



5G 确定性网络关键技术研究和应用

朱仕银^{1,2}, 杨坚², 孔磊^{1,3}

(1. 新华三技术有限公司, 浙江 杭州 310056;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

3. 浙江大学, 浙江 杭州 310058)

摘要: 5G 确定性网络是支撑5G+工业互联网建设的重要一环, 研究5G确定性网络的关键技术和落地方案具有重要意义。首先研究5G超高可靠低时延通信技术以及帧复制和消除技术, 以降低传输时延并提高可靠性, 其次在5G网络中探索循环队列转发技术, 以消除端到端抖动, 最后提出一种5G确定性网络落地方案, 并在实际工业生产实验室中进行试验。试验结果表明, 所提网络方案的综合性能优于现有网络方案, 可以满足众多工业场景对5G确定性网络的需求。

关键词: 5G 确定性网络; 超高可靠低时延通信; 循环队列转发; 帧复制和消除

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024154

5G deterministic network key technology research and application

ZHU Shiyin^{1,2}, YANG Jian², KONG Lei^{1,3}

1. H3C Technology Co., Ltd., Hangzhou 310056, China

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3. Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: 5G deterministic network is an important part to support the construction of 5G+ Industrial Internet, and it is of great significance to study the key technologies and landing schemes of 5G deterministic network. Firstly, 5G ultra-reliability low latency communication technology and frame replication and cancellation technology were studied to reduce transmission latency and improve reliability. Secondly, cyclic queue forwarding technology was explored in 5G networks to eliminate end-to-end jitter. Finally, a 5G deterministic network landing scheme was proposed and tested in actual industrial production labs. The test results show that the comprehensive performance of the proposed network scheme is better than the existing network schemes, and can meet the demand for 5G deterministic networks in many industrial scenarios.

Key words: 5G deterministic network, URLLC, CSQF, FRER

0 引言

当前, 5G 移动通信技术的发展已经进入下半场, 从 toC 开始向 toB 迈进, 以融入千行百业。2021 年, 工业和信息化部 (以下简称工信部) 明确提出了加快利用 5G 改造工业内网, 打造 5G 全连接工厂标杆, 以及推动“5G+工业互联网”服务于生产核心环节^[1]。2022 年 9 月, 工信部进一步支持企业建设不同类型 5G 全连接工厂, 面向制造业、采矿、港口、电力等重点行业领域, 推动 5G 融合应用纵深发展^[2]。2023 年 11 月, 工信部正式发布《2023 年 5G 工厂名录》, 展示当前 5G+工业互联网的发展成果^[3]。

5G 确定性网络 (5G deterministic network, 5GDN) 是支撑 5G+工业互联网建设的重要一环, 其目的是在 5G 网络中引入确定性网络技术后, 利用 5G 网络资源打造具有低时延、低抖动、高可靠的确定性传输能力的传输专网^[4-6]。2018 年 6 月, 第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 发布的 5G 新空口 (5G new radio, 5G NR) 第一版 Rel-15 中通过超高可靠低时延通信 (ultra-reliability low latency communication, URLLC) 技术, 并在随后的 Rel-16 和 Rel-17 版本中对 URLLC 技术进一步增强, 以在 5G 空口支撑确定性业务^[7-8]。为了支持 5G 端到端确定性服务, 3GPP 在 Rel-16 中制定了 5G 与时延敏感网络 (time-sensitive networking, TSN) 融合的相关标准, 并在 Rel-17 和 Rel-18 中进一步增强, 以支持低时延、低抖动、高可用性和高可靠性的 5G 确定性通信^[9]。

此外, 文献[10-12]讨论了 5G TSN 的标准演进、典型业务场景和需求、网络架构、关键技术、挑战和发展趋势等。Gundall 等人^[13]介绍了一个由工业设备组成的离散制造测试平台, 以评估 5G TSN 系统。从 5G 空口的角度, 文献[14]对 5G TSN 系统中空口 URLLC 不同调度策略的性能

进行了全面系统的评估, 提出了下行时延敏感通信 (time-sensitive communication, TSC) 流量的资源分配策略和密集室内蜂窝网络中的调度方案。文献[15]提出了一种端边协同的时延确定性保障技术方案, 实现业务流级跨域时延保障。

当前, 虽然 5G TSN 融合的标准已经制定, 但是 5G TSN 整体还处于成长期, 产业界尤其是传统运营技术 (operational technology, OT) 厂商和用户终端 (user equipment, UE) 对于 TSN 的支持还不够, 5G TSN 的融合和发展还有很长的路要走。本文将从 5G 端到端确定性传输的角度, 在研究 5G 确定性网络的关键技术的基础上, 提出一种 5G 确定性网络落地方案。具体来说, 首先分析 URLLC 关键技术来保证空口低时延高可靠通信, 研究帧复制和消除 (frame replication and elimination for reliability, FRER) 技术 (也称双发选收) 来保证端到端传输的可靠性, 然后探索循环队列转发 (cyclic specified queuing and forwarding, CSQF) 技术来消除 5G 端到端抖动, 最后, 综合以上研究结果提出一种 5G 确定性网络落地方案, 并在实际工业生产实验室进行了验证。结果表明该方案在保证时延满足工业生产的前提下, 可靠性和抖动等性能比现网方案都有明显改善, 可以满足众多工业场景对于 5G 确定性网络的需求。

