

# 5G URLLC 标准及关键技术研究 \*

李 岚<sup>1</sup>, 张志荣<sup>1</sup>, 陈建刚<sup>2</sup>, 李 鹏<sup>2</sup>, 张 化<sup>1</sup>, 周阅天<sup>1</sup>

(1. 中国电信股份有限公司研究院, 北京 102209; 2. 中国电信集团有限公司, 北京 100033)

**摘要:** 5G 标准定义了 eMBB 增强移动宽带、mMTC 海量大连接、URLLC 低时延高可靠三大应用场景。随着 5G 逐步成熟商用, URLLC 业务作为垂直行业的重要切入点也在逐渐完善优化。首先介绍了 URLLC 技术标准演进情况, 随后从低时延、高可靠和 URLLC 与 eMBB 复用三方面分别分析了实现 URLLC 的关键技术, 最后将 URLLC 与 TSN 网络融合做了阐述。

**关键词:** 超可靠低时延通信; 短时隙; 复用; 免授权; 时间敏感网络

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200785

中文引用格式: 李嵐, 张志荣, 陈建刚, 等. 5G URLLC 标准及关键技术研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(10): 14-19.

英文引用格式: Li Xiao, Zhang Zhirong, Chen Jiangang, et al. Research on 5G URLLC standard and key technologies[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(10): 14-19.

## Research on 5G URLLC standard and key technologies

Li Xiao<sup>1</sup>, Zhang Zhirong<sup>1</sup>, Chen Jiangang<sup>2</sup>, Li Peng<sup>2</sup>, Zhang Hua<sup>1</sup>, Zhou Yuetian<sup>1</sup>

(1. China Telecom Research Institute, Beijing 102209, China; 2. China Telecom Group Co., Ltd., Beijing 100033, China)

**Abstract:** The ITU(International Telecommunication Union) defines three major 5G application scenarios: eMBB, mMTC and URLLC. With the maturity and commercialization of 5G, URLLC as an important entry point in the vertical industry is also gradually improving and optimizing. This paper firstly introduces the evolution of URLLC standard, and then analyzes the key technologies to achieve URLLC from three aspects of low latency, high reliability and multiplexing of URLLC and eMBB. Finally, the integration of URLLC and TSN is described.

**Key words:** URLLC; mini-slot; multiplexing; grant free; time sensitive networking(TSN)

## 0 引言

ITU 和 3GPP 先后定义了增强移动宽带(eMBB)、海量大连接(mMTC)、低时延高可靠(URLLC)三大应用场景<sup>[1]</sup>。eMBB 标准最先在 R15 版本中制定完成, 因此运营商前期部署主要考虑 eMBB 业务的承载需求。目前, 随着 5G 网络持续发展, 3GPP 标准逐步演进, 业务需求和产业链进一步明确细化, 运营商将逐步推进 URLLC 和 mMTC 业务, 完善全系列 5G 应用。

URLLC 作为 5G 三大典型应用场景之一, 广泛存在于多种行业中, 如实时性 VR/AR、自动驾驶、工业控制、智能电网、远程医疗、智能家居等。这些场景对时延和可靠性提出了更高的需求。原则上只要对时延保障有可靠性要求的业务都属于 URLLC 业务。URLLC 是端到端的概念, 包含了核心网、传输、RAN 等多个方面。本文主要在 RAN 范围内对 URLLC 标准情况及其关键技术进行介绍。

## 1 标准进展

3GPP R15 中, URLLC 相关特性仅完成了短时隙(mini-slot)、自包含帧、上行免授权传输、支持  $10^{-5}$  目标 BLER 的低码率信道质量指示(Channel Quality Indicator, CQI)/调制解调方案(Modulation and Coding Scheme, MCS)表格、上行重复、eMBB 和 URLLC 多路复用(上、下行半静态复用)、CCE AL 16、CBG-HARQ 和 PDCP duplication(2 个 RLC 实体)等基础功能<sup>[2]</sup>。R16 版本侧重对 URLLC 进行全面增强, 补充了移动性、eMBB 和 URLLC 多路复用(上行动态复用)等功能, 还增强了下行控制信息(Downlink Control Information, DCI)、上行控制信息(Uplink Control Information, UCI)和 HARQ(Hybrid ARQ, 混合 ARQ)、PUSCH mini-slot 重复和 PDCP duplication(4 个 RLC 实体), 增加了 TRP 的频分与时隙时分冗余传输分集能力以及支持 TSN 网络等, 进一步提高通信的可靠性并降低延迟, 但仍遗留很多优化工作将于 R17 进行研究<sup>[3]</sup>。R17 对 URLLC 的主要演进在网络架构、调度和垂直应用上, 以及继续 R16 没有完成的工作, 具有不同优先级业务的

