



面向工业互联网的5G空口双发选收技术应用研究

孙军涛¹, 胡斌², 贺文涛², 钱文轩²

(1. 中国电信股份有限公司, 北京 100033;

2. 中电信智能网络科技有限公司, 四川 成都 610000)

摘 要: 在工业场景中, 网络的稳定性至关重要。提出了面向工业互联网的5G空口双发选收技术方案, 并在斗轮机控制场景中进行了测试和应用。研究发现, 该技术方案通过双频组网、双5G模组客户终端设备(customer premises equipment, CPE)的数据冗余传输、接收侧用户面功能(user plane function, UPF)实时链路监测及最优路径选择、工业场景适配性调整等机制, 显著降低了丢包率, 但在时延和抖动方面未达到预期改善效果, 在斗轮机控制等现场应用场景中展现出显著的现实意义。这表明, 5G技术能够满足部分工业网络的需求, 未来需要进一步探索和优化空口传输技术, 从而更全面地满足工业互联网的严格要求。

关键词: 5G; 双发选收; 工业互联网

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025149

Research on the application of 5G air interface dual-transmit and selective reception technology for industrial Internet

SUN Juntao¹, HU Bin², HE Wentao², QIAN Wenxuan²

1. China Telecom Corporation Limited, Beijing 100033, China

2. China Telecom Intelligent Network Technology Co., Ltd., Chengdu 610000, China

Abstract: In industrial scenarios, the stability of networks is crucial. A 5G air interface dual-transmission and selection reception technology solution for industrial Internet was proposed and was tested and applied it in the control scenario of the stacker-reclaimer. The study found that the technical solution significantly reduced the packet loss rate through mechanisms such as dual-frequency networking, data redundant transmission of dual-5G customer premises equipment (CPE), real-time link monitoring and optimal path selection by the user plane function (UPF) on the receiving side, and adaptability adjustments for industrial scenarios. However, the expected improvement in latency and jitter was not achieved. It demonstrated significant practical significance in field application scenarios such as bucket wheel machine control. This indicated that 5G technology can meet the needs of some industrial networks, and further exploration and optimization of air interface transmission technology will be required in the future to more comprehensively meet the stringent requirements of industrial Internet.

Key words: 5G, dual-transmission and selection reception, industrial Internet

0 引言

随着信息与网络技术的不断进步,工业正朝着柔性化、网络化以及智能化的方向加速转型,对网络稳定性的需求也随之进一步提升。传统的蜂窝网络(4G网络及更早版本)主要面向手机通信和移动宽带场景,与之相比,5G网络凭借其高速率、低时延、海量连接的能力以及定制化网络服务的能力,已具备成为工业互联网核心网络基础设施的关键要素,且5G的蜂窝移动网络连接能力精准地满足了工业数字化转型过程中对无线网络应用多样化的需求^[1-3],因此,5G网络正逐步成为工业互联网的关键组成部分。同时,这也对5G网络的端到端时延、抖动、可靠性等关键性能指标提出了极为苛刻的要求。

5G网络的端到端确定性受5G核心网(5G core, 5GC)、传输网和空口等多方面因素的影响,其中,空口部分是保障网络确定性的关键节点。2018年6月,3GPP在发布的5G新空口(5G new radio, 5G NR)的第一版规范 Rel-15中,引入了超高可靠低时延通信(ultra-reliable low-latency communication, URLLC)技术,在 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^[4-6],随后在 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^[7]。为满足工业网络的需求,文献[8]从5G网络的整体架构上对确定性网络的关键技术和落地方案进行了研究,文献[9]从5G无线网增强技术上面向时间敏感网络进行了研究,文献[10]从实际的网络配置角度出发,对无线空口时延、核心网时延、5G网络终端处理时延进行了探索。

虽然与4G空口技术相比,5G空口技术通过采用滤波正交频分复用(filtered orthogonal frequency division multiplexing, F-OFDM)、低密度奇偶校验(low density parity check, LDPC)码

和 Polar 码、缩短传输时间间隔(transmission time interval, TTI)长度、引入免调度竞争接入机制、优化反馈机制和采用更扁平的网络架构等技术手段,实现了更高的频谱利用率、更高效的信道编码、更低的时延^[11],但作为工业互联网的核心支撑技术,5G空口技术依然面临稳定性与可靠性不足的问题。这些问题主要表现在以下两方面。

