

# 5G uRLLC 应用场景分级及 解决方案研究

## Research on 5G uRLLC Application Scenario Classification and Solution

龙青良<sup>1</sup>, 李展<sup>1</sup>, 李一<sup>2</sup> (1. 中国联合网络通信集团有限公司, 北京 100033; 2. 中国联通研究院, 北京 100048)  
Long Qingliang<sup>1</sup>, Li Zhan<sup>1</sup>, Li Yi<sup>2</sup> (1. China United Network Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China; 2. China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China)

### 摘要:

为深入挖掘超高可靠、低时延的应用场景和需求,将 uRLLC 的能力最优匹配到行业应用中,从时延、可靠性、速率和移动性 4 个维度构建了“1+3”uRLLC 无线场景分级体系,对低时延、高可靠各关键技术及产业成熟度进行研究分析,提出基于关键功能点组合的各场景分级的解决方案,并通过外场试点进行测试验证。

### 关键词:

uRLLC; 低时延; 高可靠; 场景分级

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2023.11.006

文章编号: 1007-3043(2023)11-0028-05

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:

In order to deeply explore the application scenarios and requirements of ultra reliable and low latency, and effectively match the capabilities of uRLLC to industrial applications. A "1+3" uRLLC wireless scenario classification system is built from four dimensions of latency, reliability, rate and mobility, then it researchs and analyzes the key technologies and industrial maturity of low latency and high reliability, and proposes a solution based on the combination of key function points to classify each scenario, and conducts testing and verification through field pilot.

### Keywords:

uRLLC; Low latency; High reliability; Scene grading

**引用格式:** 龙青良, 李展, 李一. 5G uRLLC 应用场景分级及解决方案研究[J]. 邮电设计技术, 2023(11): 28-32.

## 1 概述

5G uRLLC 应用场景多种多样,很多应用场景对时延和可靠性有更好的性能要求。uRLLC 对时延、可靠性要求极高,一般采用专网形式。而专网场景下,一般采用 UPF 下沉、服务器本地化等方式,基站到服务器时延相对固定。因此,uRLLC 场景主要的不稳定因素来自无线网络。

目前在标准层面 uRLLC 的技术已相对成熟,但当前整体产业链相对滞后,uRLLC 特性特别是在工业领域的应用仍处于初步探索阶段,为深入挖掘超高可

靠、低时延的应用场景和需求,有效将 uRLLC 的能力最优匹配到行业应用中,本文聚焦 uRLLC 无线应用场景分级,结合当前标准定义、垂直行业洞察以及产业在商用初期产品实现上的进展,定义了多目标优化模型,从时延、可靠性、速率和移动性 4 个维度描绘了“1+3”uRLLC 无线场景分级体系。此外,根据上述 uRLLC 不同场景分级体系,结合产业链成熟度,给出可复制的场景化解决方案。

## 2 5G uRLLC 发展的现状和存在的问题

5G uRLLC 的技术标准基本就绪。uRLLC 标准主要有 3 个演进版本,分别为 R15、R16 和 R17,各版本逐步完善 uRLLC 的业务需求、应用场景和性能指标。

收稿日期: 2023-10-25

2019年冻结的R15版本是5G的基础标准,支持链路级的基础uRLLC能力,设计目标场景单一,主要保障单链路业务性能。R15侧重于中低频率的uRLLC标准的制定,通过引入传输时间间隔(Transmission Time Interval, TTI)结构来降低时延并引入多项提升可靠性的方案,满足空口单向1 ms时延和99.999%的可靠性要求。2020年冻结的R16版本是5G的完整标准,完善了中低频和毫米波频段全覆盖的uRLLC技术方案,支持多业务场景的uRLLC能力。R16标准引入时间敏感网络(Time Sensitive Networking, TSN)基础协议,为多种业务提供uRLLC通信能力,满足99.9999%的高可靠性和空口单向0.5~1 ms时延的业务需求,并提供低至1 μs的抖动和20 ns级别的精准授时同步,为R16新增的工业自动化、智能交通和电网管理等场景提供更高可靠、更低时延的技术解决方案。R17版本是5G的增强标准,于2022年冻结,支持更高的定时精度和更灵活的频谱方案,扩展支持免许可频段的uRLLC能力,并进一步将5G与TSN结合,目标是利用5G无线技术替代有线连接,解决传统工业网络布线杂乱、维护难度大、设备移动性低等问题。