\* 基金项目: 国家科技重大专项课题(2017ZX03001013-004)

UE 内多路复用和优先级划分等。

在 3GPP RAN TR 38.913 中定义了 URLLC 的指标: 时延方面要求 10 ms 控制面时延, 上、下行 0.5 ms 用户面时延, 小于 1 ms 空口环回时延, 0 ms 切换中断时间; 可靠性方面要求用户面时延 1 ms 内, 32 B 包可靠度达 99.999%<sup>[4]</sup>。但在实际应用中不同业务对低时延和高可靠性的要求不尽相同, 很多应用的要求低于协议的定义, TS22.261 协议中给出了实际的服务需求, 如表 1 所示<sup>[5]</sup>。

表 1 R15/R16 URLLC 业务高可靠性和低时延需求

方案	E2E 时延/ms	可靠性/%	用户体验数据速率/(Mb/s)
离散自动化-运动控制	1	99.9999	1~10
离散自动化	10	99.99	10
过程自动化-远程控制	50	99.9999	1~100
过程自动化-监控	50	99.9	1
配电-中压	25	99.9	10
配电-高压	5	99.9999	10
智能运输系统-基础设施回程	10	99.9999	10
触觉交互	0.5	99.999	较低
远程控制	5	99.999	10

## 2 低时延关键技术

决定 URLLC 时延的因素有: 基站设备、空口关键技术、网络部署、运行环境和业务模型等。其中空口时延占比高、抖动大, 因此采用空口关键技术是 URLLC 降时延的关键举措。这里重点讨论空口相关的低时延关键技术。

在 4G/5G(eMBB)网络中, 上下行数传过程如图 1 所示。

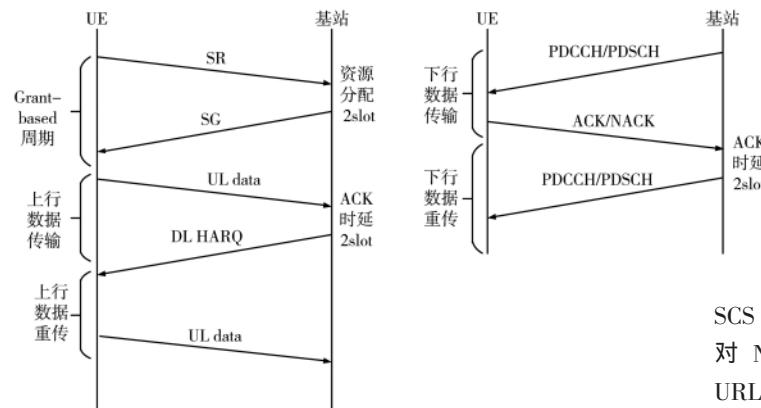


图 1 传统网络上下行数传过程示意图

以 3.5 GHz 的 NR 系统为例, 在 2.5 ms 双周期帧结构中, 上行数传空口传输时延如图 2 所示。从有数据上传需求到一次数据传输完成, 不考虑等待调度请求子帧

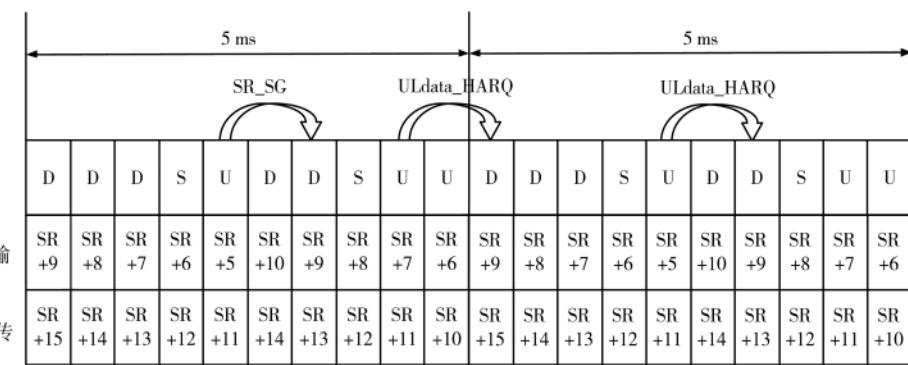


图 2 上行数传时延

的时间, 上行数传空口单次传输时延平均约 7.5 个 slot, 一次重传平均约 12.5 个 slot。

下行数传空口传输时延及上下行单次回环时延如图 3 所示。单次传输时延平均约 1.4 个 slot, 一次重传平均约 6.6 个 slot, 上下行单次回环约 9.5 个 slot, 无法满足空口环回时延小于 1 ms 的要求。

