间戳等功能：NW-TT 接收来自 TSN 系统的 gPTP 报文，并在 gPTP 报文头中加上时间戳，通过 UPF 将 gPTP 报文发送给 DS-TT；DS-TT 则根据接收到 gPTP 报文的时间以及时间戳信息，计算 gPTP 报文在 5GS 内的驻留时间，并设置 gPTP 报文头进行时延补偿，完成本地和 TSN 时钟的同步以及 TSN 时钟到 TSN 终端站的授时。

基站通过 SIB9、RRC 信令为 UE 授时，授时精度可达到纳秒级。

(3) 增强的 QoS

TSC QoS Flow 使用延迟敏感 GBR 资源类型。根据业务流的特征对业务进行分类，5G 系统与 TSN 系统协商好每个 TSN 业务的 QoS 需求，如业务包大小、时延需求等。采用专门的 5QI，TSN 业务流采用时延敏感 GBR 来保障，提高业务在无线侧调度的优先级，降低传输时延。每个周期内，TSC QoS 流被要求只能传输一个突发数据块，这个突发数据块的大小被 QoS 参数的 MDBV 设置。QoS 参数的 PDB 来自于 TSN 业务要求，PCF 会按照网络时延测量的结果，将 PDB 分解为 CN-PDB 和 AN-PDB，其中 AN-PDB 用来指导无线处理时延。在 QoS 的 GBR 机制保障下，5G 系统虽然对 TSN 是透明的，但是也可以按时完成 TSN 系统要求的数据流调度传输。

业务类别和 5G QoS Profile 之间的映射表用于找到合适的 QoS flow 传输 TSN 业务。QoS 映射流程分为 2 个阶段执行：QoS 能力报告和 QoS 配置。

- TSN AF 应预先配置映射表(如通过 OAM)。映射表包含 TSN 业务类别、预配置的桥接延迟(即 UE 和 UPF/NW-TT 之间的延迟)和优先级。一旦建立 PDU 会话，并检索到与 UE DS-TT 停留时延相关信息，TSN AF 将推断 5GS 网桥的端口对，并根据业务类别确定每个端口的网桥延迟。
- CNC 通过 TSN AF 将 PSFP 和传输门控调度参数发给 5GS，这些参数通过 TSN AF 映射到 TSN QoS 需求。

PCF 提供 TSN QoS 到 5G QoS 的映射表。基于 TSN AF 请求，PCF 可触发 PDU 会

后修改过程,或根据 TSN AF 业务需求选择 QoS 策略为请求的业务建立新的 QoS Flow。
TSN AF 可根据 OAM 预配置 QoS 映射表。如图所示。

