

智慧工厂 RedCap 网络时延容量 方案研究

Research on RedCap Network Delay and Capacity Solution for Smart Factory

吕爽¹,何明¹,韩纬禧¹,叶萧²(1. 中国联通广东分公司,广东广州 510627;2. 中讯邮电咨询设计院有限公司广东分公司,广东广州 510627)

Lü Shuang¹,He Ming¹,Han Weixi¹,Ye Xiao²(1. China Unicom Guangdong Branch, Guangzhou 510627, China; 2. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd. Guangdong Branch, Guangzhou 510627, China)

摘要:

RedCap 作为 5G 轻量级物联网技术,在保证性能的基础上削减终端能力而降低成本。针对智慧工厂 RedCap 终端时延较大的问题,通过端网测试分析,提出存在 NR 背景用户下 RedCap 时延问题的解决方案。同时在厂区部署摄像头开展监控业务,通过压力测试分析不同 BWP 个数下的业务承载能力,提出在智慧工厂部署 RedCap 网络的扩容建议方案。

关键词:

5G; RedCap; 智慧工厂; 时延; 容量

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2025.12.010

文章编号: 1007-3043(2025)12-0053-06

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:

As a 5G lightweight IoT technology, RedCap reduces terminal capabilities and costs while ensuring performance. Aiming at the problem of large RedCap terminal delay in smart factories, it proposes a solution to the RedCap delay problem in the presence of NR background users through terminal network test analysis. At the same time, cameras are deployed in the factory area for monitoring services, and the business carrying capacities under different numbers of BWPs are analyzed through stress testing, and a recommended expansion plan for deploying RedCap network in the smart factory is proposed.

Keywords:

5G; RedCap; Smart factory; Delay; Capacity

引用格式: 吕爽,何明,韩纬禧,等. 智慧工厂 RedCap 网络时延容量方案研究[J]. 邮电设计技术, 2025(12): 53-58.

1 概述

随着移动网络的快速发展,移动物联网已逐步进入 5G 时代。5G 网络的 RedCap 技术^[1]在带宽能力和时延要求层面可以对标 4G-CAT4 技术,并且继承了 5G 的原生能力,支持 uRLLC、切片等垂直行业增强特性^[2]。RedCap 模组的价格相比 NR 终端低很多,预计将逐渐跟 4G 持平^[3-4]。

目前大多 RedCap 的研究主要集中在 RedCap 网络侧的部署策略。文献[5]分析了 RedCap 频段部署策略

的建议,即容量为主的业务优选 TDD 频段,覆盖为主的业务优选 FDD 频段,上行要求高的业务类型优选 FDD 频段;文献[6]给出了专用 BWP 的应用结论,当业务量小时,采用含 CD-SSB 的专用 BWP 资源,当业务量大时,采用一个含 CD-SSB 的专用 BWP 和多个不含 CD-SSB 的专用 BWP;文献[7]提出了增强 RedCap 覆盖能力及节能的技术方案,提出了 RedCap 四大覆盖增强手段和 2 种节能技术。

目前业内关于 RedCap 的部署研究大多是覆盖方面,对基于端网协同的时延、容量解决方案研究较少。本文将通过某工厂的 RedCap 试点成果来分析端网协同策略,提出在 NR 背景用户下 RedCap 时延、容量问

收稿日期: 2025-10-22

题的解决方案。

2 智慧工厂业务场景分类及要求

本章主要从工厂普遍的业务类型及其对应的网络要求进行介绍,同时介绍某工厂中所应用的业务类型及其对应的网络要求。

2.1 智慧工厂典型业务

随着 5G 网络的发展,工业场景实现人与物、物与物的万物互联,3GPP 标准中定义了智慧工厂场景的典型业务,包含数据采集、视频回传、自动化业务^[8]。3 种典型业务对网络的组网和性能要求如表 1 所示^[9-11]。

表 1 典型业务对网络的要求

场景	速率/(Mbit/s)	时延/ms	可靠性/%
数据采集	≤30(UL)	100	99.90
视频回传	2~4	500	99.99
工业控制	1~2	20~50	99.99