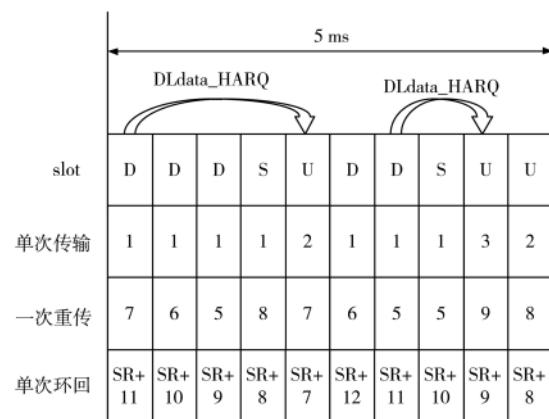


图 3 下行数传时延

可见网络延迟主要由 UL grant-based 授权过程、传输时间间隔、UL/DL HARQ 及重传时间等因素影响, 因此为了满足 URLLC 低时延需求, 将对上述影响因素从物理层、MAC 层分别进行优化。

### 2.1 灵活的 NR 帧结构

5G 采用与 4G 相同的 10 ms 无线帧(frame)和 1 ms 子帧(subframe), 但协议定义 NR 可采用不同的子载波间隔(Sub-Carrier Spacing, SCS), 不同的 SCS 决定了时隙(slot)的长度。4G 的调度单元是 subframe; 对 NR 而言, eMBB 业务的基本调度单元是 slot, 而 URLLC 业务的最小调度单元是符号级 mini-slot。时/频为倒数关系, SCS 越大, 传输时间间隔(Transmission Time Interval, TTI)越小, 即 slot 越短, slot 调度下时延越短。如表 2 所示, NR 频段越高, slot 长度越短, 且后续版本允许在不同 SCS 间灵活分配时频资源以适配不同业务需求。

表 2 3GPP 38.211 NR 帧结构对应关系<sup>[6]</sup>

频段	子载波宽度/kHz	每时隙符号数	每帧时隙数	每子帧时隙数
Sub 3G FDD	15	14	10	1
C-Band	30	14	20	2
	60	14	40	4
毫米波	120	14	80	8
	240	14	160	16

5G 常用的帧结构为 2.5 ms 双周期,如图 4 所示。但针对 URLLC 业务则可调整为 1 ms 或 0.5 ms 单周期<sup>[7]</sup>。如图 5 所示,对于 1 ms 单周期而言,每毫秒包含一个全下行时隙和一个由保护间隔(Guard Period, GP)及上行符号构成的特殊时隙。

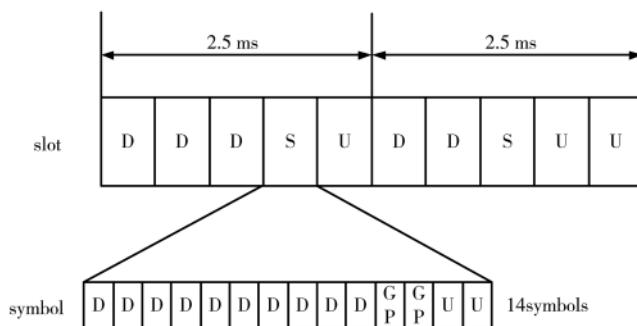


图 4 2.5 ms 双周期帧结构

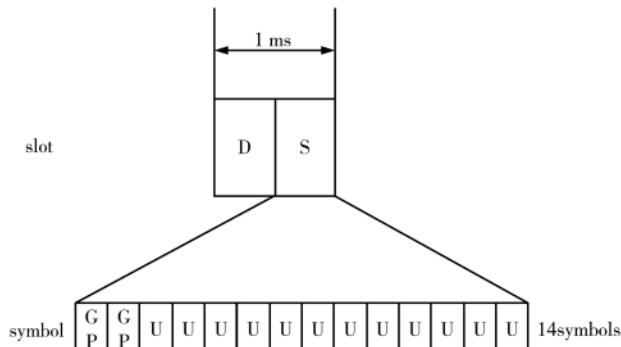


图 5 1 ms 单周期帧结构

在 1 ms 单周期帧结构中,终端可通过 Fast HARQ 在某一子帧内接收解调下行信息,根据其类型在同一子帧的上行符号时反馈 ACK 或发送上行数据。该方式对终端处理能力要求较高,数传过程如图 6 所示。