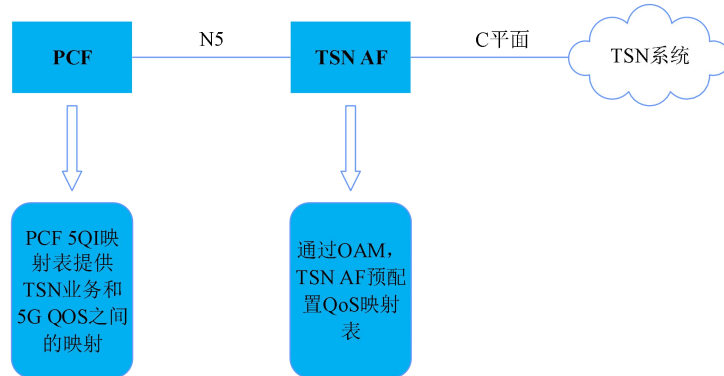


图 13 业务映射方式

(4) 保持和转发机制

用于 TSN 通信的 PDU 会话为 Ethernet Type, 5GS 形成网桥转发 Ethernet 帧。5G TSN 采用 TSCAI 来描述工业互联网业务的流量特征, 包括周期或非周期、业务流方向、到达时间、存活时间等; DS-TT 和 NW-TT 支持 802.1Qbv 的存储转发机制, 根据业务流的特征信息和流量调度策略, 采用保持和转发调度机制以减少抖动。即数据包仅在预定周期上, 打开门控以进行数据传送, 控制报文通过 5G TSN 的时延。保持和转发缓冲机制提供了与调度流量相同的外部可观察行为, 最多具有八个队列和受保护的窗口。受保护的窗口方案意味着在任何时候只有一个传输门是打开的。保存和转发机制允许基于 PDB 的 QoS 用于 TSN 业务。5GS 为 DS-TT 和 NW-TT 提供了 AdminControlList、AdminBaseTime、AdminCycleTime 和 TickGranularity, 用于支持保持和转发机制。注意: DS-TT 和 NW-TT 如何提供保持和转发缓冲机制的细节取决于实现。为了保证每次经过 5G 系统传输报文的时延是一致的, 即满足系统抖动性要求。例如业务数据和门控发送周期为 20ms。第一个报文到达 5G 入口为 T1, 5G 传输时延为 10ms, 则出口时间为 T1+10 发送报文; 第二个报文 5G 入口传输时延为 9ms, 到达出口时间提前了 1ms, 此时即出现抖动。此时通过保存和转发机制, 即可消除抖动 1ms。但是无法消除延迟带来的抖动。

5 中国联通 URLLC 实践

5.1 URLLC 能力构建

5G URLLC 网络的典型特征主要体现在低时延和高可靠两个方面，在保障低时延的基础上，进一步支持 TSN 功能，提供低时延抖动的能力是 URLLC 演进的重要方向之一。为了构建 5G 网络的 URLLC 能力，综合考虑 5G 网络的基础能力与能力提升方案是重中之重。



图 14 5G URLLC 网络能力体系构建视图

5G URLLC 网络将应用于多种垂直行业，适配差异化的部署场景。根据不同类型的业务，URLLC 网络将提供定制化的时延和可靠性能力。因此，URLLC 网络将基于 5G 技术，在空口频段、双工方式、帧结构、参数集等通用物理层技术上支持灵活配置，为 URLLC 网络的差异化能力奠定了基础。再结合 URLLC 专有的低时延、高可靠技术方案，将打造出定制化的 URLLC 网络。

5.1.1 低时延能力

对于低时延能力的构建，5G URLLC 网络在无线接入网、核心网和传输网分别进行了技术设计。

从无线接入网的角度，URLLC 空口时延包括信号传输时延、处理时延和信令交互时延。5G 新空口设计了基于 OFDM 符号的 mini-slot 调度粒度，基于高优先级业务“抢占”低优先级业务资源的资源复用技术和基于预授权、免调度的传输机制，为 URLLC 业务“随到随传”创造了多种传输条件。同时将 HARQ 机制进行增强，形成了以子时隙为粒度的双码本 HARQ 反馈机制，以实现 5G 网络物理层对 URLLC 业务传输的快速响应，进而缩短 URLLC 业务空口时延。

在核心网的部署策略上，URLLC 网络设计了用户面/控制面网元下沉的方案，将 UPF、SMF 和 AMF 等网元下沉部署在尽量靠近基站的位置，降低基站到核心网之间的传输时延。同时，3GPP 定义了新的 5QI 映射，加强对网络的端到端 QoS 监控方案以更好地辅助支持 URLLC 业务的低时延传输。

从传输网的角度，基于 SRV6 + FlexE 的技术，一方面建立 URLLC 业务最优路径，另一方面将不同切片带宽绝对独享，严格保证时延、抖动，可以避免网络拥塞，提升网络质量。

5.1.2 高可靠能力

对于网络的可靠性支持，URLLC 无线接入网络主要通过采用更低的码率和重复传输的方案，而核心网采用冗余传输的方案。这些方案均以降低网络资源利用率为代价，提升 URLLC 网络的可靠性。

从无线接入网的角度，控制信道低码率传输通过更高聚合等级实现；数据信道低码率通过专用的低码率的 MCS 表格提升数据信道初传的可靠性；物理信道重复：通过对物理信道的重复传输，可使接收端获得额外的分集与数据合并增益；PDCP 层数据包复制，可以通过不同的空口资源来传输以获得分集增益；