5G+数据采集是通过 5G 基站采集包含生产环境、设备数据、运行状态等相关的数据。采集的数据上传至生产 MES 系统或设备管理系统,可以及时了解设备的运行状态,实现对生产过程、设备管理的监控和实时分析处理,进而支持生产参数调整、设备的预测性维护和故障定位等能力。通过 5G 联网,还可以实现产线设备的灵活调整,提高生产效率。数据采集业务工作流程示意如图 1 所示^[12]。

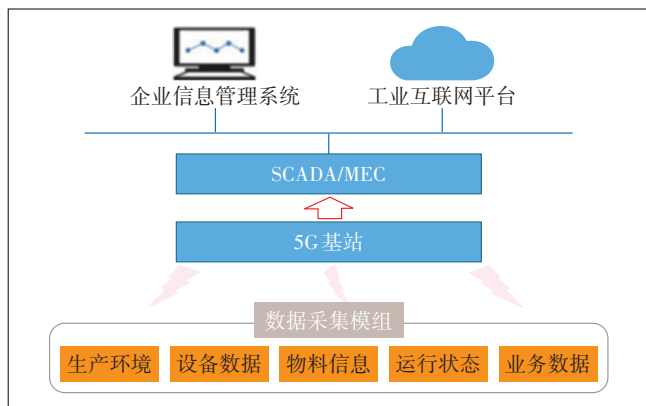


图 1 数据采集业务工作流程示意

5G+视频回传主要涉及园区及车间的安防视频监控和产线工人日常作业规范监控的场景。园区及车间的安防监控包含了固定摄像头监控、机器人移动巡检等应用。产线工人日常作业规范监控是指利用 5G 将产线监控视频回传到 AI 平台,对整装生产线、半成

品生产线关键岗位员工作业行为进行智能分析,如动作是否标准、步骤是否缺失、动作是否超时等,加强对关键岗位作业规范的管控,从而提升产品的合格率及流程的不断优化改进^[13]。

5G+工业控制业务是利用 5G 网络实现控制器之间,控制器与厂内系统间的数据传输,因此 PLC 数据传输分为 PLC 北向传输和 PLC 南向传输。PLC 北向连接 MES/SCADA 层,将具体的设备数据通过 5G 网络传输至大数据平台,对数据进行挖掘分析,助力工业企业对工艺、产能、能耗的优化。PLC 南向连接 PLC 控制驱动的各类执行设备,可以统一驱动设备运行,对工厂设备进行管理^[14]。

2.2 某工厂业务类型

2020 年某省联通与某工厂签署 5G 全面战略合作,近期在该工厂实现了 5G+RedCap 网络深度覆盖,在厂区部署了多条 RedCap 产线,产线 MES 终端通过 RedCap DTU 终端接入中国联通 5G 专网。

该智能工厂使用市场上较为成熟的 RedCap 终端完成部分业务场景作业,主要开展数据采集类和视频采集类业务,不同的数据采集和视频采集类业务对网络的要求也存在差异。以该工厂为例,数据采集业务分为打卡、打标签纸等简单数采业务和 SMT 贴片机等复杂数采业务,对应的网络指标如表 2 所示。

表 2 某工厂业务对网络的要求

场景	速率/(Mbit/s)	时延/ms	可靠性/%
打卡/标签业务	2~3	50~100	99.90
SMT 贴片机一拖 8 业务	2~3	≤30	99.90
摄像头	3	≤30	99.90

3 智慧工厂 RedCap 网络时延方案研究

本章首先对某工厂网络部署情况进行介绍,列举该工厂存在的 RedCap 时延问题,针对时延问题展开分析讨论,最终提出了聚焦该工厂时延问题的解决方案,并对解决方案进行了验证。

3.1 某工厂网络概况

该工厂的网络点位分布如图 2 所示,共配置了 2 个小区,小区 1 为图 2 中蓝色边框区域,其包含 C 端 5G 背景用户 70 个左右,且配置了 2 个 BWP;小区 2 为图 2 中红色边框区域,其包含 C 端 5G 背景用户 130 个左右且配置了 1 个 BWP。2 个小区的 PRB 利用率均为 20%~30%,并且均开了 2 个 TRP。