相比于 2.5 ms 双周期中下行与下一个上行符号间隔 1 ms 以上而言,1 ms 单周期方式减小了上行反馈时间,缩短用户面时延。

## 2.2 mini-slot(Non-Slot)

为了进一步增加调度机会以及减少数据发送等待时延和数据传输时延,

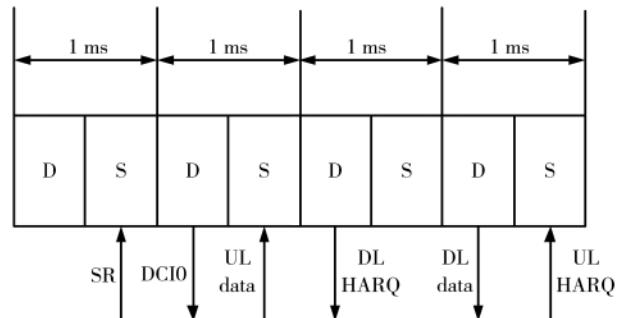


图 6 1 ms 单周期 Grant-Based 数传过程

URLLC 引入了 mini-slot(Non-Slot)。

NR 无线时域资源分配包括 Type A 和 Type B 两种方式,不同的资源分配类型对应的无线资源起始位置(S)和长度(L)不同。其中 Type B 是基于非时隙调度,即支持在 1 个时隙内任意符号为起始位置,由 2/4/7 个符号进行调度。下行 PDSCH 时域资源具体分配方式如表 3 所示<sup>[8]</sup>。

表 3 下行 PDSCH 时域资源分配

PDSCH 映射方式	普通循环前缀			扩展循环前缀		
	S	L	S+L	S	L	S+L
Type A	{0, 1, 2, 3}	{3, ..., 14}	{3, ..., 14}	{0, 1, 2, 3}	{3, ..., 12}	{3, ..., 12}
	{0, ..., 12}	{2, 4, 7}	{2, ..., 14}	{0, ..., 10}	{2, 4, 6}	{2, ..., 12}
Type B	{0, ..., 12}	{2, 4, 7}	{2, ..., 14}	{0, ..., 10}	{2, 4, 6}	{2, ..., 12}
	{0, ..., 12}	{2, 4, 7}	{2, ..., 14}	{0, ..., 10}	{2, 4, 6}	{2, ..., 12}

对 eMBB 业务而言,为了充分利用资源单元(Resource Element, RE),业务信道使用 Type A 的资源映射方式尽量占满整个时隙的 RE 资源,即 slot 是最小调度单元。

为了缩短时延,URLLC 业务最小的调度单元是 mini-slot。mini-slot 业务信道使用 Type B 的资源映射方式。Type B 的物理下行共享信道(Physical Downlink Shared Channel, PDSCH)/物理上行共享信道(Physical Downlink Shared Channel, PUSCH)起始符号位置可以更加灵活配置,分配符号数量可以更少,时延短,最快在 2 个符号完成数据的发送。30 kHz SCS normal-slot TTI 长度为 0.5 ms,mini-slot TTI 长度低至约 70  $\mu$ s。

2 个符号的 mini-slot 帧结构如图 7 所示。

mini-slot 发送数据若采用 Grant Free,则无需考虑授

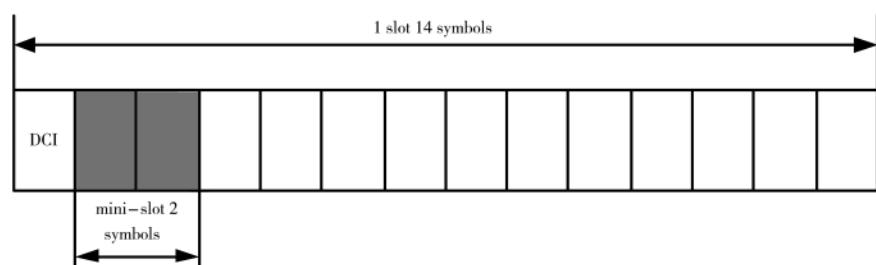


图 7 2 符号 mini-slot 示意图

权周期。上行采用资源预留,使用 mini-slot 发送 PUSCH;下行采用资源抢占方式,使用 mini-slot 通过 PDCCH 调度 PDSCH,随即在 mini-slot 上进行数据发送。以 TDD 2.5 ms 双周期为例,2 符号 mini-slot 空口传输时延如图 8 所示。