从核心网的角度，有三种冗余传输方案。PDU 会话冗余，可以建立两个端到端的 PDU 会话备份传输，相应的传输网络也实现了冗余备份；N3 隧道冗余，将两个独立的 N3 隧道部署在锚点 UPF 与 RAN 之间，两个隧道分布在基站和 UPF 间不同的传输网络上；RAN 和 UPF 之间的传输路径冗余，不需要网络侧建立两个会话或隧道。

5.1.3 确定性能力

确定性通信是指最大时延有界，即保障业务包在给定时延内正确送达。在保障业务低时延与高可靠传输的同时，支持 TSN 功能，满足业务的确定性是 5G URLLC 网络在部分工业场景下需要提供的重要能力。

网络同步是 5G URLLC 网络支持 TSN 功能的基础，高精度授时与传播时延补偿方案可以进一步提升网络同步能力。高精度授时支持基站通过系统消息提供粒度 10ns 的精准的参考授时，而传播时延补偿则支持利用 5G 网络的下行同步和上行同步机制，在终端同步过程中，根据定时提前量获取传播时延，实现对时钟的校准。

此外，考虑工业场景下部分工业应用以小数据包的工业控制消息传递为主，有效负载在数据帧中的占比较低。5G URLLC 网络通过支持以太网头压缩方案，在舍弃以太帧前导码、帧开始符以及帧校验码的基础上，进一步压缩以太帧的源/目的地址、Q-TAG 域的开销，可以降低以太帧传输所用资源，减小网络开销。

通过对 5G 网络基础能力、低时延能力、高可靠能力以及 TSN 能力的整体构建，5G 网络将具备保障 URLLC 业务多样化通信需求的能力，而对网络 URLLC 能力的管理将是提升网络商用价值重要因素。

5.1.4 指标监测能力

为了满足业务的传输需求，保障业务体验的稳定性和 5G URLLC 网络的鲁棒性，需要对网络性能关键指标的保障能力进行监测。相比 eMBB 网络，5G URLLC 网络需要额外关注时延、可靠性、时延抖动等网络性能关键指标的监测能力。

- 时延：在不同应用场景下，具备小区级以及业务级分段的网络时延监测能力，支持毫秒级以下的时延监测精度；
- 可靠性：在不同应用场景下，具备小区级以及业务级分段的网络可靠性监测能力，支持模拟业务状态的可靠性监测方案，可以定位误块、丢包等因素对业务可靠性的影响；
- 抖动：在不同应用场景下，具备小区级以及业务级分段的网络时延抖动监测能力，支持微秒级的抖动监测精度；

5G 网络由无线网、传输网和核心网三部分组成，URLLC 网络性能关键指标需

要支持端到端监测能力以及分段式的指标分析与问题定位方案。在多用户的应用场景下，5G URLLC 网络可以支持基于不同精度与不同粒度的网络性能指标监测。

通过设计不同的网络性能指标监测的触发方式以及监测流程，5G URLLC 网络可以支持基于 GTP-U 路径的关键指标监测方案与基于 UE 级 QoS 流的关键指标监测方案。其中，基于 GTP-U 路径的关键指标监测方案在混合业务的场景下，可以快速地完成 URLLC 网络的业务性能指标监测，基于 UE 级 QoS 流的关键指标监测方案可以对指定的业务进行性能指标的监测。

通过在 GTP-U 的服务数据包的报头中添加时间戳的方式，在 NG-RAN 与 PSA UPF 时间同步的场景下，支持测量上行业务或下行业务单向的关键性能指标，在 NG-RAN 与 PSA UPF 时间不同步的场景下，支持通过上下行业务环回的关键性能指标监测方法，统计获取单向的业务时延与时延抖动性能。

5G URLLC 网络关键性能指标的监测可以为网络的业务能力验证、网络能力定制以及网络问题定位与恢复方面提供保障，未来通过采集多维的业务性能指标数据，结合大数据的网络性能分析方案，也可以助力网络的精细化运营。