(1) 易受无线传播环境干扰:无线信号在空气中传播时,由于受到固有的衰减效应、多径效应的影响,信号失真和误码不可避免。此外,雨水、建筑物、植被、天气情况的变化,以及工业设备、电子设备等产生的电磁干扰,都会导致信号质量下降,从而影响数据传输的稳定性和可靠性。

(2) 技术实现复杂度开销大:为了实现高可靠传输,5G网络采用了多种技术手段,这些技术在提高可靠性的同时,也增加了系统的复杂性和资源开销。在实际应用中,这些因素可能会导致网络性能下降,影响空口的稳定性和可靠性。

鉴于这些无法改变的客观情况,如何提高5G空口传输的稳定性和可靠性,就需要另辟蹊径从综合解决方案上进行突破创新,本文提出了应用双发选收技术及相关的综合解决方案,以优化5G空口的传输可靠性。

1 5G空口双发选收技术方案

1.1 5G空口双发选收技术方案关键组成部分

5G空口双发选收技术方案如图1所示,该方案由以下3个关键部分组成。

(1) 双频组网。本方案采用了两个独立的5G基站,分别发送两路5G信号。这两路信号分别采用N78和N1两个频段,且对控制信号、视频信号、地理位置信息等分类数据实施了差异化的服务质量(quality of service, QoS)策略进行传输,以尽可能保证两条传输链路的独立性。

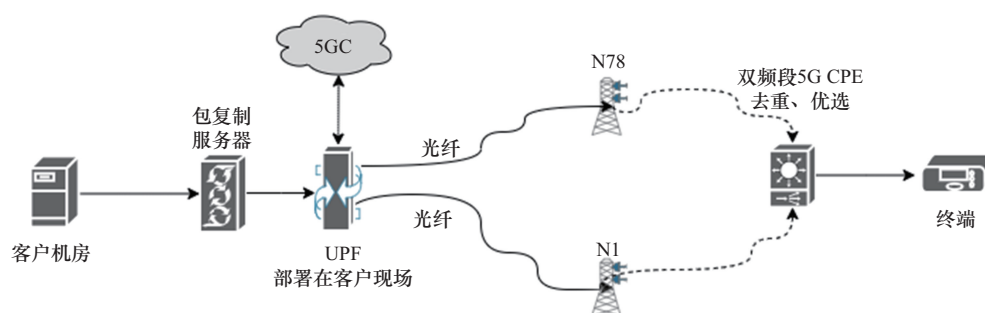


图1 5G空口双发选收技术方案

(2) 双5G模组客户终端设备(customer premises equipment, CPE)。CPE作为一种5G终端设备,其功能在于接收业务终端信号并将其转化为5G信号,从而实现业务终端对5G网络的接入。本方案所采用的CPE集成了两路5G模组,能够通过两条不同的5G空口链路同时进行数据的发送与接收。此外,该CPE还具备数据复制功能,能够将终端发送至CPE的数据进行复制,并通过两条5G空口链路同时发出。

(3) 接收侧用户面功能(user plane function, UPF)。在信号接收侧,就近部署了专用的UPF,对两条5G链路发送来的数据进行缓存和去重处理后,再传输至信号接收端。

基于上述3个关键组成部分,业务终端将数据包发送至双5G模组CPE。双5G模组CPE对数据包进行复制,并通过N78和N1两个频段的5G空口,将数据包分别发送至两个基站;两个基站接收到数据包后,将其传输至接收侧UPF;接收侧UPF依据预设策略,对数据包进行处理,并将其传输至信号接收端。5G空口双发选收技术方案包含以下3种处理情况。

(1) 情况1: 两条5G空口链路均正常。接收侧UPF接收到数据包后,执行缓存、排序和去重操作,以恢复原始数据流。同时,接收侧UPF优先处理先到达的数据包,确保数据传输的低时延。

(2) 情况2: 两条5G链路中,一条链路正常,另一条链路不正常。接收侧UPF会实时监测

两条链路的状态,一旦检测到某条链路故障,接收侧UPF接收到正常链路的数据包后,就会利用该数据包恢复原始数据流,并丢弃另一条链路的数据包。同时,接收侧UPF持续实时监测两条链路的状态,及时进行切换,以确保数据传输的可靠性。