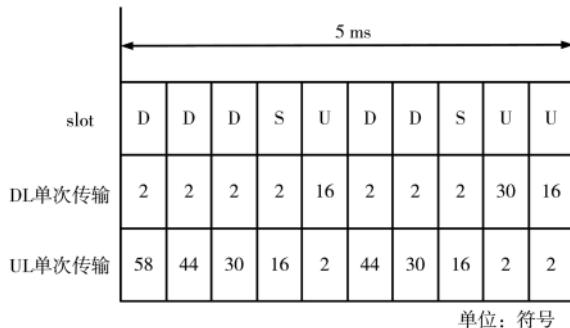


图 8 mini-slot 数传时延

### 2.3 增强 HARQ 反馈

在 R15 版本中,支持了最小环回为  $N+1$  的 Fast HARQ,即一个时隙内支持一个用于 HARQ-ACK 传输的 PUCCH<sup>[9]</sup>。上、下行 HARQ  $K_2/K_1$  最小为 1 slot,如图 9、图 10 所示,其中  $K_1$  指 PDSCH 与在 PUCCH 上的反馈时隙,  $K_2$  指调度 PUSCH 的 UL DCI 与 PUSCH 之间的时隙偏移。

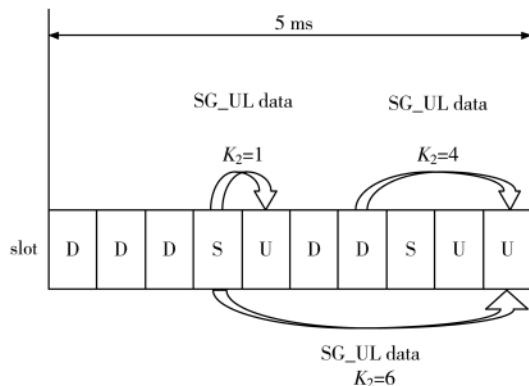


图 9 上行 Fast HARQ

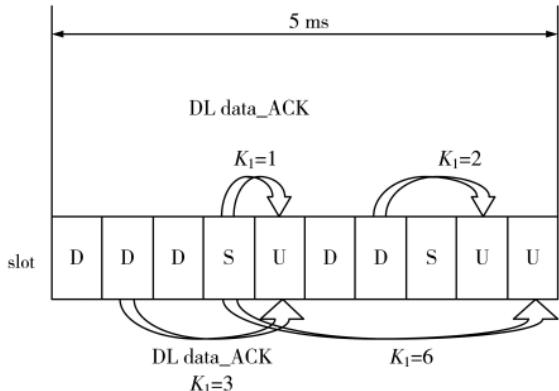


图 10 下行 Fast HARQ

在一个时隙中使用一个以上的 PUCCH 用于 HARQ-ACK 传输可以进一步加快 HARQ-ACK 反馈,减

少延迟。因此在 R16 中, NR 支持基于子时隙的 HARQ 反馈,一个上行时隙被划分为多个子时隙,每个子时隙中都可以传输承载 HARQ-ACK 的 PUCCH,即在同一个时隙就能反馈。目前支持一个时隙被划分为 2 个子时隙或者 7 个子时隙。当配置基于子时隙的反馈时,用于 HARQ-ACK 传输的 PUCCH 资源是对每个子时隙独立配置,且不能跨子时隙边界。

### 2.4 UL Grant Free

在 4G 网络中,上行接入是一个 Grant-Based 过程,如图 1 所示。上行数传前 UE 需要先向基站发送 SR (Scheduling Request) 请求调度资源,等待基站回复 SG (Scheduling Grant),即得到基站许可后才能开始数传,其中 SR 请求和 Grant 授权需要约 11 ms,远超 URLLC 指标。

在 R14 阶段,普遍使用预调度方式压缩授权时间,在每个下行控制信道都为 UE 下发 UL Grant,并在下一个上行共享信道进行数据上传。提前为 UE 下发 UL Grant,可以动态改变 MCS、RB 和数据量,缩短上行业务时延,但是由于需要提前分配上行资源,存在额外的控制信道开销和上行干扰,会导致资源浪费。调度过程如图 11 所示。

