

# 基于5QI的5G+工业互联网用户 差异化时延参数优化与验证

## Optimization and Verification of 5G+Industrial Internet User Differentiated Delay Parameters Based on 5QI

欧阳晖(中国电信佛山分公司,广东 佛山 528000)

Ouyang Hui(China Telecom Foshan Branch, Foshan 528000, China)

### 摘要:

对于5G+工业互联网端到端时延的各类定义和时延分段界定分析,针对性地在无线侧对基于5QI的差异化时延优化手段进行了研究。在具体工业互联网应用的优化实践中,通过基于5QI的预调度参数、IBLER目标值、SR周期等参数的组合优化,提出一套改善空口时延并满足行业应用时延要求的参数优化方案。该场景化优化方案在宏站和室分场景下对覆盖近点和中点进行了验证,结果表明该方案能够在兼顾toC用户感知的同时保障toB用户的时延指标。

### 关键词:

5G;工业互联网;时延;5QI;uRLLC

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.02.011

文章编号:1007-3043(2025)02-0059-05

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:

For various definitions of end-to-end delay of 5G+industrial Internet and analysis of time delay segmentation and delimitation, targeted research is carried out on 5QI based differentiated time delay optimization methods on the wireless side. In the optimization practice of specific industrial Internet applications, through the combination optimization of pre scheduling parameters, IBLER target value, SR period and other parameters based on 5QI, a set of parameter optimization scheme is proposed to improve the air interface delay and meet the delay requirements of industrial applications. The scenario-based optimization scheme has been validated in macro station scenarios covering near points and mid points, as well as indoor distribution scenarios. The results demonstrate that the scheme can achieve the delay requirements of ToB (To Business) users while also considering the perception of ToC (To Consumer) users.

### Keywords:

5G; Industrial Internet; Delay; 5QI; uRLLC

引用格式:欧阳晖. 基于5QI的5G+工业互联网用户差异化时延参数优化与验证[J]. 邮电设计技术, 2025(2): 59-63.

## 1 概述

工业互联网是新一代网络信息技术与工业系统全方位深度融合所形成的技术体系和产业生态。典型的工业互联网应用中存在PLC控制、工业监控、AGV小车等对时延及其稳定性要求高的uRLLC应用。为改善这些应用的端到端时延,助力时延敏感型业务拓展,需要针对5G SA网络端到端时延定界方法、优化手段进行研究。

根据现网大量的运营数据统计分析,5G基站到核心网的时延变化范围是1~20 ms,在覆盖良好的情况下,无线侧的时延是10~30 ms。降低基站到核心网的时延的方法主要包括UPF下沉(MEC部署)、低时延路由、Fast调度等;无线侧(空口)时延优化的主要方法包括预调度、高优先级保障、灵活时隙、超级上行(SUL结合CA)等。本文主要研究无线侧的优化方法。

## 2 5G+工业互联网中的时延SLA及优化方向

为了研究优化5G+工业互联网时延的方法,从时延的定义、测量方法入手,得到影响时延的主要因素,

收稿日期:2024-12-19

进而提出基于5QI的优化时延SLA的方向。

### 2.1 时延SLA的场景化定义和测量

在5G+定制网业务中,端到端时延是在无线网络和以太网的基础上,数据包从发送端传输到接收端所消耗的时间。典型的时延定义包括点对点非应答模式(接收包间隔)、单向OTT时延和点对点应答模式(RTT往返时延)3类。

这三类时延的定义对应不同的应用场景(见表1)。在AGV小车的时间应用场景中,为了降低时延,使用了类似于UDP的网络协议,因此多使用时延定义(a)——接收包间隔。在本文所述的网络优化实践中,为了测量方便,采用RTT时延定义(c)。

通过用户终端到服务器、终端到终端、终端到UPF外侧Ping包测试,结合基站侧对PDCP层跟踪的方式,

表1 3类时延的定义和应用场景

时延类型	点对点非应答模式(接收包间隔)(a)	单向OTT时延(b)	点对点应答模式(RTT往返时延)(c)
时延定义	$T_i=R[i]-R[i-1]$	$T_i=R[i]-T[i]$	$T_i=R[i]-T[i]$
应用场景	PLC控制类、单AGV、协同AGV	电网DTU、PMU	监控类、操控类、CCTV