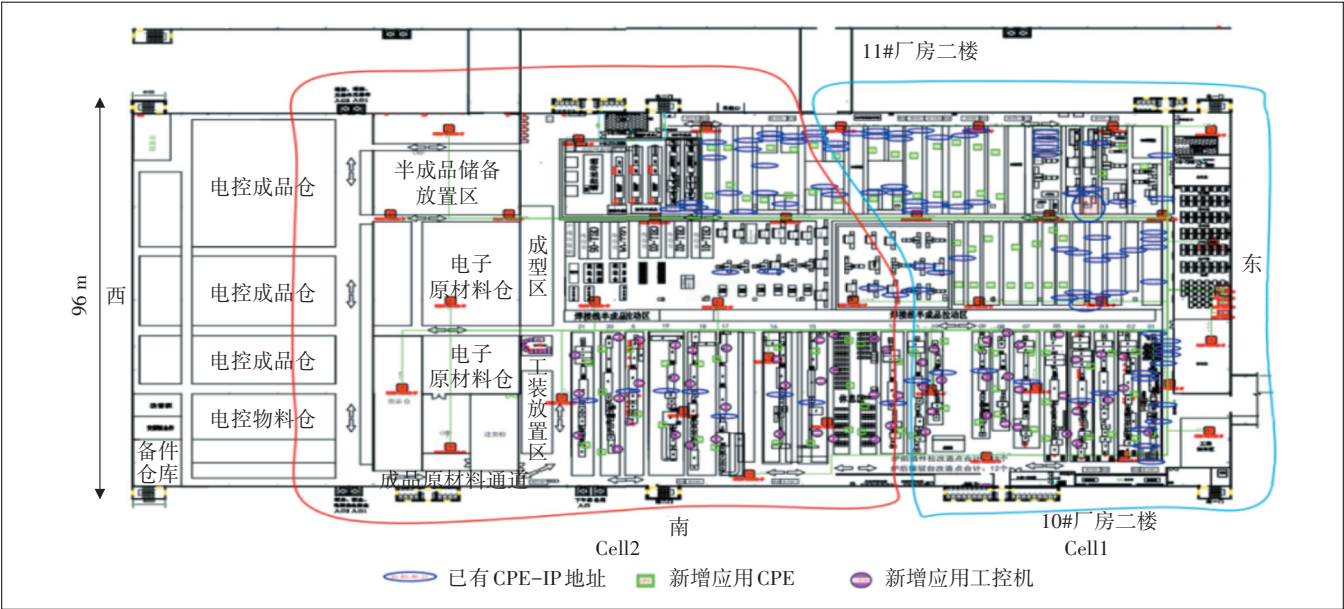


图2 某工厂点位分布

3.2 某工厂业务时延问题

标签打印机于 11:21 和 11:33 左右发生丢包且 Ping 32 B 的平均时延达 39 ms;SMT 贴片机出现大时延现象,11:58:50 左右时延为 70 ms,11:59:12 左右时延为 103 ms,12:00:50 左右时延为 69 ms,12:03:55 左右时延为 71 ms;人员打卡工位也出现大时延现象,具体如表 3 所示。

表3 时延问题统计

序号	工序名称	终端 IMSI	TraceID	Ping 32 B 包平均时延/ms	时延异常现象
1	打标签纸工位	460064363368902	46006•368902	39	11:21、11:33 出现丢包
2	SMT 一拖 8 工位	460064363368896	46006•368896	36	11:58:50 左右时延为 70 ms,11:59:12 左右时延为 103 ms,12:00:50 左右时延为 69 ms,12:03:55 左右时延为 71 ms
3	人员打卡工位	460064363368991	46006•368991	34	15:17 左右时延为 139 ms,15:23 左右时延为 70 ms;15:27:54 时延为 111 ms;15:29 左右时延为 200 ms