1 5G 确定性网络现状

1.1 5G 确定性网络场景、需求

当前, 行业数字化要求差异化、专属和可定制的 5G 网络, 这也是 5G 网络能够服务于千行百业的关键。所以, 5G 确定性网络与工业、能源、医疗、车联网、多媒体等领域的融合具有广阔的前景。

在工业互联网领域, 如智能工厂、矿山、港口等, 5G 确定性网络可以用于其整个工业流程, 包括研发、生产、仓储物流等全生命周期环



节^[16]。以生产中最典型的远程控制为例,其对可靠性的要求在99.999%以上,时延要求为10~100 ms,抖动要求在2 ms以内。

典型的能源场景,如电力领域,其控制区业务主要包括配网差动保护、配电自动化、精准负载控制、分布式能源调控等^[17]。以典型的配网差动保护为例,其通信速率要求为2.36 Mbit/s,对网络时延要求小于15 ms,而可靠性要求为99.99%,对于抖动,要求在保证可靠性的情况下,抖动越小越好。

车联网和医疗也是5G确定性网络的典型应用场景。在车联网中,车辆远程遥控驾驶、协同驾驶、车辆编队中的安全操控是关键一环,不同业务场景对于5G网络的要求不同,对时延的要求为10~100 ms、可靠性要求普遍为99.9%~99.999%,通信速率要求在10 Mbit/s以上^[18]。在未来医疗中,5G网络可以赋能远程手术、远程诊断、医疗监控等业务,以远程内窥镜为例,通信速率要求至少达到12 Mbit/s,时延小于35 ms^[19]。

典型场景对5G确定性网络的技术要求见表1。

1.2 5G确定性网络技术现状

2018年6月,3GPP发布的Rel-15中通过引入灵活参数集、微时隙(mini-slot)、低频谱效率调制编码方案(modulation coding scheme-low spectral efficiency, MCS-LowSE)、时隙聚合、免授权调度(configured grant, CG)、下行抢占调度等技术初步支持URLLC业务。随后在Rel-16和Rel-17中继续为URLLC增强接入网和核心网的设计^[7-8]。

为了满足工业互联网中确定性业务低时延、高可靠、低抖动的需求,3GPP Rel-16中首次将5G与TSN相融合,并在Rel-17和Rel-18中进一步增强^[9]。Rel-17中5G TSN集成端到端网络架构如图1所示,其通过网络侧TSN转换器(network-side TSN translator, NW-TT)和终端侧TSN转换器(device-side TSN translator, DS-TT)支持广义时钟同步协议(generalized precision

表1 典型场景对5G确定性网络的技术要求

业务场景	典型业务	上下行速率/(Mbit·s ⁻¹)	时延/ms	可靠性	抖动/ms
工业互联网	远程操控	上行: 10~20 下行: 1	30 10~100	99.999%	2
智能电网	差动保护	2.36	15	99.99%	—
自动驾驶类	矿卡自动驾驶	≥10	10~100	99.9%~99.999%	—
无线医疗	远程内窥镜	12	35	—	—

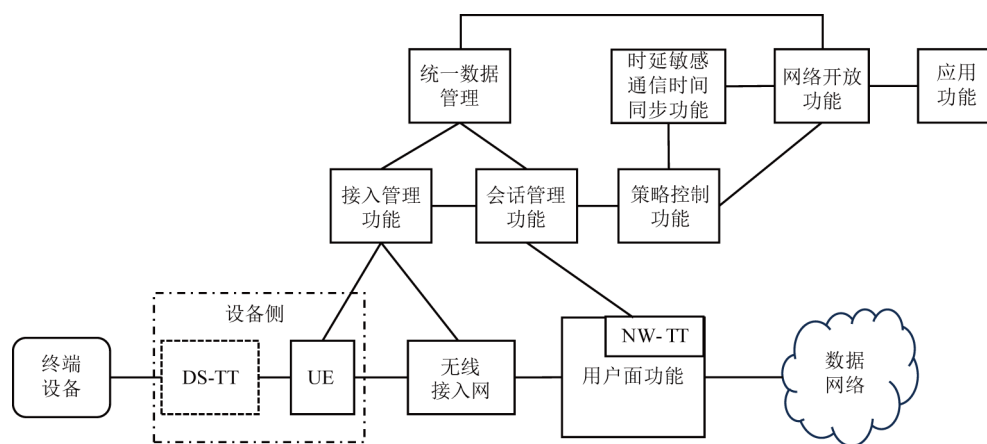


图1 Rel-17中5G TSN集成端到端网络架构

time protocol, gPTP) 完成 TSN 和 5G 之间的端到端同步, 使 5G 基站 (next generation node base station, gNB) 能够利用时延敏感通信辅助信息 (time sensitive communication association information, TSCAI), 合理配置上行免授权、半持续调度、预调度等的周期, 使得空口资源调度能够更有效地匹配业务流特征, 从而降低业务流的等待时延, 提升无线调度效率。同时, 5G TSN 还定义了桥管理、端口管理等功能来完成整个 5G TSN 的配置。总之, 3GPP 通过引入 5G 与 TSN 的融合, 可以很好地支持端到端的确定性业务。