对时延进行分段分析。前2种测量方法分别如图1和图2所示,图中显示了关键时间戳测量点的位置。

基于图1和图2的时延测量方法,可对具体的时延进行分段分析。对无线侧时延来说,主要的影响因素是MAC层和物理层的调度。

### 2.2 5QI差异化时延参数优化基础

无线侧针对5G+工业互联网的方向主要有切片参数优化和基于QCI/5QI的参数优化。前者通过独占资源的方式提高目标群体用户的带宽,具有独占性;后者则通过提高目标群体用户的调度次数/优先级提升性能,具有共享性。因此,时延SLA更适用于基于5QI的差异化参数优化。

首先,选择合适的5QI。为了实现差异化优化的目的,将待优化业务配置为5QI=70(属于Non-GBR)<sup>[1]</sup>,在无线侧针对2B用户终端号码数据业务所在的5QI通道,新增调度参数组,将其绑定到5QI=70。然后,提升该业务的优先级。针对5QI=70,配置其优先级为0.9,略高于5QI=5的优先级1,这样可避免目标优化的定制网业务与VoLTE语音信令混淆而导致整体业务的不稳定。

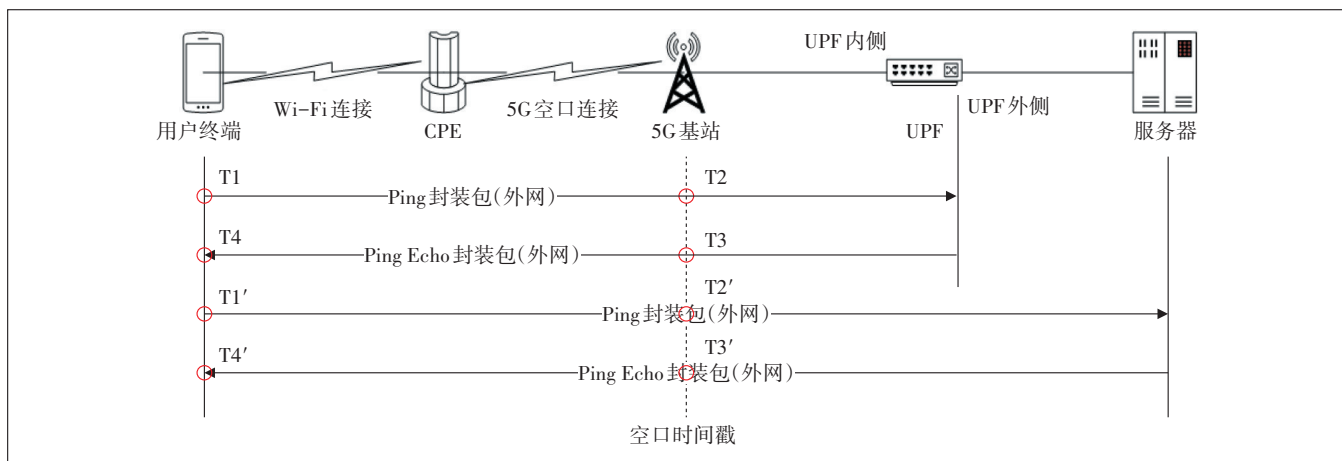


图1 终端到服务器分段Ping时延分析

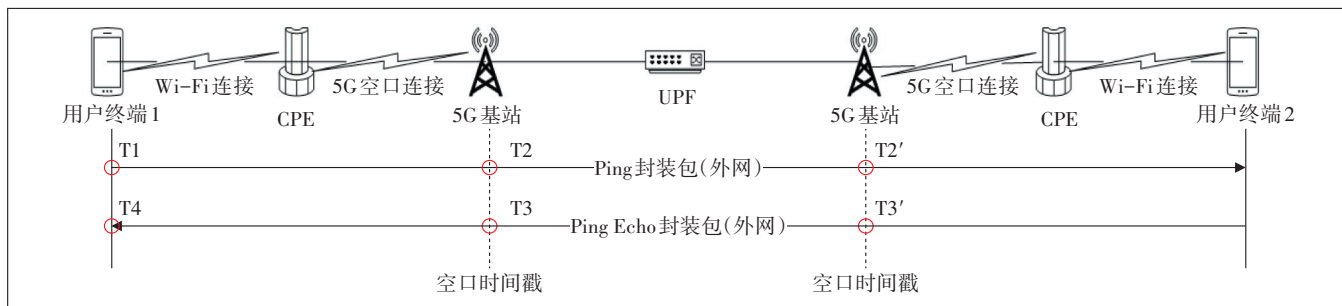


图2 终端到终端分段Ping时延分析

### 3 基于5QI的差异化时延参数优化方案

在将待优化的业务隔离在5QI=70上后,针对该5QI,提出了基于各类无线参数的组合优化方案。该方案的开发过程是,首先对单个优化参数方案进行研究,然后将单个参数优化效果和组合优化效果进行比较,结合业务包大小、应用场景和覆盖强度对组合优化方案的应用提出建议。