(3) 情况3: 两条5G链路均不正常。系统会实时监测两条链路的状态,一旦检测到两条链路均出现故障,系统立即发出故障警报信号。若无法通过冗余数据包恢复数据,系统将启动数据重传机制,以确保数据的完整性。

1.2 双发选收技术原理

双发选收技术^[12-13]的核心机制在于发送端设备对原始数据包进行复制,生成原始包与复制包,这两份数据包分别经由两条相互独立的传输链路进行发送。当接收端设备成功捕获数据包后,对数据包进行处理,还原出原始数据包,从而提升传输可靠性,同时可优选线路来降低综合时延。双发选收技术降低丢包的原理如图2所示^[12],当接收端设备接收到经由两条链路传输来的数据包时,首先将其存储于缓存区。随后,利用去重算法对缓存中的重复数据包进行识别与剔除操作,进而精准地还原出原始数据包,从而实现高可靠性。

设当链路的丢包率为 l 时,该链路的丢包可靠性记为 r ,表示为:

$$r=(1-l)\times 100\% \quad (1)$$

当链路1的丢包率为 l_1 ,链路2的丢包率为 l_2

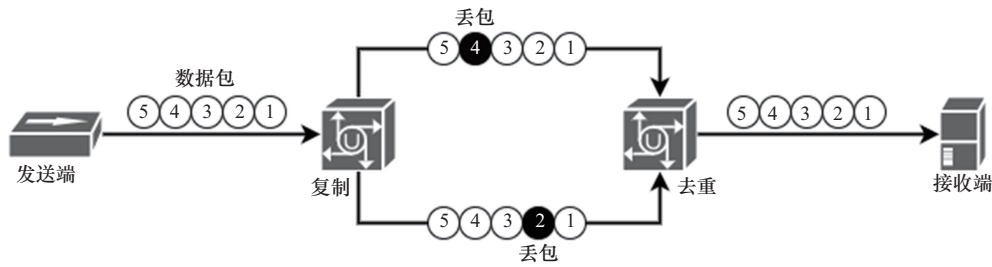


图2 双发选收技术降低丢包的原理

时，单独采用链路1和链路2传输的可靠性分别为 r_1 和 r_2 ，采用双发选收技术时的可靠性为 r_{12} ，表示为：

$$r_{12} = (1 - l_1 l_2) \times 100\% \quad (2)$$

由于 l_1 和 l_2 均小于或等于1，因此 $r_{12} \geq r_1$ ，同时 $r_{12} \geq r_2$ 。由此可知，采用双发选收技术后，链路的整体丢包可靠性相较于任何一条单链路都有了提升。

双发选收技术降低传输时延及抖动的原理如图3所示。在某一时刻，两条链路的时延存在差异的情况下，一条链路的数据传输速度较快，另一条链路的数据传输速度相对较慢。当接收端设备在接收到数据包后，会优先处理并转发先到达的数据包，同时对后到达的重复数据包进行丢弃处理。这一机制保证了数据传输过程中的低时延和低抖动的特性。

当链路中的单数据包时延 $\leq t$ 时，定义为有效数据包，反之，当单数据包时延 $> t$ 时，定义为无效数据包。假设发送 m 个包时，其中 n 个包为无效数据包，时延不可靠性记为 u ，表示为：

$$u = \frac{n}{m} \times 100\% \quad (3)$$

当时延不可靠性为 u 时，该链路的时延可靠

性记为 j ，表示为：

$$j = 1 - u \quad (4)$$

当链路1的不可靠性为 u_1 ，链路2的不可靠性为 u_2 时，单独采用链路1和链路2传输的时延可靠性分别为 j_1 和 j_2 。采用双发选收技术时的不可靠性 u_{12} 可表示为：

$$u_{12} = 1 - j_1 \times j_2 \quad (5)$$

由于 u_1 和 u_2 均小于或等于1，因此 $u_{12} \geq u_1$ ，同时 $u_{12} \geq u_2$ 。这说明，采用双发选收技术时，总是选择时延较低的那条链路，这对综合链路的时延和抖动是有改善的。然而，式（5）仅从原理上考虑了时延和抖动降低的可能性，未计算包复制和包选择的过程对时延的影响，且在 u_1 和 u_2 的大小关系随机，即在某一时刻链路1的时延与链路2的时延大小关系不确定的情况下，采用双发选收技术时，总是选择时延较低的那条链路，这对综合链路的时延和抖动是有改善的。如果两条链路的时延有明显区别，即在绝大部分情况下，链路1的数据包总是先到时，那么接收端需要对数据包进行缓存、去重等处理。整体时延的改善还需要进一步的测试和论证。