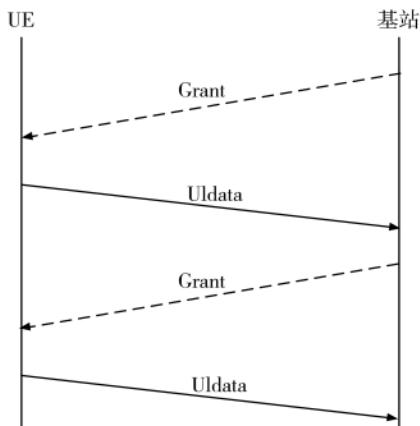


图 11 上行预调度方案

在 R15 引入了 Grant Free Access,即无需基站授权的传输方式。在 Grant Free 的网络中授权握手过程被简化了,SR/SR 步骤的信令都被省略,减少授权周期的等待时间,从而缩短了上行的信令时延。基站只在需要调整指定的上行传输资源时配置一次 UE 上行授权信息,否则将持续使用上一次的配置资源进行上行数传,避免控制信道开销,降低上行干扰,如图 12 所示。

上行免授权调度分为 Type 1 和 Type 2 两种方式。无线资源控制 (Radio Resource Control, RRC) 配置信令 ConfiguredGrantConfig 同样适用于 Type 1 和 Type 2。

对于 Type 1 上行免授权调度的传输,由 gNB 先进行 RRC 配置,确定 PUSCH 传输使用的资源参数,UE 按照配置,在有数据需要传输时直接进行传输,这样可以降低上行数据的时延。Type 1 方式适用于周期和资源等不

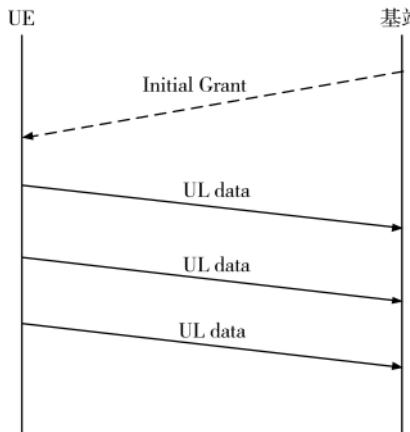


图 12 Grant Free 上行调度方案

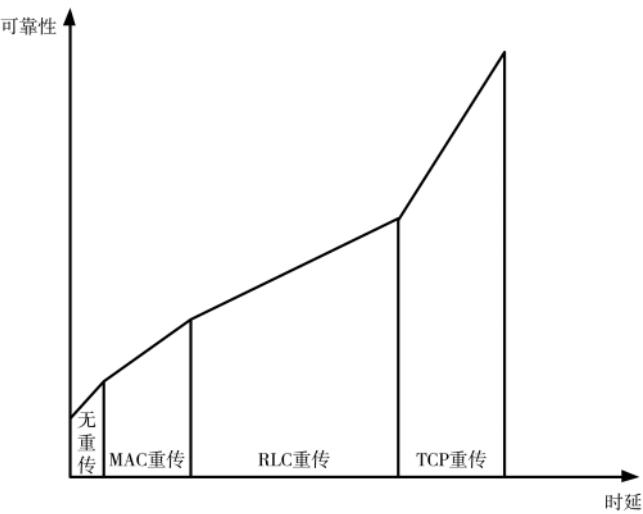


图 13 重传与可靠性关系

频繁改变的相对稳定业务。

对于 Type 2 上行免授权调度的传输,由 gNB 先进行 RRC 配置,然后由 gNB 通过 DCI 激活信令激活上行传输;UE 按照配置,在收到激活信令后,在有数据需要传输时进行传输,这样既省去发送 SR 以及接收上行 grant 的时间,降低了上行数据的时延,并且部分解决了资源预留带来的使用率较低的问题。Type 2 相对于 Type 1 是一种更为灵活的授权配置方式,操作方便,更适用于突发性业务。上行免授权调度传输支持重复传输和跳频传输等性能增强方案。

在 R16 版本中,进一步进行增强,支持多个配置的方案。在多配置方案中,按照配置单独进行激活,支持按照配置单独进行释放,也支持多个配置联合释放以节省 DCI 信令开销。

### 3 高可靠关键技术

高可靠性定义为在一定时延要求下正确传输数据包的概率。在 RAN 侧的高可靠伴随着时延、业务数据量等场景要求。可靠性主要受误块、分片及切换的影响,提高可靠性的技术包括重复发射、 $10^{-5}$  目标 BLER 的 MCS 表格、空口超低重传等。