uRLLC整体产业链滞后。虽然3GPP标准R17版本已经冻结,但无论是网络设备还是芯片终端,还仅支持R15版本的相关技术和功能。uRLLC整体产业链的滞后,也会阻碍运营商进入工业生产核心环节的进度,不利于推动运营商在垂直行业的发展。因此,合理有效的uRLLC场景分级,一方面可以量化uRLLC的网络能力,另一方面也可以帮助产业链清晰地推动uRLLC技术的有序发展。

uRLLC场景分级目前尚没有清晰的定义。uRLLC理论上可以提供1 ms的低时延、99.999%的可靠性,不同的行业及场景对于时延、可靠性、隔离度等的要求不尽相同,要满足相关要求所需的网络成本也不同。如何定义和划分不同等级的uRLLC场景对服务的提供者及消费者都至关重要。然而目前业界还没有uRLLC场景等级划分,大多数行业用户对网络的uRLLC能力没有清晰的认识,也不清楚uRLLC如何与自身的行业应用场景相匹配以及uRLLC能够带来的

商业价值。

综上,uRLLC场景分级划分是垂直行业和5G技术之间的桥梁,也是uRLLC迈向规模化商业运营的第1步。充分了解各行业的uRLLC场景需求及其对网络的实际需求,支撑客户确定性的连接体验,是现阶段的重要工作。

### 3 uRLLC场景分级研究

#### 3.1 uRLLC业务需求

uRLLC将主要面向行业应用,3GPP在不同的协议中对uRLLC的业务以及业务的SLA要求、网络的SLA要求进行了相关描述。其中,3GPP TS 22.261给出了一些需要低时延、高可靠业务的示例,3GPP TS 22.104给出了一些对于uRLLC业务性能需求的示例,3GPP TS 23.501协议定义了承载不同5QI的不同特性,如5QI82~90I是delay critical GBR,应用的场景均服务于uRLLC业务。通过协议描述分析,不同行业、不同场景的不同业务,对于网络的时延、可靠性、速率、移动性等都有不同的需求。表1所示为3GPP标准中典型uRLLC场景及其时延、可靠性要求。这些场景对时延的需求为0.5~50 ms,可靠性为99.9%~99.9999%。

#### 3.2 uRLLC场景分级

通过对现有协议的分析和对行业的洞察,本文定义了多目标优化模型,从时延、可靠性、速率和移动性4个维度构建了“1+3”uRLLC无线场景分级体系。其中,“1”代表移动性,将uRLLC场景按照移动性分为静止场景和移动场景。“3”分别代表时延、可靠性和感知速率。

为更便于行业用户理解场景分级,并快速与业务需求相结合,提出了“分级调色板”。行业用户可以在时延T1~T5、可靠性R1~R4、感知速率Th1~Th4等选项中,根据业务需求进行选择 and 调色。

时延指端到端RTT时延,具体等级划分如图1所示。可靠性指在目标时间内成功传输的数据包占比,具体等级划分如图2所示。感知速率具体等级划分如图3所示。

目前uRLLC业务场景主要集中在静止场景。在

表1 3GPP标准中典型uRLLC场景及其时延、可靠性要求

场景	离散自动化-运动控制	离散自动化	流程自动化-远程控制	流程自动化-监控	配电-中压	配电-高压	智能交通-技术设施回程	触觉互动	远程控制
端到端时延/ms	1	10	50	50	25	5	10	0.5	5
可靠性/%	99.9999	99.99	99.9999	99.9	99.9	99.9999	99.9999	99.9999	99.999