3.3 某工厂时延问题分析

针对 SMT 贴片机(位于小区 1),本文做了端到端以及以 RedCap 终端、基站为分段点的时延测试,具体如图 3 所示。

分别以分段点设备作为时延的采样设备,并通过作差的方式,得到端到端以及分段 1、分段 2、分段 3 的

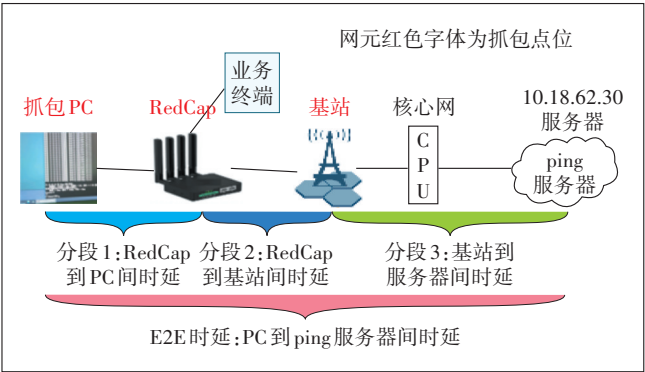


图3 时延测试分段示意

时延数据。从端到端时延来看,平均时延为 40 ms,偶尔存在高于 60 ms 的时延;从分段 1(抓包 PC 到 RedCap 间时延)来看,92% 的样本点时延在 1 ms 以下,但是也存在波动,本次抓包最大时延可以达到 25 ms;从分段 2(基站到 RedCap)来看,平均时延为 30 ms,其中 40 ms 占比为 28%;从分段 3(基站到服务器)来看,97% 的时延都低于 5 ms,约 1.6% 的时延会突发高于 10 ms。

根据测试结果,端到端的时延较高,平均时延达 40 ms。通过分析,发现当前网络未开启 QCI 级预调度导致上行调度只能走 SR 调度,而 SR 周期为 40 ms,导致空口时延偏大,同时也未针对时延用户开启高可靠低时延特性,最终导致 E2E 时延整体偏高。针对这种情况,建议网络打开高可靠低时延特性的配置,将 SR 调度更换为 QCI 级预调度,能在一定程度上保障时延。

针对端到端时延较大的某一时刻来分析,在 12:

03:54时延突增到71 ms。分别统计3段时延,发现主要是PC到RedCap的时延突增到24 ms,而基站到RedCap时延为42 ms,无明显变化,基站之上时延为3.9 ms,也未偏离均值。另一个端到端时延较大的时刻为11:59:11,终端ping时延超过100 ms,发现基站内部对包ping Request报文是在空口699/18处开始调度的,这之前在空口处689/14调度失败。对比调度发现前后调度间隔超过100 ms(689/14→699/18)。观察调度RB位置,终端RB位于首个BWP,首个BWP在调度时刻资源不足,导致CCE资源分配失败。

3.4 某工厂时延问题解决方案

某工厂的网络配置暂未达到性能最优,对目前的配置进行观察,每个小区只配置了2个TRP,因此将每个小区的TRP个数配置为8个,可以提高业务处理的速率;并打开上行MU,增强上行能力;打开256QAM,实现较高的频谱利用效率。

该工厂的RedCap终端应用和其他终端应用配置了一致的QCI,这导致网络处理工厂的各种应用都采取相同的策略,很大程度造成了RedCap终端的时延问题。基于此,优化团队打开了基于5QI的业务差异化低时延特性、低时延高可靠特性并优化了控制信道PDCCH资源。

对于5QI的业务差异化低时延特性,对PDCP层配置进行了优化(打开PDCP乱序递交),即当包出现乱序时,不进行PDCP重排序,直接递交数据包给上层处理,从而减少由于乱序导致的时延。同时打开了基于QCI的上行精准预调度,这就代表不论UE是否向基站发送SR,每隔一段时间基站都会主动调度一次UE,以减少从UE发送SR到获得上行调度授权的时间。除此

之外,还打开了基于QCI的上、下行IBLER(Initial Block Error Rate)目标值调度,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。

打开低时延高可靠特性开关,给RedCap终端应用配置了独立资源预留,可以有效保障高可靠业务数据资源。同时打开OLLA算法优化和PDCCH IBLER目标值优化来降低误块率,降低时延。

针对控制信道PDCCH的优化(CCE优化)是增加CCE的可用资源,通过抬高低时延用户的CCE初始聚合级别盲检次数,以降低PDCCH信道漏检概率,降低时延。汇总解决方案如表4所示。

表4 针对时延问题的前后对比方案

解决方案	原配置	本文建议配置
上行调度模式	SR调度	QCI级预调度
TRP配置	2	8
调制方式	64QAM	256QAM
上行MU	未开	打开
QCI	9	6
低时延高可靠特性	无	独立资源预留
CCE优化	无	增加CCE可用资源