根据上述双发选收技术的原理可知，为确保

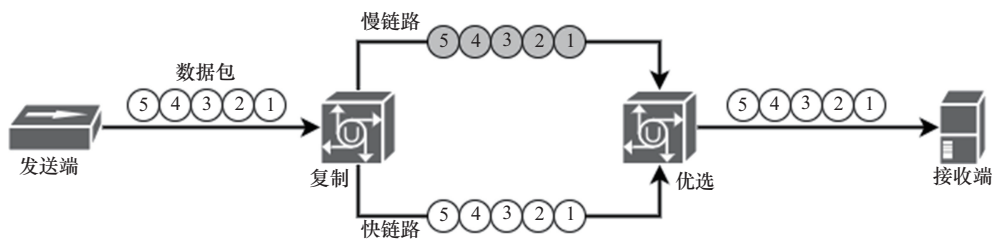


图3 双发选收技术降低传输时延及抖动的原理



该技术的传输效果,提升两条传输链路的不相关性至关重要。具体而言,链路1与链路2的传输路径应保持相互独立,以便在其中一条链路遭受干扰时,另一条链路能够保持不受或尽可能少受干扰。通过这种方式,两条链路可以相互补充,有效降低数据丢包率和传输时延,从而提升整体的传输性能。

2 5G空口双发选收技术验证

2.1 实验室验证

根据5G空口的传输原理可知,无线电波受传输环境影响较大,因此在传输环境较好且空口信道质量良好的情况下,5G空口的通信丢包率、时延、抖动都能满足工业网络的需求,但是在传输环境恶劣且空口信道质量较差的情况下,采用双发选收技术能否提高数据传输的确定性,需要进一步验证。基于以上思路,本文在实验室中通过人为加入电磁波干扰、关闭某一路空口传输等,模拟了传输环境较差、某一频段5G空口传输被屏蔽等情景,以测试终端至接收端的数据包转发丢包率、时延、抖动。5G空口双发选收技术实验室测试方案如图4所示,测试采用的具备双发选收功能的CPE型号为ASG1200-I2M,5G双发选收CPE ASG1200-I2M外观如图5所示。

测试准备条件:5G实验室仿真环境采用思博伦5G2B测试系统,该系统可以按照需求模拟

每个5G信道的信噪比、误码率、传输时延等参数;CPE采用双5G频段(N1和N78)的接入方式,具备5G空口双发功能;接入点(point of presence, POP)具备数据包选收功能;CPE与POP建立无线运行测试(wireless operation testing, WOT)组,并在WOT组上与POP建立锁定不同频段的虚拟可扩展局域网(virtual extensible local area network, VxLAN)隧道;PC1作为发送端,PC2作为接收端。



图5 5G双发选收CPE ASG1200-I2M外观

2.1.1 改善丢包率测试

PC1和PC2配置同一L2Vnet和同一网段,PC1向PC2以传输控制协议(transmission control protocol, TCP)发送512 byte数据包,带宽设置为50 Mbit/s,测试时长为1 h,思博伦5G2B测试系统设定5G空口信道质量较差时,分别观察N78单通道的丢包率、采用N78和N1双发选收后的