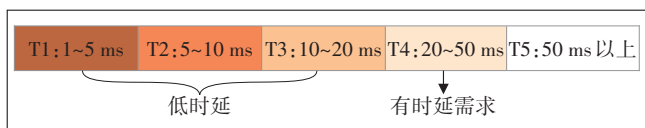


图1 时延分级示意



图2 可靠性分级示意



图3 感知速率分级示意

静止场景下,根据对于时延、可靠性和感知速率的不同需求,将场景细分为如下四大类。

场景1:低时延应用场景。在应用场景1中,uRLLC业务对时延有更高的要求,典型的业务场景为视频渲染,视频渲染业务SLA要求时延为5ms,可靠性达99.9%。

场景2:高可靠应用场景。在应用场景2中,uRLLC业务对于可靠性要求较高,典型的业务场景为智能交通系统。智能交通业务SLA要求的时延为30ms,可靠性达99.999%。

场景3:低时延、高可靠应用场景。在应用场景3中,uRLLC业务对于时延和可靠性要求均较高,一般面向小业务包数据,典型的业务场景为配电。配电业务SLA要求时延为5ms,可靠性达99.999%。

场景4:低时延、高可靠、高速率感知应用场景。

在应用场景4中,uRLLC业务对于速率、时延、可靠性都有一定要求,典型的业务场景为5G塔式起重机远程控制。该业务对上行速率有较高的要求,塔机视频摄像头通常有4~6个,用于远程控制室远程辅助操控,每个摄像头要求5~10Mbit/s的速率;网络时延要求:地面IO(紧急停车)与PLC之间时延要求10ms。远程控制室PLC与塔机PLC之间进行心跳校验,时延要求为20ms。网络可靠性至少需要达到99.99%。

具体如表2所示。

表2 具体对应到场景分类表(S代表Stationary)

场景分类	场景代号	时延	可靠性	感知
低时延	S-T1/T2/T3	T1、T2、T3	R3、R4	Th4
高可靠	S-R1/R2	T4、T5	R1、R2	Th4
低时延、高可靠	S-(T1/T2/T3)&(R1/R2)	T1、T2、T3	R1、R2	Th4
低时延、高可靠、高速率感知	S-Th1/Th2/Th3	T4	R3	Th1、Th2、Th3

uRLLC使能的业务用例包括工业控制、运动自动化、远程控制、实时游戏等,不同业务用例和uRLLC场景分级的匹配关系如图4所示。

## 4 uRLLC 应用场景分级解决方案

### 4.1 uRLLC 空口关键技术产业进展

为实现uRLLC低时延、高可靠特性,3GPP在R15、R16和R17阶段分别增加了降低时延、提升可靠性的物理层以及高层技术方案。为了实现uRLLC场景的低时延需求,主要通过快速接入、细时间颗粒度、快速反馈、高优先级业务抢占资源等机制保障低时延;为实现高可靠性要求,主要通过重复、低编码率等鲁棒