然而, TSN 在当前工业生产领域中并未广泛部署, 产业界尤其是传统 OT 厂商对于 TSN 的支持才刚刚起步, 5G TSN 的标准落地还有很长的路要走。

2 5G 确定性网络落地方案

本节在充分研究 5G URLLC、FRER、CSQF 等技术的基础上, 将以上技术融合, 提出一种 5G 端到端确定性网络的整体技术方案, 实现低时延、高可靠、低抖动的确定性传输。

2.1 总体技术方案

5G 确定性网络整体架构如图 2 所示, 其中, 5G 系统利用 DS 时隙配比、上下行预调度、无线链路层控制协议 (radio link control, RLC) 非确认模式 (unacknowledged mode, UM)、高物理下行控制信道 (physical downlink control channel, PDCCH) 聚合等级、低调制编码方案、低阶多进多出 (multiple-in multiple-out, MIMO) 等技术满足低时延高可靠性要求。此外, 为了提高系统的可靠性, 采用 FRER 技术在发送端的多业务路由器 (multi-service router, MSR) 进行复制, 通过两条空口链路进行传输后, 在接收端 MSR 进行去重, 从而保证整个系统的可靠性。在整体方案中, 把 5G 系统 (5G system, 5GS) 看成一个透明桥, 利用 H3C 路由器 MSR 来模拟 5G TSN 系统中的 DS-TT 和 NW-TT, 并将其抽象为 2 个 CSQF 节点, 二者无须实现精准时钟同步, 而是利用 MSR 设备中的 CPU 进行频率同步, 保持映射周期有效性, 使得数据在指定的周期进行发送和接收, 降低系统整体的抖动。

2.2 5G 空口关键技术

在 5G 空口中, 采用 DS 帧结构、免授权调

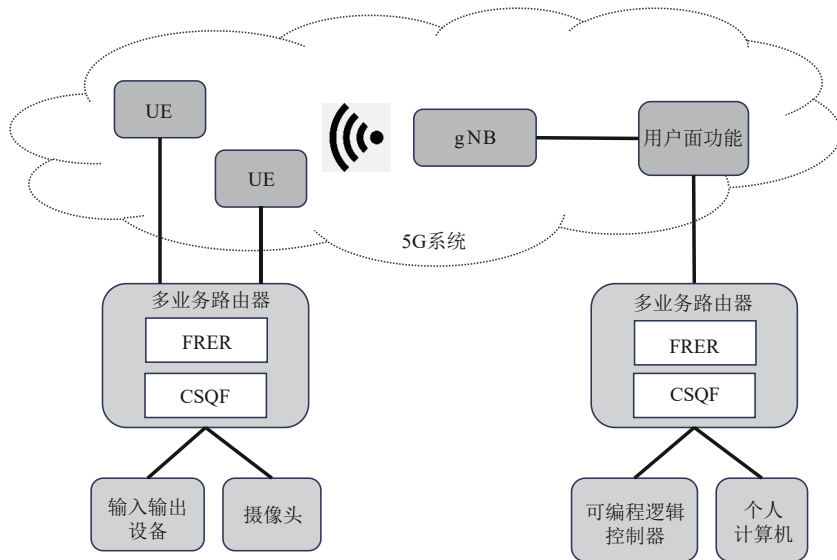


图2 5G确定性网络整体架构



度、RLC UM、分组数据汇聚协议 (packet data convergence protocol, PDCP) 乱序递交等技术来降低空口时延。与当前商用的帧结构相比, DS 帧结构由于上下行配比为 1:1, 可以大大降低上行空口调度等待时延。2.5 ms 单周期帧结构空口平均调度等待时延见表 2, DS 帧结构空口平均调度等待时延见表 3, 从表 2 和表 3 中可以看出使用 DS 帧结构可以大大降低空口平均调度等待时延, 尤其是上行调度等待时延。

免授权调度和预调度技术是降低传输时延的关键技术。由于当前很多终端模组并不支持免授权调度技术, 在本方案中, 采用预调度技术来完成上行和下行的调度。在预调度中, 预先在 S 时隙中分配一定的上行传输资源给 UE, 在 D 时隙中为 UE 分配下行传输资源, 这样 UE 无须调度请求即可在所分配的资源内进行上下行数据传输, 从而降低空口时延。此外, 在空口传输过程中, 在空口物理层关闭混合自动重传请求 (hybrid automatic repeat request, HARQ) 重传, 在 RLC 层采用 UM, 在 PDCP 层开启乱序递交以降低重传、确认和重排序等操作造成的空口时延和抖动。

从空口可靠性角度, 较高的 PDCCH 聚合等级 (aggregation level, AL) 可以占用更多控制资源元素 (control channel element, CCE), 从而降