5.2 5G-A URLLC 技术演进与创新实践

随着中国联通携手众多行业合作伙伴共同发布了“5G 专网 PLUS”系列成果，2022 年联通积极探索 OT 现场网络。2022 年 4 月下旬，中国联通联合华为在精工汽车全国首次验证 5G-Advanced（简称 5G-A）URLLC 柔性产线，首次验证 5G-A URLLC 极低时延、高可靠性以及 10 倍提升的连接密度，并且应用在汽车制造生产工艺上下料台、工具切换、随行夹具等十余项关键环节，成为全国首个 5G-A 柔性工厂应用试点。

中国联通与国内多家主要车企合作，在几十个车厂进行 5G+汽车制造实践，对汽车制造需求具有深刻认识。当前以汽车制造为代表的工业制造产业向智能化转型过程中，遇到 2 个挑战：

- 现有的 OT 现场网络以有线为主，无法满足智能升级过程中柔性要求；且 IT 和 OT 两张网，OT 内实时控制业务和非实时业务割裂；
- OT 现场网络包括 PLC 以及南向控制的 IO、阀岛等设备，大部分节点要求

1~4ms 通信周期，单节点可靠性要求至少 99.999~99.9999%。

面对挑战，中国联通积极践行“数字技术融合创新排头兵”国企担当，率先倡导“5G-A URLLC+汽车制造 OT 现场网络”产业联创，创新探索“5G-A 替代 PLC 南向工业总线”。中国联通与华为在精工汽车搭建了 5G-A 样机，精工汽车部署了主控 PLC、阀岛、伺服控制器、机械臂、焊钳、滑台、升降台等设备，组成焊装试制产线。精工汽车专家认为 5G-A URLLC 样机与汽车制造工业控制设备 PLC、阀岛、IO 等对接，成功适配 PLC 南向实时业务，能够满足智能制造现场实时控制指令的通信需求，实现汽车制造工业设备全自动运转。