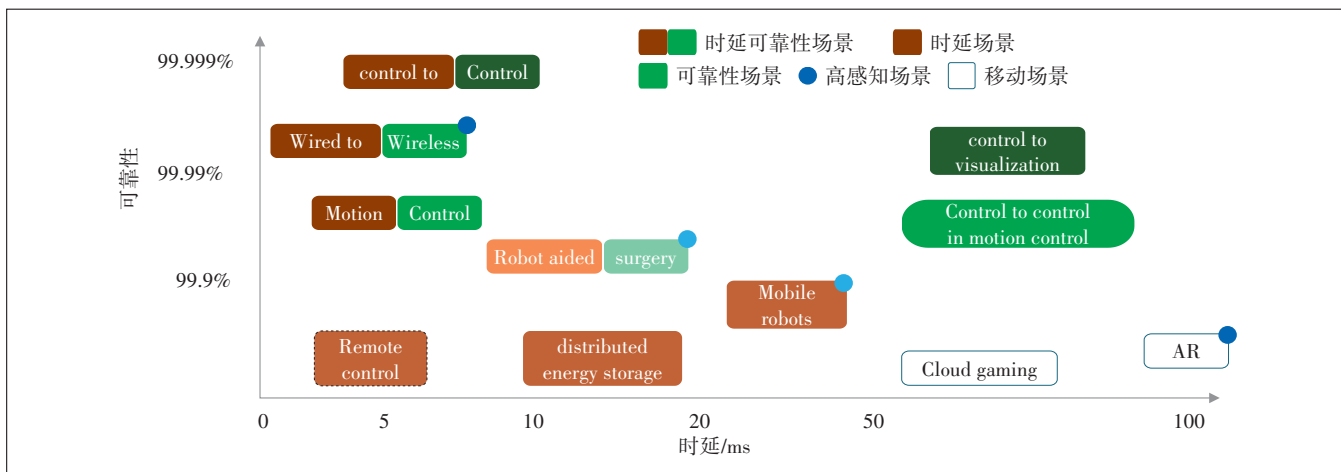


图4 uRLLC行业应用与场景分级



性传输方案,保证控制信道和数据信道的高可靠性。

目前主设备和终端芯片厂商主要实现 R15 版本 uRLLC 的关键技术和功能,对于 R16 版本的功能点,2023 年上半年陆续支持,对于 R17 版本的功能点,各厂商尚未有明确研发路标(见表 3)。

表 3 uRLLC 各协议版本空口关键技术列表

关键技术	R15	R16	R17
低时延关键技术	支持灵活的帧结构;基于 OFDM 符号的 mini-slot 调度粒度;上行配置授权/上行免调度;基于时隙的 PDCCH 盲检测;PDCP 乱序递交;下行资源抢占机制	基于 sub-slot 的 HARQ-ACK;上行免调度增强;基于 Span 的 PDCCH 监测;sub-slot level HARQ 快速反馈;UE 间上行资源抢占/复用	UE 内复用
高可靠关键技术	低码率 MCS/CQI 表格设计;PDSCH/PUSCH 时隙级重复传输;PDCCH 高聚合等级(PDCCH 聚合等级 16);PDCP 重复传输(2条冗余)	UCI 增强 - 多 HARQ 码本;PUSCH 重复传输增强;PDCP 重复增强(4条冗余);多 TRP 传输 PDSCH	HARQ-ACK 增强

目前商用能力主要先聚焦非实时业务,并向链路层级实时业务拓展,实现如机器视觉、监控配置、C2C 控制 AGV 等。

## 4.2 应用场景分级解决方案

结合产业链成熟度,本文主要针对 uRLLC 静止场景分级给出建议的解决方案。

### 4.2.1 低时延场景解决方案

低时延场景主要对于时延有要求,通过低时延关键技术叠加即可满足。根据理论研究,建议的功能组合如下。

a) 开免调度/预调度、minislot、乱序递交、low-SE、slot repetitions、HARQ 最大次数限制等功能的叠加。

b) 开免调度/预调度、minislot、low-SE、slot repetitions、HARQ 最大次数限制等功能的叠加。

### 4.2.2 高可靠场景解决方案

高可靠场景主要对可靠性有较高要求,需要叠加高可靠相关技术。根据理论研究,建议采用如下功能组合。

a) 开免调度/预调度、slot repetitions、low-SE、PDCCH Aggregation level 16 等功能的叠加。

b) 对于存在双载波场景,建议的功能组合为:开免调度/预调度、slot repetitions、low-SE、PDCCH Aggregation level 16 和 PDCP duplication 等功能的叠加。