低控制信道的传输码率, 提高控制信道的传输可靠性。因此需要为 PDCCH 传输选择更高的 AL, 如 8 和 16。对于数据信道, 考虑实际确定性业务数据包大小, 在保证满足确定性数据速率的前提下, 采用低阶 MCS 和 Rank1 传输, 尽可能提高传输的可靠性。

综上所述, 以上空口关键技术共同保证空口的低时延和高可靠性。

2.3 FRER 技术

帧复制和消除 (FRER) 又称双发选收技术, 是 TSN 中在容忍链路和节点故障方面的主要解决方案^[20-21]。FRER 技术主要有两个机制: 其一, 在源节点上通过不同路径复制流, 即 TSN 说话者; 其二, 在中继节点或目标节点中消除每个流的副本数据包, 即 TSN 监听器。本文将 TSN 中的 FRER 技术引入 5G 确定性网络中。

5G 确定性网络中 FRER 技术的原理如图 3 所示, 整体上利用虚拟扩展局域网 (virtual extensible local area network, VxLAN) 隧道技术来实现 FRER 技术, 其中两端 MSR 作为上文中介绍的 TSN 说话者和监听器, 同时也作为 VxLAN 隧道的终节点, 负责 VxLAN 隧道的封装和解封装。在 5G 系统中使用同一个 5G 核心网, 用户面功能 (user plane function, UPF) 负责数据在 5G 系统

表 2 2.5 ms 单周期帧结构空口平均调度等待时延

帧结构	2.5 ms 单周期帧结构										平均时延
时隙	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
时隙类别	D	D	D	S	U	D	D	D	S	U	
下行时延	250	250	1 250	750	250	250	250	1 250	750	250	550
上行时延	1 750	1 250	750	250	2 250	1 750	1 250	750	250	2 250	1 250

表 3 DS 帧结构空口平均调度等待时延

帧结构	DS 帧结构										平均时延
时隙	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
时隙类别	D	S	D	S	D	S	D	S	D	S	
下行时延	750	250	750	250	750	250	750	250	750	250	500
上行时延	250	750	250	750	250	750	250	750	250	750	500

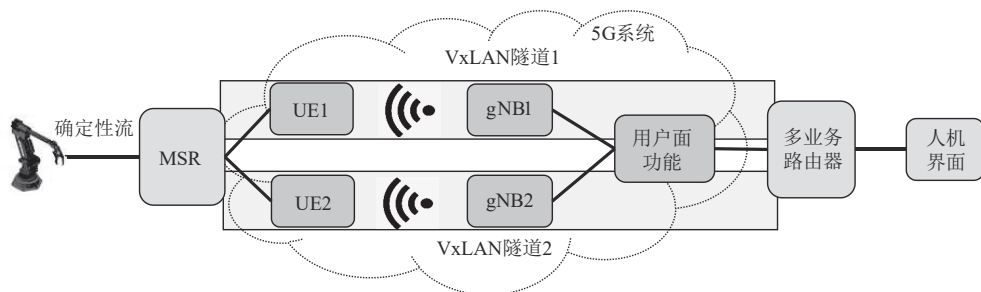


图3 5G确定性网络中FRER技术的原理

内部的转发。在接入网侧，为确定性流分配了两个不同空口路径（两个不同频段的基站和UE）来传输同一个确定性数据，从而保证数据的可靠性。

综上所述，通过VxLAN技术和两条空口链路共同实现5G确定性网络中的FRER技术，保证了5G确定性网络端到端的可靠性。

2.4 CSQF 消抖技术

把图2中的数据平面转发抽象，5GS作为TSN的桥系统结构抽象如图4所示，其中DS-TT和NW-TT抽象为TT1和TT2，实现TT两端的转发和消抖功能。把5GS单纯看成传输通道，消除TT与5GS之间的时钟依赖，从而简化实现。TT2与TSN之间保持时钟同步，建立一种机制，让TT1跟随TT2的转发调度，从而整体上实现确定性传输。

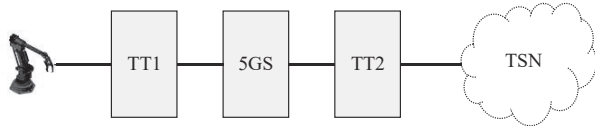


图4 5GS作为TSN的桥系统结构抽象

利用CSQF技术消除5G系统传输过程中存在的抖动，指定周期转发消除抖动示意图如图5所示，其中，把5GS抽象为线路，把其抖动看成上游节点UpNode（TT1或TT2）到下游节点DownNode（TT2或TT1）间的传输抖动。