重复发射指在时域或频域重复进行较低可靠性的数据传输,通过重传达到的高可靠性,具有效率低、对控制面要求低的特点。

在 R15 标准化方案中,3GPP 主要定义了支持  $10^{-5}$  目标 BLER 的 MCS 新表格,使用较低的码率以保证较低的误码率,即采用频谱效率较低的 MCS 实现高可靠传输<sup>[8]</sup>。

按要求重传(HARQ-Based)只在需要时进行重传,可使用较高的码率,有较高效率。如图 13 所示,MAC 层重传时延较短,RLC 层重传需要增加几十毫秒的量级,而 TCP 层重传需要增加百毫秒量级,因此可靠性的提升主要依靠降低 MAC 层之前的误块和重传时延。

PUSCH 支持两种重发模式:(1)Type A 同 R15 中的 slot aggregation,重传传输次数可由半静态参数配置,也可通过 DCI 动态指示,动态指示的重传传输次数最大可

达 16,半静态参数配置的重传传输次数最大可达 8;(2)Type B 基于 mini-slot 进行重传,可跨 slot 边界和 DL/UL 转换传输,重传传输次数通过 DCI 动态指示,最大重传传输次数可达 16。

R15 通过简化 DCI 流程、多天线单流分集技术、多 TRP 空间分集技术以及 PDCP 复制多通道的频率分集技术进行可靠性增强。R16 进一步提升 PDCP 复制逻辑通道数,增加 TRP 的频分与时隙时分冗余传输分集能力,提出多用户面和多路由通道的双连接传输方案。R17 将进一步增强物理层反馈机制,设计上行 UCI 与数据复用方案。

### 4 URLLC 与 eMBB 复用关键技术

#### 4.1 下行资源复用

在突发 URLLC 业务需求时,动态共享 eMBB 和 URLLC 资源,mini-slot 被迅速插入 eMBB 的时隙中,降低空口 TTI 发送时延、TTI 边界等待时延,URLLC 无需等待,可提升系统反应速度。

在下行场景的资源预定(Pre-emption)方案中,当原来全部分配给 eMBB 的 slot 中紧急插入 mini-slot,则在下一个 DCI 处给终端下发 PI(Pre-emption Indication)说明 URLLC 占用了资源,以便终端做出相应处理,如图 14 所示。

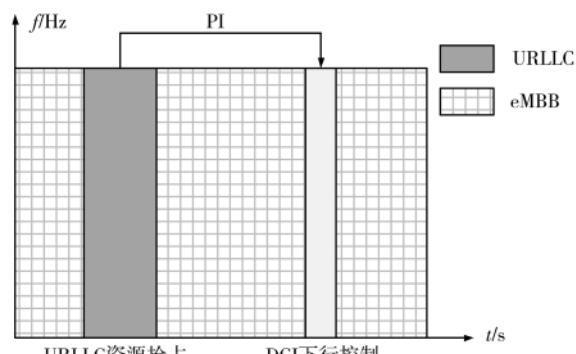


图 14 URLLC Pre-emption 方案

## 4.2 上行资源复用

在调度 DCI 中引入优先级指示用于区分不同优先级<sup>[10]</sup>。UE 首先处理相同优先级信道之间的冲突,再处理不同优先级信道之间的冲突。对于相同优先级的信道冲突,重用 R15 机制;对于不同优先级的信道冲突,丢弃低优先级的上行传输。UE 间复用主要包含两种方案:

(1) 方案 1 通过 DCI format 2\_4 承载指示信息通知低优先级业务的终端需要进行取消的上行数据的资源位置<sup>[10]</sup>。DCI format 2\_4 只用于 PUSCH 和探测参考信号(Sounding Reference Signal, SRS)的取消传输,对于 PUSCH, 从被指示的起点位置开始,取消剩余的数据传输;对于 SRS, 只取消被指示的符号位置上的数据传输,对于后续没有被指示的符号资源,则可以继续传输 SRS。

(2) 方案 2 是 UE 间的上行传输数据叠加传输,通过开环功率控制高优先级业务的终端进行功率提升。引入了新的 RRC 参数 P0-PUSCH-Set 用于指示功率控制,每一个 SRS 资源指示(SRS Resource Indicator, SRI)都对应一个额外的 P0-PUSCH-Set 参数。在 DCI format 0\_1 和 0\_2 中引入了开环功率控制域,根据该指示信息终端可以确定用于开环功率控制的 P0 参数是沿用 R15 的参数还是从用于功率提升的 P0-PUSCH-Set 参数选取。其中 DCI format 0\_1 用于在一个小区中调度一个或多个 PUSCH, 或为配置的 Grant PUSCH 指示下行反馈信息; DCI format 0\_2 用于在一个小区中调度 PUSCH。