#### 3.1 基于QCI的上行预调度

预调度是指不论UE是否向gNodeB发送SRI(Scheduling Request Indicator)请求,每隔一段时间gNodeB都会主动调度一次UE,以减少从UE发送SRI到获得上行调度授权的时间<sup>[2-3]</sup>。如果在设置的时长内数据没有传输完(是否传输完的判定标准对应下文所述“基于QCI的上行预调度数据量”),智能预调度时长会自动延长至数据传输完成, $t_1$ 、 $t_2$ 和 $t_3$ 表示3次智能预调度的实际持续时间,智能预调度原理如图3所示。

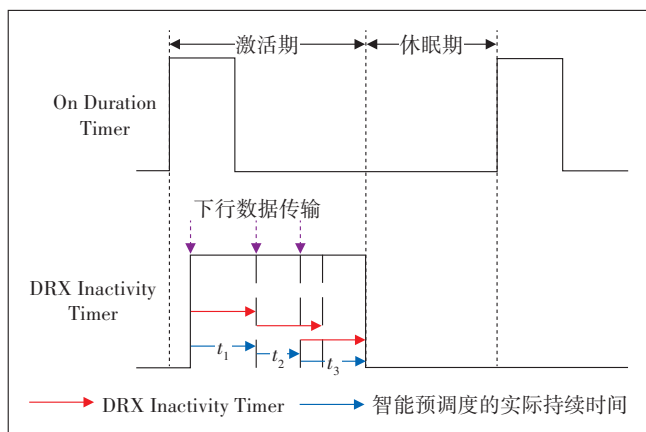


图3 智能预调度原理

该特性参数配置过程的要点包括:第一,打开基于QCI的上行预调度开关;第二,配置基于QCI的上行预调度间隔(即图3中的DRX Inactivity Timer);第三,配置基于QCI的上行预调度数据量;第四,配置基于QCI的上行智能预调度持续时间。具体参数配置如表2所示。

表2 基于QCI的上行预调度参数配置方案

参数组	基于QCI的上行预调度开关	基于QCI的上行预调度间隔/时隙	基于QCI的上行预调度数据量/Byte	基于QCI的上行智能预调度持续时间/ms
T0	关	5	100	250
T1	开	5	2 000	1 500

#### 3.2 基于QCI的上下行IBLER目标值调度

通过对基于QCI的上、下行IBLER目标值进行配置,使对应QCI承载的业务做外环链路自适应(Outer Loop Link Adaptation, OLLA)收敛于IBLER目标值。通过配置减少IBLER目标值,从而降低误块率,减少重传次数,降低空口时延。

该特性参数配置过程的要点包括:第一,打开基于QCI的上行IBLER开关;第二,打开基于QCI的下行IBLER开关;第三,配置基于QCI的上行IBLER目标值;第四,配置基于QCI的下行IBLER目标值。具体参数配置如表3所示。