### 4.2.3 低时延高可靠场景解决方案

低时延高可靠场景对时延和可靠性同时有要求,而部分增加可靠性的技术会降低时延,部分降低时延

的技术会降低可靠性。因此建议的功能组合如下。

a) 开免调度/预调度、minislot、low-SE、slot repetitions、PDCCH Aggregation level 16、HARQ 最大次数限制等上述功能的叠加。

b) 对于存在双载波场景,建议功能组合为:开免调度/预调度、low-SE、slot repetitions、PDCP duplication、PDCCH Aggregation level 16、HARQ 最大次数限制等上述功能的叠加。

### 4.2.4 高感知时延可靠场景解决方案

高感知时延可靠场景主要对用户的感知速率有要求,同时对时延和可靠性也有一定需求。而部分 uRLLC 针对性的功能虽然可以提升可靠性、降低时延,但都是以资源为代价的,不适合高速率需求的业务。因此,对这类业务的建议方案为:通过 QoS 调度优先级或切片组资源预留的方式保障业务资源,如果是双载波场景,可以叠加 PDCP duplication 功能。

### 4.2.5 试验结果

在对各应用场景解决方案理论研究的基础上,通过在外场试点对以下功能组合进行测试,分别验证小包业务和大包业务在各种功能组合能达到的最小时延和最优时延可靠性指标,具体功能组合如表 4 所示。

表 4 功能组合说明

功能组合类型	组合功能项
基线	基线
组合 1	开启预调度
组合 2	预调度+ low-SE
组合 3	预调度+ low-SE +minislot
组合 4	预调度+low-SE+minislot+乱序递交
组合 5	预调度+ low-SE +slot repetitions
组合 6	预调度+ low-SE +slot repetitions
组合 7	预调度+ low-SE +slot repetitions+minislot+乱序递交

#### 4.2.5.1 小包业务场景的 SLA 性能测试结果

在小包业务场景下,分别测试表 4 各种功能组合能达到的最小时延和最优时延可靠性。测试结果如图 5 和图 6 所示。

从图 5 可以看出,在小包业务场景下,采用 uRLLC R15 的技术功能后,无线空口平均时延能从 15.58 ms 下降到 8 ms 以内,其中组合 3 和组合 4 的时延最小,分别达到 7.24 ms 和 7.23 ms。

从图 6 可以看出,采用功能组合 3 后,其时延可靠性性能从 20 ms@99% 提升到 10 ms@99.99%,效果提升明显。

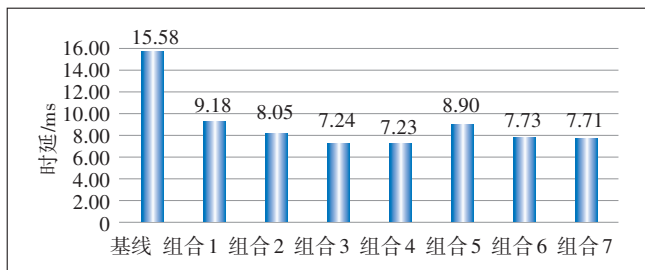


图5 小包业务各功能组合平均时延测试结果

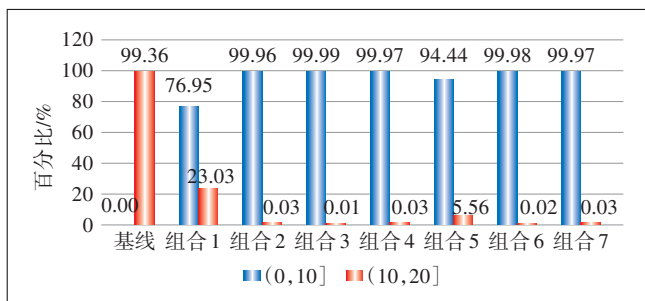


图6 小包业务各功能组合时延可靠性测试结果

#### 4.2.5.2 大包业务场景的SLA性能测试结果

在大包业务场景下,分别测试各种功能组合能达到的最小时延和最优时延可靠性。测试结果如图7和图8所示。

从图7可以看出,在大包业务场景下,采用uRLLC R15的技术功能后,无线空口平均时延从20 ms以上下降到8 ms以内,其中组合3和组合4的时延最小,分别达到7.56 ms和7.59 ms。