本次实践具体是从以下四个层面推动 5G-A URLLC 技术创新：

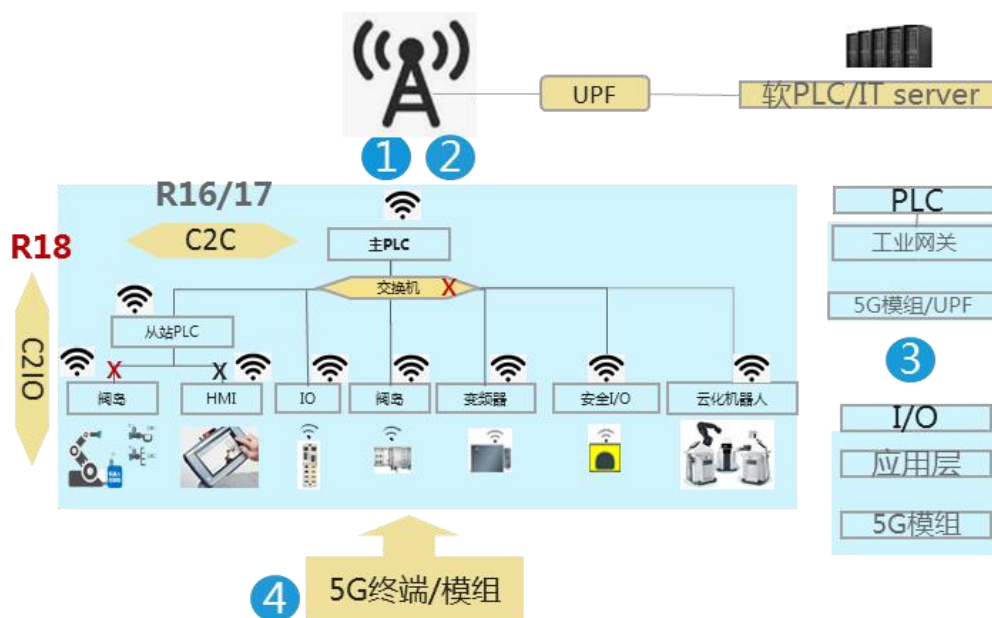


图 15 5G-A URLLC 网络创新实践示意图

- ① 低时延高可靠能力打造，实现 E2E 4ms 时延和 5~6 个 9 的可靠性目标。
通过互补 TDD 方案减少子帧等待，使能 4ms 时延；通过 1 次 HARQ，可靠性提升 2~3 个 9；通过灵活帧配比，兼顾大上行/定位等综合能力提升；
- ② 10 倍容量提升，实现 1000 个/5000 平目标。通过 5G+工业协议跨层协同，平滑 IO 并发峰值，实现 URLLC 容量提升 2 倍以上；通过 HARQ 和 MU MIMO，提升频谱效率，实现 URLLC 容量提升 5 倍以上；
- ③ 产业适配能力打造，通过 UPF 对接 PLC 的业务感知能力打造，实现 5G 和工业协议跨层适配的目标；通过 time offset 实现 UE 和 I/O 之间的业务编排；

- ④ 终端模组研发，推动 UE CAP2 能力，提升 UE 处理能力；打造 open CPU 开放能力，加载工业协议；支持实时/非实时并发，支持 URLLC 和非实时业务流 1~10M 目标。

通过本次试点，初步验证了 5G-A URLLC 对汽车制造产线柔性提升的价值：

- 车型通常一年一小改，三年一大改，带来产线调整且相关设备重新拆装，有线组网时调测周期长，而采用 5G/5G-A 则不需大幅调整网络，可缩短调测周期快速上线；
- 随行夹具、焊钳等移动设备摆脱有线束缚后，能够在输送过程中被全程监管，即解决了脱离工作状态时无法监控的难题，也避免了重新对接带来的通信恢复时间损耗，减少节拍；
- 夹具、焊钳等工具的工业以太网线缠绕在机械臂，机械臂 360 旋转会导致线损进而导致宕机，而采用 5G-A 则避免线损，减少宕机时间；
- 机械臂上加装高清视频摄像头，可实现自动识别抓取零部件，而现有工业总线带宽不足以支撑视频信号的传输。

中国联通、精工汽车和华为的联合创新为孵化更多产线应用提供了示范，加快 5G-A 端到端商用进程，为汽车制造等工业提供更多更好的高价值服务，助力数字化智能化转型升级。三方联合 OT 合作伙伴，将持续进行 5G-A URLLC 的创新探索，包括支持大型车间高密度工业设备节点的能力、URLLC 与工业协议的跨层适配、5G-A 工业模组、OT 设备 5G 化等方向，为未来规模化部署奠定坚实基础。

中国联通倡导的“5G-A URLLC+汽车制造 OT 现场网络”产业联创，所孵化的能力将用于 3C、能源、装备制造、石油石化、纺织、印刷等多个领域的核心生产环节，为工业智能化升级带来变革。

5.3 规模实施路径与关键举措

5G 融合应用是促进经济社会数字化、网络化、智能化转型的重要引擎，推动 5G 应用扬帆远航，对于推动 5G 全面协同发展、推进 5G 赋能千行百业、培育壮大经济社会发展新动能具有重要意义。为了加速 5G 低时延应用落地，联通将按照以下规模实施路径与关键举措推进 5G 融合应用创新、赋能千行百业数字化转型。

型：

• 标准创新

联合工业各领域龙头企业、通信企业和科研机构等合作开展 5G+ 工业互联网技术、产品、应用等的研发工作，并共同推进 5G+ 工业互联网在核心技术、融合、应用等方面的标准体系建设。

5G 增强版本 R18 的技术方向将成为工作重点。作为 5G 通信技术成熟期的关键阶段和 5G 增强阶段的起点，其将聚焦来自市场的实际需求，综合运用人工智能等新技术手段，进一步优化网络性能，在工业互联网等领域进一步演进以支持更多的业务应用场景，R18 将着眼于工业互联网的业务特性及实际需求，在上行传输方向上进行重点增强，并在虚拟化、协作传输、高精度定位等方向上进行探索。推动标准从 R15 URLLC 单业务能力、R16/17 URLLC 业务并发能力到 R18 URLLC 大联接能力的持续演进。