3.5 某工厂时延问题解决效果

通过调整某工厂的网络配置,使用业务高优先级的5QI,打开低时延高可靠特性开关,并针对控制信道PDCCH进行优化后,该工厂RedCap应用的时延问题得到了根本性的改善。如图4所示,端到端平均时延从原来的40 ms降低到13.6 ms,相对优化前改善了26.4 ms。对网络链路进行分段统计,分段1(抓包PC

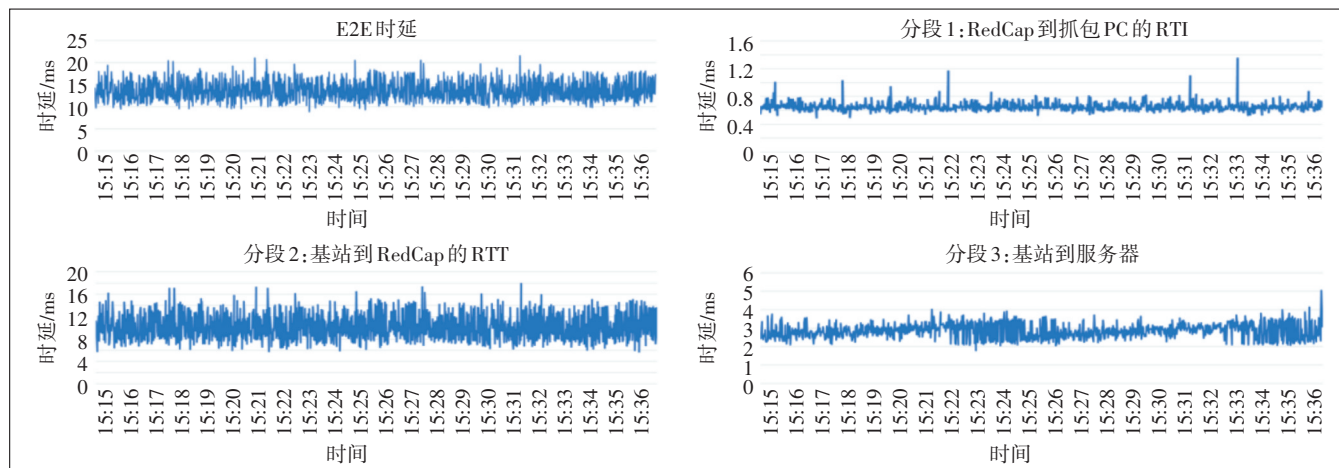


图4 端到端及分段时延复测结果

到 RedCap 间)时延都在 1.2 ms 以下;分段 2(基站到 RedCap)平均时延为 10 ms;分段 3(基站到服务器)整体时延都在 5 ms 以下。

4 智慧工厂 RedCap 网络容量方案研究

本章首先描述了在智慧工厂部署 RedCap 摄像头终端的测试方案,通过测试验证不同 BWP 对摄像头业务所具备的承载能力,并给出扩容建议。

4.1 容量测试方案

在优化后的某工厂场景下,为测试网络对 RedCap 终端大数据量业务的承载能力,特通过布设多个摄像头来进行现网压力测试。小区小时级话统显示,平均 1 台 RedCap 摄像头上行速率为 2.5 Mbit/s,考虑到存在秒级波动,因此摄像头配置按照 3 Mbit/s 的速率作为业务要求。单个摄像头上行 RLC 吞吐率如图 5 所示。

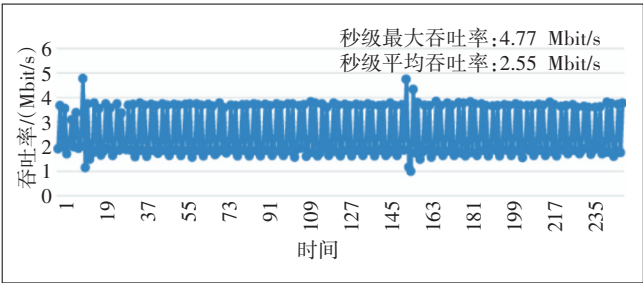


图5 单个摄像头上行 RLC 吞吐率

在测试小区内共配置了 18 个 RedCap 摄像头,18 个摄像头根据近、中、远点进行划分,近、中、远点的划分标准如表 5 所示。依据此标准,共有 7 个摄像头位于近点,8 个摄像头位于中点,3 个摄像头位于远点。根据上述数量分布,采用依次开启摄像头的方式,每 15 min 开启 1 台,采用中、近、远点的顺序,依次开启摄像头,当某一视频出现卡顿,在累计添加 2~3 个终端