从图8可以看出,采用功能组合3后,其时延可靠性能从50 ms@99.99%提升到10 ms@99.99%,效果提

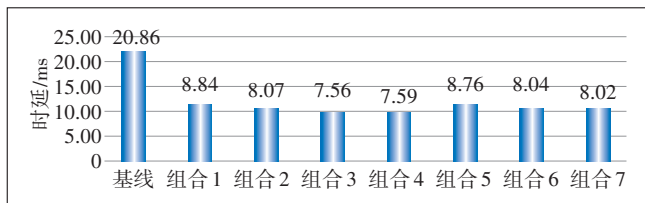


图7 大包业务各功能组合平均时延测试结果

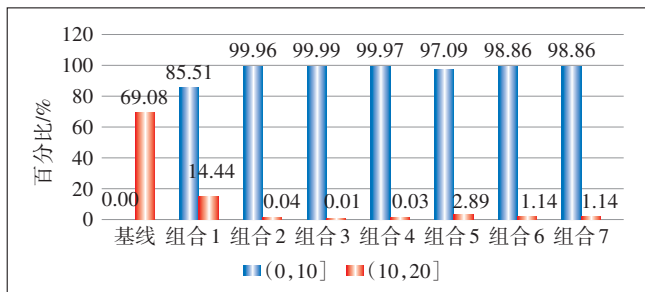


图8 大包业务各功能组合时延可靠性测试结果

升明显。

#### 4.2.5.3 小结

通过小包业务场景和大包业务场景下,各功能组合测试的结果分析可以看出,采用uRLLC R15的技术和功能后,在时延和可靠性方面都有显著提升,因此,对于低时延场景,建议采用功能组合3或功能组合4,即开启预调度、low-SE、minislot的功能组合,或在此基础上再叠加乱序递交功能,对于低时延、高可靠场景,建议采用功能组合3,即开启预调度、low-SE、minislot的功能组合。

## 5 结束语

本文聚焦uRLLC无线应用场景分级,结合当前标准定义、垂直行业洞察以及产业在商用初期产品实现上的进展,定义了多目标优化模型,从时延、可靠性、速率和移动性等4个维度构建了“1+3”uRLLC无线场景分级体系。此外,根据上述uRLLC不同场景分级体系,结合产业链成熟度,给出可复制的场景化解决方案,并通过外场试点进行测试验证,结果表明采用本文提出的功能组合,能有效地将uRLLC无线网络平均时延从20 ms降低至约7 ms,可靠性从20 ms@99%提升至10 ms@99.99%。显著提升的uRLLC网络性能为垂直行业的引入奠定了坚实的网络基础,从而推动uRLLC技术在各行各业的应用和推广,促进配套的产业生态发展,进一步催生更多的5G创新应用。

### 参考文献:

- [1] POPOVSKI P, NIELSEN J J, STEFANOVI E, et al. Wireless Access for Ultra-Reliable Low-Latency Communication: Principles and Building Blocks[J]. IEEE Network, 2017, 32(2).
- [2] JUNIOR E J D S, SOUZA R D, REBELATTO J L. Hybrid Multiple Access for Channel Allocation-Aided eMBB and uRLLC Slicing in 5G and Beyond Systems[J]. Internet Technology Letters, 2021, 4(6).
- [3] BAIRAGI A K, MUNIR M S, ALSENWI M, et al. Coexistence Mechanism Between eMBB and uRLLC in 5G Wireless Networks[J]. IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, 2021, 69(3): 1736-1749.

### 作者简介:

龙青良,高级工程师,主要从事LTE/VoLTE/5G技术原理研究、网络评估与优化技术研究及5G共建共享方案等工作;李展,工程师,主要从事5G共建共享工程规划、建设等工作;李一,工程师,主要从事5G技术原理、新技术试验、网络优化技术研究等工作。