借鉴CSQF的实现原理^[22]，在TT1和TT2上按固定时间划分周期，每个周期对应一个队列，

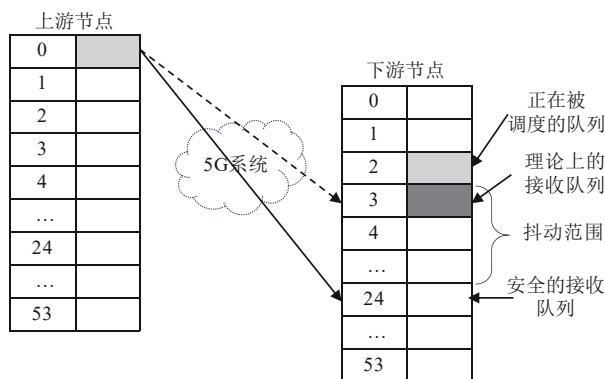


图5 指定周期转发消除抖动示意图

在节点上按周期轮转调度，每个周期内固定发送对应队列的数据包。建立TT1和TT2之间的周期映射关系，在TT1（或TT2）指定周期接收的数据包进入TT2（或TT1）指定的周期对应的队列，在TT2（TT1）对应的周期发送出去，从而实现消除TT1和TT2之间的5GS内产生的抖动。因为TT1和TT2之间的5GS抖动较大，时钟同步存在较大误差，需要对TT2与TT1的调度周期进行周期性维护，让UpNode与DownNode的映射关系始终有效且抖动保持在合理范围。在TT中建立TSN流到指定周期的逐流映射，实现TSN到TT的逐流调度转发。由于指定的业务在TT中确定周期进行转发，业务流量在确定的时间范围内到达TSN边缘节点，因此在TSN中通过相应配置可以实现端到端的有界时延和抖动。

以图3为例，TSN流（设备侧或网络侧）进入UpNode（TT1或TT2）的周期0对应队列，在UpNode的周期0被调度发出，穿过5GS到达DownNode时，若经过5GS经历了最小时延，



DownNode 中正在被调度的队列为周期 2 对应的队列, 但因为 5GS 内部有抖动, 假设抖动范围达到 22 个周期, 则 UpNode (TT1 或 TT2) 的周期 0 发出的队列, 被安排进入 DownNode 的周期 24, 当 DownNode 转发到周期 24 时, 队列报文应固定在 24 周期被发送出到 TSN (设备侧或网络侧), 这样 5GS 内部产生的抖动就被消除了, 实现了跨 5GS 透明桥的确定性时延传输。

3 实际测试结果

本文中的 5G 确定性网络方案在某企业工业生产实验室进行了验证, 分别测试了两个场景: 远程可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 和双机械臂协同, 并与实验室现网 (N78 频段) 结果进行了对比。

现场测试硬件设备和配置如下: 5G 核心网采用 H3C vUPF5100 设备, 集成核心网控制面软件 vSCN5100 与 UPF 数据面软件, 位于机房中。5G 接入网采用 N79 和 N41 两个频段 (各 100 Mbit/s 带宽) 以支持 FRER 功能, BBU 采用 BBU5100, 可以支持 2×4T4R 和 4×2T2R, 同样位于机房中。对于 RRU 设备, N79 频段采用 pRRU5214-A1, 支持 4T4R; N41 频段采用 pRRU5202, 支持 2T2R, RRU 设备通过电缆与 BBU 相连, 悬挂在实验室的墙壁上, 与机房相隔 5 m, 两台 RRU 之间间隔 2 m。对于 MSR 设备, 使用 MSR3610, 内部支持通过 PCIe 接口集成 2 个 5G 模组, 网络侧 MSR 设备位于机房, 用户侧

MSR 位于试验台上。RRU 设备与用户侧 MSR 间隔为 2~20 m。

现场试验中的, 5G 空口采用预调度技术, 关闭 HARQ 重传, 开启 RLC UM 和 PDCP 层乱序递交, 网络参数配置见表 4, 其中 CSQF 队列数设置为 150, 每个队列代表 100 μ s, 那么总计可以容忍 15 ms 的抖动。

表 4 网络参数配置

网络参数	参数值
帧结构	DS 帧结构
空口参数	PDCCH AL
	8
	MCS
	文献[23]的 MCS 表 1 中的 MCS0
	MIMO
	RANK1
CSQF 队列	150

作为对比, 现网仅支持单空口, 核心网和 BBU 采用相同的设备, 频带采用 N78 频段 (100 Mbit/s 带宽), RRU 采用 pRRU5202-B, 支持 2T2R。

3.1 远程 PLC 场景

远程 PLC 主要通过云化 PLC 实现远程控制, 其对 5G 网络性能可靠性要求在 99.99%~99.999%, 抖动要求在 1 ms 以内, 时延要求为低于 20 ms。远程 PLC 场景现场组网示意图如图 6 所示, 其中通过远程云化 PLC 控制器来控制实验室的 I/O 设备。