表5 近中远点的划分标准

宏站(室外)5G toB	NR SSB SINR/dB	NR SSB RSRP/dBm	NR SSB SINR 典型值/dB	NR SSB RSRP 典型值/dBm
近点	>20	>-75	25	-70
中点	10~20	-85~-75	15	-80
远点	0~10	-95~-85	5	-90

后,停止测试并记录视频卡顿的具体终端。测试采用的业务模型为上传 1080P 的监控视频(见表 6)。

表6 业务模型

业务场景	业务模型	分辨率	典型帧率	速率(H.264)	速率(H.265)	考虑帧碰撞(1.5倍)
固定摄像头业务	实时回传/传图片/录像	1080P	25	2~4	2	3

4.2 容量测试结论

开启 1 个 BWP 进行压力测试。为模拟现实加扰场景,研发人员在频域加了 20 dB 干扰后进行测试,测试结果如表 7 所示。

依次开启 5 个摄像头,均未出现卡顿现象;在加入第 6 个和第 7 个摄像头后,所有开启的远端摄像头都出现了卡顿现象。因此在开启 1 个 BWP 并传输 3 Mbit/s 的大包业务时,部署终端数应不超过 5 个,若超过 5 个,则尽量确保它们都部署在近点和中点,避免部署在远点。

开启 2 个 BWP 进行压力测试。研发人员同样在上行频域加扰 20 dB 后进行测试,测试结果如表 8 所示。

目前的 RedCap 版本中,只能在 2 个 BWP 中轮流部署,不能选择部署任一 BWP,因此为了测试 BWP2 的部署能力,我们采用前 3 个部署在 BWP1 上的终端只接入不做业务,最终使得 BWP1 共 4 个做业务的终端、BWP2 共 6 个做业务的终端时,这 10 个摄像头都未

表7 开启 1 个 BWP 的测试结果

终端数量/ 终端添加 顺序	25 号杆-1 (中)	22 号杆- (近)	测试摄像 头(远)	23 号杆- 2(中)	22 号杆- 1(近)	24 号杆-1 (远)	23 号杆- 1(中)	RedCap 小 区吞吐率/ (Mbit/s)	RedCap 平 均用户体验速 率/(Mbit/s)	小区平均 用户数	RedCap 上行 PRB 利用率/%	上行干 扰/dBm
2 个								4.5	2.3	81	28.9	-100
4 个								10.4	2.6	71	55.1	-97
6 个			卡顿			卡顿		13.9	2.3	85	66.2	-98
5 个								16.5	3.3	80	68.9	-100
5 个								15.7	3.1	79	70.3	-100
6 个			轻微卡顿			卡顿		15.3	2.6	83	67.1	-101
7 个			卡顿			卡顿		16.4	2.3	85	68.1	-101

表8 开启2个BWP的测试结果

终端数量/终端添加顺序	DTU-736x (低BWP)	23号杆-1(中)(顶BWP)	DTU-734x (低BWP)	21号球机(近)(顶BWP)	DTU-732x (低BWP)	24号杆-2(远)(顶BWP)	25号杆-1(中)(顶BWP)	18号杆-2(中)(顶BWP)	22号杆-2(中)(顶BWP)	21号杆-2(近)(顶BWP)	24号杆-1(远)(低BWP)	测试摄像头(远)(顶BWP)	23号杆-2(中)(低BWP)	19号杆-球(中)(顶BWP)	18号杆-1(远)(低BWP)	小区吞吐率/(Mbit/s)	RedCap平均用户体验速率/(Mbit/s)	小区平均用户数	上行干扰/dBm	Red-Cap上行PRB利用率/%
3DTU+6个	不做业务		不做业务		不做业务											13.6	2.3	86	-98	48.4
3DTU+8个	不做业务		不做业务		不做业务											16.5	2.1	84	-98	50.3
3DTU+10个	不做业务		不做业务		不做业务											23.3	2.3	90	-101	62.9
3DTU+11个	不做业务		不做业务		不做业务						轻微卡顿	轻微卡顿	轻微卡顿			28.3	2.6	87	-102	68.5
3DTU+12个	不做业务		不做业务		不做业务						轻微卡顿	轻微卡顿	卡顿			26.4	2.2	85	-102	65.6
3DTU+12个	不做业务		不做业务		不做业务						轻微卡顿	轻微卡顿	卡顿			24.2	2.0	71	-104	63.6