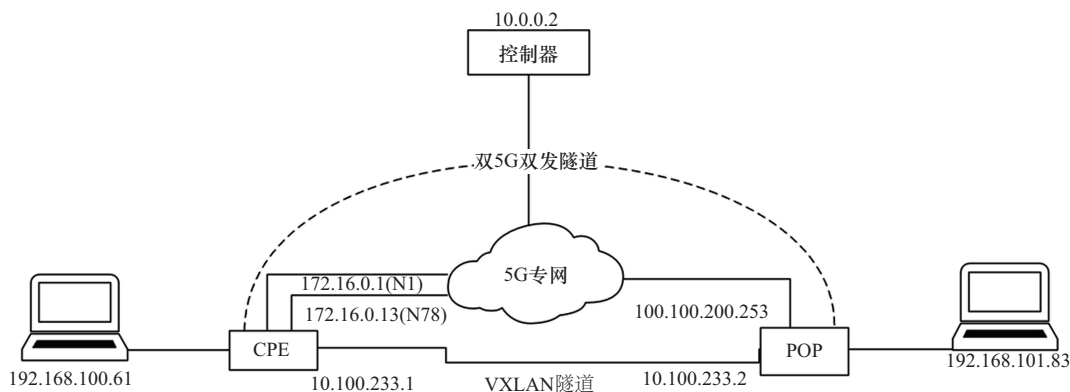


图4 5G空口双发选收技术实验室测试方案

丢包率，并记录乱序帧（reordered）和重复帧（duplicate）数据，同时记录 IPv4 校验和（IPv4 checksum）、用户数据报协议校验和（user data-gram protocol checksum, UDP checksum）和峰值突发尺寸（peak burst size, PBS）错误统计数据。丢包率测试结果见表 1。

2.1.2 降低时延和抖动测试

PC1 和 PC2 配置同一 L2Vnet，PC1 向 PC2 发送 512 byte 数据包，带宽设置为 50 Mbit/s，测试时长为 1 h，思博伦 5G2B 测试系统设定 5G 空口信道质量较差时，记录最大时延、最小时延、平均时延和抖动数据。时延和抖动测试结果见表 2。

由以上的实验室测试可知，在 5G 空口通信环境恶劣的情况下，采用 5G 空口双发选收技术，能有效减少丢包，降低丢包率，但由于存在数据包复制、缓存、去重等处理流程，传输时延不降反升，且并不能降低抖动。

2.2 港口斗轮机控制网络验证

基于以上实验室模拟的测试结果可知，5G 空口双发选收技术对降低恶劣环境下 5G 传输的丢包率改善明显，对时延和抖动改善不明显，因此需要选择对数据传输可靠性要求较高但对时延不敏感的生产环境，用于验证 5G 空口双发选收技术。

基于以上考虑，本文选择了某内河港口的斗

轮机控制系统^[14-15]进行部署和测试验证。该斗轮机控制系统相关技术要求如下。

（1）一年不宕机的概率>99%，业务单包可靠性应不低于 99.99%，即 5G 网络丢包率不能高于 0.01%。

（2）单终端上行带宽，每台斗轮机被分配的上行带宽不低于 10 Mbit/s。无线通信网络应满足数据传输平均时延≤20 ms，最大时延<120 ms 的要求。

（3）采用看门狗机制。可编程逻辑控制器（programmable logic controller, PLC）和输入/输出（input/output, I/O）端以周期时间（cycle time, CT）向对端发送数据包。在接收端，期望在每个以 CT 为单位的时间间隔内，都能收到数据包。若连续多个周期（根据看门狗定时器 watch dog timer 的配置参数）均未收到数据包，即通信时延超过设定的阈值 CT 时，则认为通信服务不可用。为防止控制信令的乱序到达，系统会采取“非常确定”的保护措施，即停机。在不影响业务需求的情况下，可以适当放宽 CT 的设定值，以确保整体通信网络的稳定性。

按照以上要求，本文搭建斗轮机控制系统所用 5G 双发选收通信网络，如图 6 所示。在该 5G 网络中，UPF 被部署在码头现场，以实现数据本地转发，满足港区客户的低时延诉求；新建 N78

表 1 丢包率测试结果

补充列标题连接方式	丢包率	乱序帧	重复帧	IPv4 校验和	UDP 校验和	PBS 错误
N78 单通道 (非双发选收)	11.8%	/	/	/	/	/
N78/N1 双通道 (双发选收)	3.7%	86	0	0.0	0.0	0.0

表 2 时延和抖动测试结果

连接方式	最大时延/ μ s	最小时延/ μ s	平均时延/ μ s	抖动/ μ s
N78 单通道 (非双发选收)	1 423 018.66	6 265.77	397 649.34	53.58
N78/N1 双通道 (双发选收)	1 614 4875.68	5 261.29	141 629.36	68 958.49