考虑到实际场景中会存在大量的背景流, 实际测试中背景流发包频率为 150 包/s, 包长为 256 byte, 确定性流发包频率为 50 包/s, 包长为

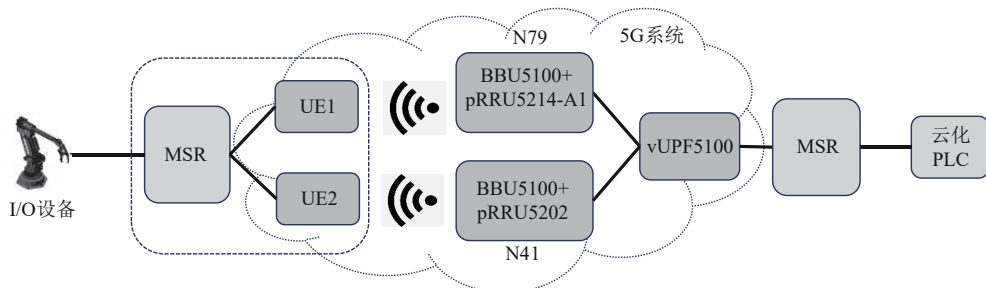


图 6 远程 PLC 场景现场组网示意图

82 byte。现网测试过程中持续 2.3 h，上行和下行分别发送 147 万包和 125 万包数据，远程 PLC 场景现网测试结果见表 5。

从表 5 可以看出，上行丢包 3 个，时延区间为 2.597~27.085 ms，最大时延为 27 ms，抖动约 24 ms，大于 15.64 ms 的包数为 325，平均时延为 4.491 ms；下行丢包 36 个，时延区间为 3.031~36.854 ms，最大时延为 36 ms，抖动约 33 ms，大于 15.64 ms 的包数为 8 个，平均时延为 4.966 ms。现网

中时延抖动非常大，而且存在一定程度的丢包。

5G 确定性网络的测试持续 8 h，上下行分别发送 433 万和 448 万个数据包，远程 PLC 场景 5G 确定性网络测试结果见表 6。从表 6 可以看出，上行 0 丢包，100% 的包时延区间在 8.509~8.956 ms，抖动为 0.447 ms，平均时延为 8.691 ms；下行 0 丢包，100% 的包时延区间在 11.652~12.193 ms，抖动为 0.541 ms，平均时延为 11.994 ms。与现网结果相比，5G 确定性网络利用空口

表 5 远程 PLC 场景现网测试结果

指标		N78 频段：背景流 150 包/s，包长为 256 byte			
		上行		下行	
		包数	百分比	包数	百分比
时延区间/ms	0~6.47	1 348 463	91.459%	1 247 768	99.615%
	6.48~10.40	32 643	2.214%	1 617	0.129%
	10.41~15.64	92 960	6.305%	3 197	0.255%
	315.65	325	0.022%	8	0.000 6%
总包数		1 474 391		1 252 610	
平均时延/ms		4.491		4.966	
最小时延/ms		2.597		3.031	
最大时延/ms		27.085		36.854	
抖动/ms		24.488		33.823	
丢包数/丢包率		3/0.000 2%		36/0.002 9%	

表 6 远程 PLC 场景 5G 确定性网络测试结果

指标		N79+N41 频段：确定性流 150 包/s，包长为 256 byte			
		上行		下行	
		包数	百分比	包数	百分比
时延区间/ms	0~8.16	0	0	0	0
	8.17~9.47	4 337 688	100%	0	0
	9.48~10.40	0	0	0	0
	10.41~11.79	1	0	16 750	0.373 7%
	11.8~12.27	0	0	4 465 437	99.626 3%
	312.28	0	0	0	0
总包数		4 337 689		4 482 187	
平均时延/ms		8.691		11.994	
最小时延/ms		8.509		11.652	
最大时延/ms		8.956		12.193	
抖动/ms		0.447		0.541	
丢包数/丢包率		0/0		0/0	



URLLC技术和FRER技术提升网络的可靠性,实现零丢包。从抖动的角度,上下行时延抖动降低到1 ms以内,提升了50倍以上。需要说明的是,抖动的消除是以牺牲时延特性来换取的,5G确定性网络的上下行平均时延分别为8.69 ms和11.99 ms。虽然时延有所升高,但仍然能满足实际场景20 ms的需求。

3.2 双机械臂协同场景

在双机械臂协同场景中,主机械臂向从机械臂发送控制指令,使主从机械臂能够实现协同操作,例如实现货物协同搬运等。该场景对5G网络性能与PLC场景相似,可靠性要求在99.99%~99.999%,抖动在1 ms以内,时延要求为低于20 ms。双机械臂协同场景组网示意图如图7所示,该场景由于双机械臂均通过5G网络进行通

信,所以需要经过两次5G空口传输。

首先,现网测试持续1 h,上下行各发送110万个数据包,发包频率为50包/s,包长为82 byte,总共测试6路数据,双机械臂协同场景现网测试结果见表7。从表7可以看出上行时延区间7.121~65.029 ms,丢包329个,丢包率为0.029 8%;下行时延区间为7.028~88.899 ms,丢包421个,丢包率为0.038 17%。从表7中可以看出,现网中丢包率和时延抖动等指标均无法满足实际的需求。

其次,在5G确定性网络中进行测试,测试持续2.3 h,上下行各发送230万个数据包,发包频率为50包/s,包长为82 byte,总共测试6路数据,双机械臂协同场景5G确定性网络测试结果见表8。DSTT1→DSTT2方向0丢包,时延区间为