## 5 与 TSN 网络融合

为了降低 URLLC 业务的传输时延,可考虑将 5G 网络和时间敏感网络(Time Sensitive Networking, TSN)进行深度融合。一般来说,TSN 业务具有周期性、确定性和数据大小固定的特点,TSN 网络根据该业务特点,可以实现 TSN 业务的确定性传输。部分 uRLLC 业务也具有周期性、确定性和固定长度的特点,因此,可以考虑 5G 网络支持 TSN 网络的相关功能以满足业务对低时延和高可靠性的要求。

为了适应 TSN 网络的高精度的时间同步需求,标准上在 NR 引入了高精度的参考时间发送机制,可以有广播消息(SIB9)或者专用的 RRC 消息(DLInformationTransfer 消息)发送,时间粒度从 10 ms 增强到了 10 ns,从而实现时间敏感传输,保证时钟同步。因为 TSN 技术是基础以太网传输技术发展的,所以 TSN 需要封装以太网帧头,但这样会降低传输效率,所以还需要压缩以太网帧头以提高数据传输效率,降低时延。

为了给 TSN 业务提供确定性传输,标准上引入了 TSN 的辅助信息的定义,使得 TSN 网络可以从核心网获取该业务的周期、数据大小等信息,基于这些信息,基站可以针对 TSN 业务预先进行半静态配置并为 TSN 业务分配更加匹配的通信资源,当 TSN 数据包到达时,不需要通过调度请求从网络侧获取资源,从而降低了等待资源的时间。表 4 为 TSC 辅助时间信息。

表 4 TSC 辅助时间信息

辅助信息	描述
流方向	TCS 业务流的方向(UL/DL)
周期	两个到达包之间的时间间隔
包到达时间	一个到达包到达 RAN 的入口时间(下行包)或离开 UE 的时间(上行包)

## 6 结束语

本文首先介绍了 URLLC 在 R15、R16 和 R17 标准中进展情况,然后分别对低时延、高可靠和 RULLC 与 eMBB 复用关键技术以及与 TSN 网络融合进行了详细介绍。URLLC 现已历经了 R15、R16 两个版本,R17 在规划中,URLLC 技术方面已取得了很大的突破,未来将渗透至低时延、高可靠的垂直行业之中。同时,R16 仍遗留了一些问题有待进一步优化,将在 R17 版本中继续研究,不断完善提升网络性能。

## 参考文献

- [1] 刘毅,刘红梅,张阳,等.深入浅出 5G 移动通信(第一版)[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [2] 张轶,夏亮,徐晓东,等.3GPP 中 URLLC 标准研究进展[J].移动通信,2020,44(2):2-7.
- [3] 宋蒙,刘琪,许幸荣,等.URLLC 技术研究及其在智能网联行业的应用探讨[J].移动通信,2020,44(2):50-53.
- [4] 3GPP TS 38.913, study on scenarios and requirements for next generation access technologies, V15.0.0(2018-06)[S]. 2018.
- [5] 3GPP TS 22.261, service requirements for the 5G system, V17.2.0(2020-03)[S]. 2020.
- [6] 3GPP TS 38.211, NR; physical channels and modulation, V16.0.0(2019-12)[S]. 2019.
- [7] 董帝娘,许国平,林斌.URLLC 低时延的技术研究及业务应用[J].移动通信,2020,44(4):78-84.
- [8] 3GPP TS 38.214, NR; physical layer procedures for data, V15.3.0[S]. 2018.
- [9] 3GPP TS 38.824, study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case(URLLC), V16.0.0 (2019-03)[S]. 2019.
- [10] 3GPP TS 38.212, NR; multiplexing and channel coding, V16.0.0(2019-12)[S]. 2019.

(收稿日期:2020-07-29)

## 作者简介:

李晶(1994-),女,硕士,助理工程师,主要研究方向:4G/5G 移动通信无线网络创新与研发。

张志荣(1973-),男,高级工程师,主要研究方向:4G/5G 移动通信技术、网络 AI、网络节能、物联网技术等。

陈建刚(1963-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:移动网络技术及运营商网络部署方案。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所