表3 基于QCI的上下行目标值调度参数配置

参数组	基于QCI的上行IBLER开关	基于QCI的上行IBLER目标值(步长:0.000 01)	基于QCI的下行IBLER开关	基于QCI的下行IBLER目标值(步长:0.000 01)
T0	关	10 000	关	10 000
T2	开	1 000	开	1 000

#### 3.3 基于QCI的SR周期优化

即使打开了预调度开关,由于预调度间隔参数的存在,还是有一定概率导致预调度不生效。当预调度不生效时,就需要采用SR调度对时延进行优化,其流程如图4所示。SR是上行调度的资源请求,相比于预调度场景,SR调度会多一个上行SR等待的时延以及上行SR流程的时延,SR周期由网络侧通过RRC信令对UE进行配置<sup>[4]</sup>。

该特性参数配置过程的要点是:第一,打开基于QCI的SR周期开关;第二,配置基于QCI的SR周期(缩短该周期,给予更多调度机会);第三,打开基于QCI的SR首包大小可配功能开关;第四,修改基于QCI的SR首包大小(增大该参数,允许SR调度更多的数据)。具体参数配置如表4所示<sup>[3-4]</sup>。

#### 3.4 参数优化效果及其评估

在每一类参数优化前后,根据不同覆盖场景的需求,分别选取5G+工业互联网的室分和宏站的近点和中点(近点、中点和远点是RSRP的一个范围,各个运营商均有明确的定义)并进行验证测试。为了更加精确地分析,下面针对RSRP和SINR的典型值进行研究,对应的覆盖典型值(定点测试的平均值)如下。

a) 室分。近点RSRP为-80.13 dBm, SINR为20 dB;中点RSRP为-92.76 dBm, SINR为15.24 dB。

b) 宏站。近点RSRP为-82 dBm, SINR为15 dB;中点RSRP为-93.62 dBm, SINR为10.65 dB。

从以上典型值可以看到,宏站的近点和中点对应

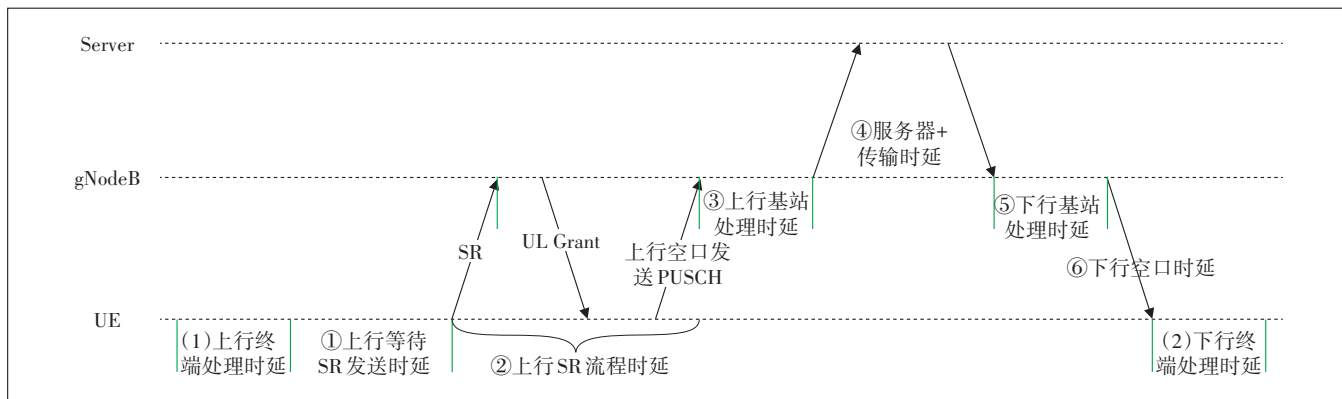


图4 SR调度场景流程

表4 基于QCI的SR调度周期配置方案

参数组	基于QCI的SR周期开关	基于QCI的SR周期/时隙	基于QCI的SR首包大小可配功能开关	基于QCI的SR首包大小/Byte
T0	关	40SLOT	关	600
T3	开	20SLOT	开	4 160