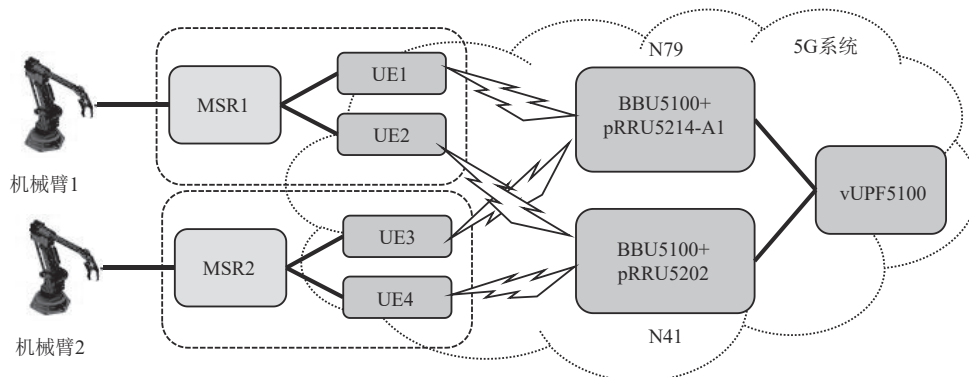


图7 双机械臂协同场景组网示意图

表7 双机械臂协同场景现网测试结果

指标		N78: (50 包/s, 包长 82 byte) ×6			
		机械臂→机械臂2		机械臂2→机械臂1	
		包数	百分比	包数	百分比
时延区间/ms	0~6.08	0	0	0	0
	6.09~11.32	378 118	34.28%	377 780	34.25%
	11.33~17.88	683 128	61.93%	683 796	62%
	17.89~24.43	41 351	3.75%	40 935	3.71%
	≥24.44	420	0.038%	416	0.04%
总包数		1 103 017		1 102 927	
最小时延/ms		7.121		7.028	
最大时延/ms		65.029		88.899	
抖动/ms		57.908		81.871	
丢包数/丢包率		329/0.029 8%		421/0.038 17%	

表 8 双机械臂协同场景 5G 确定性网络测试结果

指标		N79+N41 频段: (50 包/s, 包长为 82 byte)×6			
		机械臂 1→机械臂 2		机械臂 2→机械臂 1	
		包数	百分比	包数	百分比
时延区间/ms	0~16.50	0	0	0	0
	16.51~16.83	454 992	18.7%	1 989 019	81%
	16.84~17.16	1 977 545	81.3%	467 840	19%
	17.17~18.47	0	0	3	0
	≥18.48	0	0	0	0
总包数		2 432 537		2 456 862	
最小时延/ms		16.694		16.646	
最大时延/ms		17.041		17.052	
抖动/ms		0.347		0.406	
丢包数/丢包率		0/0		>0/0	

16.694~17.041 ms, 抖动在 0.347 ms 以内; DSTT2→DSTT1 方向 0 丢包, 除了 3 个较大时延包, 其余时延区间为 16.646~17.052 ms, 抖动在 0.406 ms 以内。与现网结果相比, 上下行均实现 0 丢包, 抖动提升了 100 倍以上, 双向时延为 20 ms, 单向为 10 ms, 足以满足双机械臂协同的需求。

4 结束语

本文重点介绍 5G 确定性网络的落地方案, 利用 DS 帧结构、预调度、高聚合等级、低阶 MCS 和低阶 MIMO 等空口 URLLC 技术来保证 5G 空口的低时延和高可靠通信。从端到端确定性的角度, 利用 CSQF 技术来消除 5G 确定性网络端到端抖动, 并使用 FRER 技术来提高可靠性。实际的测试结果表明, 本文所提供的 5G 确定性网络方案可以满足工业生产关键场景对 5G 网络的需求。在今后的工作中, 随着 5G TSN 技术的成熟, 可以通过 5G TSN 来替代 CSQF, 并与 FRER 和空口 URLLC 技术共同保证 5G 端到端确定性传输。

参考文献:

[1] 工业和信息化部, 中央网络安全和信息化委员会办公室, 国家发展和改革委员会, 等. 5G 应用“扬帆”行动计划(2021-2023 年)[Z]. 2021.

MIIT, CAC, NDCR, et al. 5G Application “Sail” Action Plan (2021-2023)[Z]. 2021.

[2] 工业和信息化部. 5G 全连接工厂建设指南[Z]. 2022. MIIT. 5G fully connected factory construction guide[Z]. 2022. .

[3] 工业和信息化部. 工业和信息化部办公厅关于印发《2023 年 5G 工厂名录》的通知[Z]. 2023. MIIT. Notice of the General Office of the Ministry of Industry and Information Technology (MIIT) on the Issuance of the 5G Factory Directory in 2023[Z]. 2023.

[4] 5G 确定性网络产业联盟. 5G 确定性网络产业白皮书[R]. 2020. 5G Deterministic Networking Industry Alliance. 5G deterministic networking industry white paper [R]. 2020.