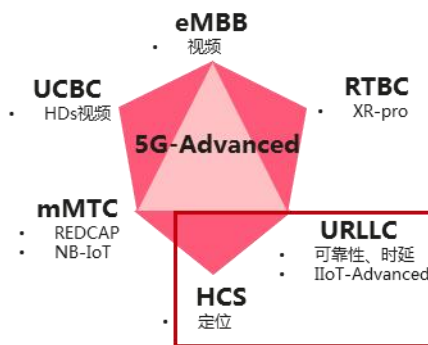


图 16 5G-A 标准方向

• 网络样板

赋能 5G 应用重点领域，联通将继续勇担创新转型先行者使命。攻坚“5G+ 工业互联网”融合创新产品，聚焦垂直行业，深耕智能制造、智能采矿、智慧港口、车联网、智慧医疗等 15 个重点行业，丰富 5G 应用场景，加快 5G 应用复制推广，推动上下游产业融通发展，全面赋能数字中国建设。

随着 5G 网络部署和行业创新应用的融合，也对移动通信网络提出了更高的需求。为了进一步做深大联接，夯实 5G 可持续发展基础，中国联通以“智构新视界、智享大上行、智慧超感知”三大课题为方向，在 5G-Advanced 网络创新能力验证上，已经取得了瞩目的成果。未来，将持续推进 5G 网络技术演进和能力升级，构建网络差异化竞争力，实现 5G-Advanced 加速商用。

面向垂直行业需求，持续打造超高可靠性传输、高精度定位、通感一体、无源物联等多维网络能力，构建网络差异化竞争力。针对工业控制等低时延业务需求，试点互补 TDD、跨层协同等技术，实现 6 个 9 的超高可靠度。针对智能物流等高精度定位业务需求，利用超宽带优势，进一步提高定位精度，在本地专属场景提供增值服务。推进感知、无源物联等联接新能力的标准制定和产业构建，开拓产业新空间。

• 产业协作

围绕网络核心能力和重点行业应用，通过系列化的产业样板构筑产业链孵化基地，联合产业各方着力终端、应用、软件等全产业链构建，带动 5G—Advanced 规模化应用，成为数字社会高质量发展的强力支撑。

邬贺铨院士表示，目前 5G 在企业的应用多为 IoT 类的机器视觉和远程控制，场景大多分散孤立，在有 PLC 等工控设备的制造业现场，5G 的应用被边缘化。

“受限于 PLC 标准碎片化，协议欠开放，因此尚未真正在主生产流程发挥核心作用。”

面向 5G—A URLLC 规模化场景，中国联通将持续推动联合头部 OT 企业定义 URLLC 工业模组能力，树产业样板。初期可聚焦于可规模复制的高价值场景，致力于构建标准 URLLC 工业模组中间件能力，面向垂直行业 and 消费领域全面开放，使能模组伙伴快速开发面向不同行业应用的商用模组，引领产业规模应用，构筑繁荣生态。未来需要对接各行各业用户，深入获取用户需求，据此来推动适用性、专用性模组产品。

6 总结和展望

5G 及其 5G-A 的超可靠、低延迟通信 (URLLC) 已经从标准逐步走向现实, 产业及其行业伙伴都给予了极大的关注。中国联通致力于推动一个考虑到延迟、可靠性、数据包大小、网络架构和拓扑 (接入、边缘和核心) 以及不确定性的可扩展的框架。为了实现这一愿景, 在深入探讨需求之后, 我们仔细研究了 URLLC 的各种使能技术及其部署方案。我们将重点集中在与 URLLC 需求相关的各种技术和方法上, 以及通过选定的用例应用它们。以期这些成果为低延迟和高可靠性无线网络的设计提供清晰的思路。

运营商对 eMBB 场景的网络部署、应用与运维方面有充足的经验, 而 URLLC 作为 5G 网络的一个重要特征, 在该特征的应用价值挖掘、网络特征能力保障方面, 运营商现阶段仍面临着一系列的问题和挑战。