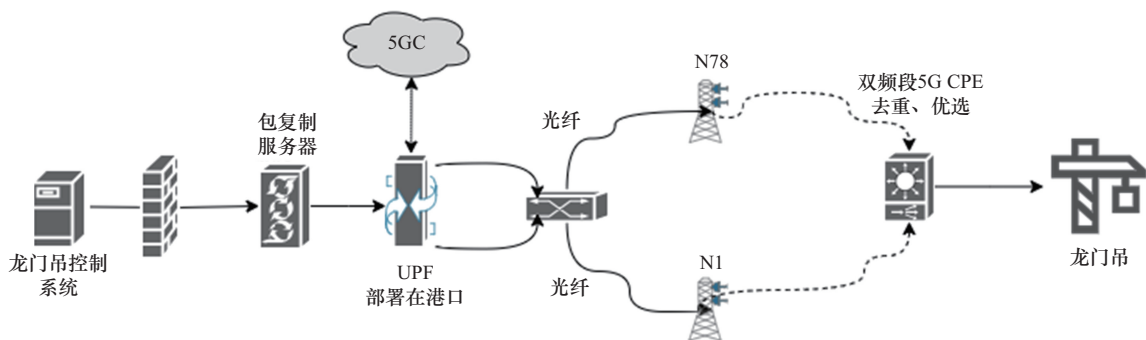


图6 斗轮机控制系统所用5G双发选收通信网络

和N1频段的5G基站，以保证现场的5G空口接入质量；改造斗轮机，在斗轮机通信系统上安装双发CPE，与控制台选收控制网关组成5G双发选收网络。

在此环境下，对斗轮机进行了运行情况监测，监测项目及数据结果如下。

(1) 测定上行速率、时延的步骤如下。

步骤1：CPE采用双5G（锁定不同的频段）的接入方式，与POP广域网（wide area network, WAN）接口建立WOT组，在WOT组上与POP建立VxLAN隧道，实现双发选收。

步骤2：CPE向部署在客户业务平台上的虚拟机发送10次数据包，并取平均值。

步骤3：CPE ping部署在客户业务平台上的虚拟机10 000次，并记录平均上行带宽、最大时延、最小时延及平均时延。

测试结果：平均上行带宽为25.6 Mbit/s，最大时延为114 ms，最小时延为19 ms，平均时延为40 ms。

(2) 测定单链路故障场景下双发选收业务是否正常的步骤如下。

步骤1：CPE持续ping部署在客户业务平台上的虚拟机。

步骤2：禁用CPE上的一个5G模组，查看ping侧是否有丢包。

步骤3：恢复该5G，查看ping侧是否有丢包。

测试结果：中断一条链路过程中无丢包，恢复该链路过程中也无丢包。

(3) 双发选收保障斗轮机业务可靠性测试的步骤如下。

步骤1：将斗轮机控制器接入5G双发选收设备，使两个5G双发选收设备拨号入网。

步骤2：对斗轮机发送连续运行指令。

步骤3：在运行过程中，人为随机使5G双发选收设备中的一个5G模块故障，观察业务是否正常。

测试结果：5G双发选收设备中的一个5G模块故障，业务仍能正常运行，斗轮机运转正常。

(4) 验证斗轮机能否在5G环境下长时间稳定运行的步骤如下。

步骤1：将斗轮机控制器接入5G双发选收设备，使两个5G双发选收设备拨号入网。

步骤2：对斗轮机发送连续运行指令，使斗轮机按正常工作频率连续运行7×24 h。

步骤3：统计斗轮机宕机次数。

测试结果：连续运行7×24 h，斗轮机控制系统无任何告警出现，宕机次数为0。

通过以上现场测试可知，采用5G空口双发技术后，在时延、上行带宽、稳定性等方面，完全满足斗轮机控制系统的网络要求。

3 结束语

本文深入研究了5G空口双发选收技术在工

业场景中的应用效果。从原理上分析, 该技术旨在有效降低丢包率, 理论上能够显著提升传输的确定性, 降低时延和抖动。然而, 实验室验证结果显示, 尽管双发选收技术在减少丢包方面表现优异, 但由于双发选收处理流程的复杂性, 时延和抖动并未得到改善, 反而有所增加。在斗轮机控制现场的实际应用中, 这一特性得到了进一步验证。尽管 5G 双发选收技术未能完全达到理论预期目标, 但在特定工业场景, 如丢包敏感但时延不敏感的场景中, 依然展现出极强的现实意义。这表明, 5G 技术在满足部分工业互联网需求上具有一定的适用性, 能够胜任一些特定的工业任务。