[5] 信金灿, 许森, 张化, 等. 面向时间敏感网络的 5G 无线网增强技术研究[J]. 电信科学, 2022, 38(5): 18-26. XIN J C, XU S, ZHANG H, et al. Research on 5G wireless network enhancement techniques for time-sensitive networks[J]. Telecommunication Science, 2022, 38(5): 18-26.

[6] 网络通信与安全紫金山实验室. 未来网络白皮书——确定性网络技术体系白皮书[R]. 2021. PML. White paper on future networks: white paper on deterministic networking technology systems [R]. 2021.

[7] 3GPP. NR and NG-RAN overall description: 38.300 v17.1.0[S]. 2022.

[8] LE T K, SALIM U, KALTENBERGER F, et al. An overview of physical layer design for ultra-reliable low-latency communications in 3GPP releases 15, 16, and 17[J]. IEEE Access, 2020(9): 433-444.

[9] 3GPP. System architecture for 5G system (Release18): TS 23.501 v18.3.0[S]. 2023.



- [10] LARRAÑAGA A, LUCAS-ESTAN M C, MARTINEZ I, et al. Analysis of 5G-TSN integration to support industry 4.0[C]. // Proceedings of IEEE 25th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [11] 樊陆陆, 郭刚, 等. 基于工业互联网 5G TSN 研究[J]. 通信技术, 2021, 54(4): 893-897.
FAN L L, GUO G, et al. Research on 5G TSN based on industrial internet[J]. Communication Technology, 2021, 54(4): 893-897.
- [12] 蔡岳平, 李栋, 许驰, 等. 面向工业互联网的 5G-U 与时间敏感网络融合架构与技术[J]. 通信学报, 2021, 42(10):43-54.
CAI Y P, LI D, XU C, et al. 5G-U and time-sensitive network convergence architecture and technology for industrial internet [J]. Journal of Communications, 2021, 42(10):43-54.
- [13] GUNDALL M, HUBER C, ROST P, et al. Integration of 5G with TSN as prerequisite for a highly flexible future industrial automation: Time synchronization based on IEEE 802.1 AS[C]//Proceedings of IEEE IECON 2020. Piscataway: IEEE Press, 2020.
- [14] ABREU R B, POCOTI G, JACOBSEN T H, et al. Scheduling enhancements and performance evaluation of downlink 5G time-sensitive communications[J]. IEEE Access, 2020(8): 128106-128115.
- [15] 宋光敏, 王群青, 黄占兵, 等. 端边协同保障时延确定性技术研究[J]. 电信科学, 2022, 38(5): 26-37.
SONG G M, WANG Q Q, HUANG Z B, et al. Research on delay determinism technique for end-edge collaboration guarantee[J]. Telecommunication Science, 2022, 38(5): 26-37.
- [16] 5G DNA. 5G 确定性网络+工业互联网融合白皮书[R]. 2020.
5G DNA. 5G deterministic networks + industrial internet convergence white paper[R]. 2020.
- [17] 5G DNA. 5G 确定性网络@电力需求白皮书I: 需求、技术与实践[R]. 2020.
5G DNA. 5G deterministic networks @ electricity demand white paper i: requirements, technologies and practices[R]. 2020.
- [18] 3GPP. Enhancement of 3GPP supporting V2X scenarios, Stage1: TS 22.186 v16.2.0[S]. 2019.
- [19] 华为技术有限公司. 5G时代十大应用场景白皮书[R]. 2017.
Huawei Technology Co., Ltd. White paper on ten application scenarios in the 5G era[R]. 2017.
- [20] IEEE Standards Association. IEEE standard for local and metropolitan area networks-frame replication and elimination for reliability: IEEE Std 802.1CB-2017[S]. 2017.
- [21] 彭紫梅, 寿国础, 郭梦杰, 等. 时间敏感网络中的冗余机制研究综述[J]. 电信科学, 2023, 39(8): 29-42.
PENG Z M, SHOU G C, GUO M J, et al. A review of research on redundancy mechanisms in time-sensitive networks[J]. Telecommunication Science, 2023, 39(8): 29-42.
- [22] CHEN M, GENG X, LI Z, et al. Segment routing (SR) based bounded latency: Internet-Draft draft-chendetnet-sr-based-bounded-latency-00[S]. Internet Engineering Task Force 2018.
- [23] 3GPP. Physical channels and modulation (Release 17): TS 38.211[S]. 2022.

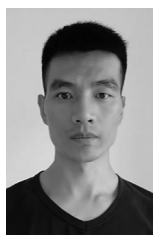
[作者简介]



朱仕银 (1976-), 男, 新华三技术有限公司先进技术研究部总经理、高级工程师, 中国科学技术大学博士生, 主要研究方向为确定性网络、算网一体和智算中心网络。



杨坚 (1977-), 男, 博士, 中国科学技术大学教授, 主要研究方向为未来智能网络。



孔磊 (1986-), 男, 博士, 新华三技术有限公司先进技术研究部高级工程师, 浙江大学在站博士后, 主要研究方向为 5G 确定性网络、通信和感知一体化技术以及网络智能化技术。