- 业务发展

随着 5G 网络低时延高可靠通信保障能力的完善, 普通消费者领域与垂直行业领域的部分业务都将是 URLLC 网络未来潜在的承载对象。普通消费者领域的 URLLC 业务发展相对滞后, “技术推动业务”的发展特征明显; 垂直行业领域内, 前期以通过 5G URLLC 网络替代现有业务的有线、无线解决方案为目标, 后期以 5G URLLC 网络先进行助推行业升级发展为目标。因此, 运营商深度参与业务需求与业务发展研究, 明确不同场景与不同业务对 5G URLLC 网络部署的不同需求, 是 5G URLLC 网络呈现价值面临的重要挑战之一。

- 产品实现

3GPP R15 与 R16 制定的一系列 URLLC 关键技术已经冻结, 在标准转化为产品的过程中, 结合对 URLLC 网络应用需求的深入挖掘, 运营商需要依托自身的网络部署情况、网络基础能力以及网络目标能力, 制定 5G 网络 URLLC 能力增强计划, 明确 URLLC 产品功能演进路标, 推动 5G URLLC 网络、模组以及终端产品的成熟。

- 网络部署

5G URLLC 网络以低时延与高可靠特性为典型特征，网络应用初期主要面向于满足工业、电力以及交通运输等垂直行业的业务需求。为不同场景与不同业务，提供定制化的网络部署方案与定制化的网络保障能力是降低运营商成本、节省客户开支的基本诉求。此外，在部分垂直行业应用场景下，5G URLLC 网络提供 TSN 功能的需求明确，5G URLLC 网络的核心网、传输网、无线网的 TSN 功能保障能力也将是网络部署方案实现过程中面临的重要挑战之一。

- 网络运维

URLLC 场景与 eMBB 场景的部分网络指标要求差异明显，在网络运营过程中，实时进行业务的时延、可靠性以及时延抖动等网络指标的需求保障与动态监测是保证网络鲁棒性的重要诉求之一，而实现网络故障定位与网络能力的快速恢复在 URLLC 场景下的需求也尤为强烈，因此，高效的 URLLC 网络运营策略也是保障客户与运营商的双赢的重要因素。

综上所述，作为 5G 网络新引入的典型应用场景，URLLC 网络的应用与推广仍面临着一系列全新的问题与挑战。运营商希望与行业合作伙伴共同努力，推动 URLLC 网络能力发展，与客户精诚合作，推动 URLLC 网络商用部署。

国内三大运营商本阶段的 5G 商用网络可为公众用户和垂直行业用户提供 eMBB 业务服务。URLLC 场景是 5G 三大应用场景之一，在未来 2~5 年将成为 5G 网络演进的重要场景之一。URLLC 类业务类型众多，相应的 URLLC 网络能力应与业务需求相匹配，如何定义并构建 URLLC 网络能力是其成功商用的基础。

本白皮书基于 URLLC 典型业务和需求，提出了三级 URLLC 网络能力，可以面向个人消费、行业用户、特定行业用户提供不同等级的 URLLC 网络性能；通过基础能力集和能力提升集构建 URLLC 网络能力，基础能力集包括频段、参数集、双工方式、帧结构，能力提升集包括构建低时延能力、高可靠能力、确定性能力、指标检测能力四个维度的端到端 URLLC 关键技术；为了向不同的用户更好地提供网络能力，提出了 URLLC 网络部署方案，包括网络切片部署方案、业务共存部署方案及 TSN 融合部署方案；同时，为了加快 5G-A 端到端商用进程，更好的为工业客户提供高价值的服务，展示了中国联通 URLLC 创新实践方案及未来规模实施路径与关键举措。

下一阶段，中国联通将根据技术标准进展和产业成熟度，逐步完善 URLLC 网络能力分级体系，明确潜在的能力细分方案，搭建能力分级和能力构建集之间的映射关系，设计面向实际部署和运营的网络能力管理体系。中国联通将联合产业链上下游的合作伙伴，共同推动具备 URLLC 特性的网络与终端设备的产品成熟，推动 5G 与行业应用的融合。