出现卡顿现象。当第11个终端部署至BWP2后,出现轻微卡顿。因此当开启2个BWP时,可以支撑11个做3 Mbit/s的大包业务的终端平稳运行。

4.3 RedCap扩容建议方案

测试中RedCap摄像头选择传输1080P的视频业务,这种业务的平均速率为3 Mbit/s,相当于如果使用RedCap终端传输3 Mbit/s左右的大包业务时,可参考本文的扩容建议。若传输的业务模型和本文差异较小,可参考本文建议适当增减终端个数。

5 结束语

本文针对智慧工厂RedCap网络时延问题进行端网测试,通过端到端时延分析,提出在NR背景用户下RedCap时延问题的解决方案;同时在厂区部署摄像头开展监控业务,通过压力测试,来讨论不同BWP个数下的业务承载能力,并提出RedCap扩容建议方案。

当前阶段RedCap的成熟终端还较少,工厂内大多数产线还使用NR终端进行作业。在终端成熟之前,探索RedCap端网协同部署策略对后续应用具备较强的指导意义^[15]。

参考文献:

- [1] 王璐璐,曹亘,韩潇,等. 5G RedCap 关键技术研究[J]. 邮电设计技术,2023(3):10-14.
- [2] 王鹏宇,杨缙峰. 5G 蜂窝物联网的大规模接入技术分析[J]. 现代工业经济和信息化,2021,11(11):128-129,136.
- [3] 张翀,汪传武. 5G 物联网技术标准演进研究[J]. 广播电视网络,

2022,29(3):54-56.

- [4] 魏鸿斌,徐舒. 5G NR RedCap 技术简述及应用前景[J]. 数据通信,2022(5):50-51,54.
- [5] 李常国,毕研涛. 5G RedCap 应用场景及网络技术研究[J]. 山东通信技术,2023,43(3):7-12.
- [6] 曹恒,尚海波,平军磊,等. RedCap 部署策略建议[J]. 邮电设计技术,2024(1):1-5.
- [7] 李宏辉,关成哲. NR RedCap 覆盖能力分析与增强技术[J]. 通信世界,2022(23):43-45.
- [8] 徐霞艳. NR RedCap UE 关键技术与标准化进展[J]. 移动通信,2021,45(3):10-15.
- [9] 中国联通. 中国联通 5G RedCap 白皮书(2022年)[R/OL]. [2025-06-05]. <https://www.digitalelite.cn/h-nd-6489.html>.
- [10] 中国移动通信有限公司研究院. 中国移动 5G RedCap 技术产业白皮书[R/OL]. [2025-06-02]. <https://13115299.s21i.faiusr.com/61/1/ABUIABA9GAAgmsPelQYoyfo-QM.pdf>.
- [11] 中国电信. 中国电信 5G RedCap 产业白皮书[R/OL]. [2025-06-02]. <https://www.docin.com/p-4707790021.html>.
- [12] 宋丹. R17 RedCap 完善 5G 终端中速物联网场景支持能力[J]. 通信世界,2022(12):9.
- [13] 池刚毅,钟莹,施春红. RedCap 技术应用及网络部署策略研究[J]. 电信工程技术与标准化,2023,36(10):45-51.
- [14] 朱晨鸣. 5G RedCap 技术发展与应用[J]. 通信世界,2023(15):10-11.
- [15] 种璟,唐小勇,朱磊,等. 5G 关键技术演进方向与行业发展趋势[J]. 电信科学,2022,38(5):124-135.

作者简介:

吕爽,工程师,学士,主要从事无线网络规划工作;何明,高级工程师,硕士,主要从事无线网络规划建设;韩伟禧,工程师,硕士,主要从事无线及宽带接入网络规划工作;叶萧,工程师,学士,主要从事无线网规划和设计工作。