表5 小包(32 B)的Ping时延优化效果(单位:ms)

场景	室分近点	室分中点	宏站近点	宏站中点
T0平均值	19.16	20.51	29.64	31.11
T0最大值	38	40.22	44.29	46
T1平均值	9.27	10.02	13.89	15.69
T1平均值改善	9.89	10.49	15.75	15.42
T1最大值	22	23.11	29.31	31.59
T1最大值改善	16	17.11	14.98	14.41
T2平均值	14.62	12.56	24.35	26.18
T2平均值改善	4.54	4.98	5.29	4.93
T2最大值	27.67	33.88	32.96	41.71
T2最大值改善	10.33	6.34	11.33	4.29
T3平均值	16.91	17.54	26.62	26.8
T3平均值改善	2.25	2.97	3.02	4.31
T3最大值	33.7	35.82	40.07	42.33
T3最大值改善	4.3	4.4	4.22	3.67
T4平均值	8.2	9.52	11.45	13.42
T4平均值改善	10.96	8.02	18.19	17.69
T4最大值	18.23	19.25	15	30.87
T4最大值改善	19.77	20.97	29.29	15.13

的RSRP略低于室分,而SINR值相应要低5 dB左右,这是因为室外环境下收到的小区数相对较多,同频干扰较大。

对于初始值T0、上行预调度优化后T1、IBLER目标值优化T2、SR周期优化T3和综合参数优化T4,分别对比其室分近点、室分中点、宏站近点和宏站中点的平均时延和最大时延,小包和大包的Ping时延结果如表5和表6所示。

从表5和表6可以得到以下结论。

a) 单独来看,3种参数优化方法——基于QCI的上行预调度、基于QCI的上下行IBLER目标值调度和基于QCI的SR周期优化都能降低时延的平均值和最大值,且基于QCI的上行预调度优化效果最明显,另外2种方法的改善幅度明显要小。这是因为后2种方法应用的局限性更加明显,例如提高“基于QCI的上下行IBLER目标值”虽然可以增加传输数据量从而降低时延,但也会提高IBLER从而增加了重传次数,抵消了部分优化效果。

b) 大多数情况下,将3种方法结合起来的效果要优于任何单独一种方法,但要弱于3种方法优化效果的叠加。这个在理论上可以解释,例如把基于QCI的上行预调度和基于QCI的SR周期优化结合起来时,后者只有在前者不起作用时才会发挥作用,因此叠加效果弱于两者单独效果之和。

c) 对于优化前后的时延统计值,室分明显低于宏

站,这个差别也明显大于覆盖强度(近点和中点)的差异,这是因为宏站的SINR值相对更差,而数据传输质量相比RSRP更加依赖于SINR。因此,对于工业互联网应用,为了保证SLA,室分覆盖还是首选。

d) 无论是近点还是中点,宏站覆盖场景的改善幅度远大于室分覆盖场景,这主要也是因为上行预调度策略。在室外场景SINR较差的情况下(相应上行干扰也较大),通过实施预调度策略,能够容忍更多的上行传输差错和时延,对整体时延的改善更加明显。

对比典型行业应用的时延要求(见表7<sup>[5]</sup>)可见,参数优化的效果已经满足了大部分工业应用场景的要求<sup>[6]</sup>。对比参考文献[7]中表1描述的“石化企业项目

表6 大包(1 500 B)的Ping时延优化效果(单位:ms)