为了进一步满足工业互联网的全面需求, 尤其是对时延和抖动更为敏感的应用场景, 仍需要深入探索和优化 5G 空口传输技术。未来的研究方向应聚焦于如何简化双发选收处理流程, 降低其对时延和抖动的影响, 同时进一步提升 5G 技术在工业制造主流程中的应用深度和广度。

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 规模化应用“扬帆”行动升级方案[EB]. 2024.
Ministry of Industry and Information Technology, Cyberspace Administration of China, National Development and Reform Commission, et al. Upgrade plan for the “Sail” action of 5G large-scale application[EB]. 2024.
- [2] 工业和信息化部. 5G 全连接工厂建设指南[EB]. 2022.
Ministry of Industry and Information Technology (MIIT). 5G fully connected factory construction guide[EB]. 2022.
- [3] 中国信通院, 中国电信, 中国移动, 等. 5G 应用创新发展白皮书: 2023 年第六届“绽放杯”5G 应用征集大赛洞察[R]. 2023.
China Academy of Information and Communications Technology, China Telecom, China Mobile, et al. White paper on 5G application innovation and development: insights into the 6th “Blossom Cup” 5G application collection competition in 2023[R]. 2023.
- [4] 张孟哲, 夏宜君. 5G 在工业领域的应用现状、问题及推广建议[J]. 电信科学, 2023, 39(1): 126-135.
ZHANG M Z, XIA Y J. Status quo, problem and promotion suggestions of 5G application in industrial field[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(1): 126-135.
- [5] 3GPP. NR and NG-RAN overall description: TS38.300 v17.1.0[S]. 2022.
- [6] LE T K, SALIM U, KALTENBERGER F. An overview of physical layer design for ultra-reliable low-latency communications in 3GPP releases 15, 16, and 17[J]. IEEE Access, 2017, 9: 433-444.
- [7] 3GPP. System architecture for 5G system (Release18): TS 23.501 v18.3.0[S]. 2023.
- [8] 朱仕银, 杨坚, 孔磊. 5G 确定性网络关键技术研究和应用[J]. 电信科学, 2024, 40(8): 172-182.
ZHU S Y, YANG J, KONG L. 5G deterministic network key technology research and application[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(8): 172-182.
- [9] 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): 18-25.
XIN J C, XU S, ZHANG H, et al. Study on 5G wireless network enhancement technology for time sensitive networks[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(5): 18-25.
- [10] 邓宏阳. 浅谈降低 5G 网络端到端时延的方法[J]. 数字通信世界, 2024(9): 99-101.
DENG H Y. A brief discussion on methods to reduce end to end latency in 5G[J]. Digital Communication World, 2024(9): 99-101.
- [11] 郭铭, 文志成, 刘向东. 国之重器出版工程 5G 空口特性与关键技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2019.
GUO M, WEN Z C, LIU X D. Characteristics and key technologies of 5G air interface in the national heavy equipment publishing project[M]. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2019.
- [12] DANIELIS P, PARZYJEGLA H, MÜHL G, et al. Frame replication and elimination for reliability in time-sensitive networks[J]. arXiv preprint, 2021: 2109.13677.
- [13] YAN J J, REN J, YANG D. A routing approach towards frame replication and elimination in time-sensitive networks[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 3rd International Conference on In-



formation Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1045-1050.

- [14] 中国航海学会. 港口自动化斗轮堆取料机安全作业操作规程: T/CIN 062—2024[S]. 2024.

China Institute of Navigation (CIN). Safety operation code of automated bucket-wheel stacker reclaimer in port: T/CIN 062—2024[S]. 2024.

- [15] 中国航海学会. 自动化臂式斗轮堆取料机控制系统技术要求: T/CIN 037—2024[S]. 2024.

China Institute of Navigation (CIN). Technical requirements for the control system of automatic boom bucket wheelstacker reclaimer: T/CIN 037—2024[S]. 2024.

[作者简介]



孙军涛 (1974—), 男, 中国电信股份有限公司工程师、政企信息服务事业群5G定制网创新中心处长, 主要研究方向为通信技术。



胡斌 (1984—), 男, 中电信智能网络科技有限公司工程师, 主要研究方向为未来智能网络、边缘计算等。



贺文涛 (1980—), 男, 中电信智能网络科技有限公司工程师, 主要研究方向为移动通信技术、边缘计算技术。



钱文轩 (1986—), 男, 中电信智能网络科技有限公司工程师, 主要研究方向为5G边缘计算、工业互联网等。