场景	室分近点	室分中点	宏站近点	宏站中点
T0平均值	30.47	33.15	44.78	46.26
T0最大值	48.83	50.34	57.82	63.53
T1平均值	16.16	17.77	20.94	22.8
T1平均值改善	14.31	15.38	23.84	23.46
T1最大值	38.43	40.35	41.62	43.84
T1最大值改善	10.4	9.99	16.2	19.69
T2平均值	25.92	29.63	34.08	32.8
T2平均值改善	4.55	3.52	10.7	13.46
T2最大值	40.49	43.34	51.49	49.14
T2最大值改善	8.34	7	6.33	14.39
T3平均值	27.87	32.02	42.16	42.5
T3平均值改善	2.6	1.13	2.62	3.76
T3最大值	42.01	44.16	52.41	57.47
T3最大值改善	6.82	6.18	5.41	6.06
T4平均值	15.11	16.3	19.42	21.34
T4平均值改善	15.36	16.85	25.36	24.92
T4最大值	36	38.86	39.51	41.29
T4最大值改善	12.83	11.48	18.31	22.24

表7 典型行业应用的时延要求

场景	细分子场景	平均网络时延要求/ms	最大时延要求/ms
港口	远程控制龙门吊、桥吊、正面吊	15~30	100~200
	IGV集卡控制,故障接管	30~50	200~500
矿山	远程控制挖掘机、钻机、铲车等重型设备	20~30	200~300
医院	远程超声	30	200
	远程手术	10	100
工业	远程天车	15~20	100~200
园区车联	园区内应急远程驾驶,应急操控	20	200

网络连接需求”,以上优化效果完全符合所有应用的时延要求。

对试验区域室内、外小区后台性能指标进行评估,在修改5QI差异化时延综合参数后,小区整体指标(上下行用户面流量、平均用户数、最大用户数、上下行有效吞吐率、无线接通率、UE上下行掉线率、上下行PRB平均利用率)以及能耗指标平稳,无明显异常。可见,由于采用了基于5QI的差异化参数设置,参数对网络的影响仅限于少部分行业应用客户,对整体指标的影响有限,不影响大网中toC用户的正常使用。

根据以上参数优化方案的验证结果,提出差异化和场景化优化建议,具体如下。

a) 无论是室分还是宏站,均建议采用组合方案。

b) 对于时延SLA要求不高或纯小包业务的应用,若采用室内覆盖,为了保持业务的稳定性,可以只采用预调度参数策略。

c) 基础覆盖是基础,为了达到更好的SLA,应尽量采用室分覆盖。在条件不允许而必须采用宏站覆盖的情况下,也要通过覆盖调优的方式提高SINR值。

## 4 结束语

5G+工业互联网应用中存在PLC控制、工业监控、AGV小车等对时延及其稳定性要求高的业务,属于3GPP定义的uRLLC的典型应用。为改善这些行业应用的端到端时延,助力uRLLC时延敏感型业务拓展,针对SA网络端到端时延定界方法、优化手段进行研究。在5G定制网时延敏感优化项目中,通过预调度参数、IBLER目标值、SR周期等参数调整,结合室内外近点和中点等场景的应用,对大包、小包的平均时延和最大时延分别进行验证和分析,提出一套改善空口侧时延的场景化参数优化方案,在兼顾toB用户感知的同时保障toC用户的时延指标,对5G+工业互联网应用的保障具有重要的参考价值。

## 参考文献:

- [1] 华为技术有限公司. 5G RAN QoS管理特性参数描述[S]. 深圳:华为技术有限公司,2023.
- [2] 华为技术有限公司. 5G RAN 上行调度特性参数描述[S]. 深圳:华为技术有限公司,2024.
- [3] 华为技术有限公司. 5G RAN uRLLC特性参数描述[S]. 深圳:华为技术有限公司,2024.
- [4] 华为技术有限公司. 5G RAN 信道管理特性参数描述[S]. 深圳:华为技术有限公司,2024.
- [5] 华为技术有限公司. 5G网络时延设计[R]. 深圳:华为技术有限公司,2020.
- [6] 张达鑫,王东军,张达瑞. 基于5G+工业互联网的天车远程控制[J]. 邮电设计技术,2021(7):78-83.
- [7] 程景浩,王燕伟,徐滨阳. 5G+工业互联网在大型石化项目中的应用实践[J]. 邮电设计技术,2021(7):40-44.

### 作者简介:

欧阳晖,工程师,硕士,主要从事5G无线网络优化工作。

