

# 基于5G uRLLC的工业网关 端到端低时延通信研究

Research on End-to-End Low-Latency Communication for  
Industrial Gateway Based on 5G uRLLC

陈德进<sup>1</sup>,王丽波<sup>2</sup>,卜小琳<sup>2</sup>,王红军<sup>3</sup>,安 伟<sup>2</sup>,姜元山<sup>1</sup>(1. 中讯邮电咨询设计院有限公司,北京 100048;2. 中国联通东营分公司,山东 东营 257091;3. 中国石化胜利油田有限公司,山东 东营 257015)

Chen Dejin<sup>1</sup>, Wang Libo<sup>2</sup>, Bu Xiaolin<sup>2</sup>, Wang Hongjun<sup>3</sup>, An Wei<sup>2</sup>, Jiang Yuanshan<sup>1</sup> (1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co., Ltd., Beijing 100048, China; 2. China Unicom Dongying Branch, Dongying 257091, China; 3. SINOPEC Shengli Oil-field Co., Ltd., Dongying 257015, China)

## 摘 要:

针对工业物联网实时控制场景中的端到端低时延挑战,设计并构建了一种基于5G uRLLC技术的工业网关架构,着重对工业协议模块设计、切片映射技术和端到端时延验证方案展开研究。实验数据表明,5G uRLLC接入使Modbus双向通信的平均时延较传统SA模式减小了约30%,在引入切片映射技术后时延得到进一步优化,这不仅验证了uRLLC在工业实时控制领域的工程适用性,更为工业现场设备无线化改造提供了创新性的技术实现路径。

## 关键词:

5G uRLLC;工业网关;Modbus协议;低时延通信

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2025.06.006

文章编号:1007-3043(2025)06-0030-04

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:

To address the end-to-end low-latency challenges in industrial IoT real-time control scenarios, it designs and implements an industrial gateway architecture based on 5G uRLLC technology, focuses on the research of industrial protocol module design, network slicing mapping technology, and end-to-end latency verification schemes. Experimental results demonstrate that 5G uRLLC reduces the average latency of modbus bidirectional communication by approximately 30% compared to traditional SA (Standalone) mode. Further optimization is achieved through slicing mapping technology, which enhances latency performance. It not only validates the engineering feasibility of uRLLC in industrial real-time control, but also provides an innovative technical framework for wireless transformation of industrial field devices.

## Keywords:

5G uRLLC; Industrial terminals; Modbus protocol; Low-latency communication

引用格式:陈德进,王丽波,卜小琳,等. 基于5G uRLLC的工业网关端到端低时延通信研究[J]. 邮电设计技术,2025(6):30-33.

## 1 概述

在工业互联网<sup>[1]</sup>蓬勃发展的当下,钢铁、油田、物流等行业对生产过程的实时监控与精准控制提出了严苛要求<sup>[2]</sup>。传统有线网络在应对复杂多变的工业环境时展现出了其局限性<sup>[3]</sup>,包括扩展性匮乏与部署灵活性不足等,这些短板严重制约了其满足工业智能化

深度升级需求的能力。

5G技术以其出色的峰值速率、微秒级的时延特性以及强大的海量连接能力,开启了工业无线化转型<sup>[4]</sup>的全新篇章。在5G诸多的关键技术<sup>[5]</sup>里,超可靠低时延通信(uRLLC)技术<sup>[6-7]</sup>堪称标志性应用。该技术拥有亚毫秒级的空口时延<sup>[8]</sup>,且通信可靠性极高<sup>[9]</sup>,接近无误(达99.999%),能够切实满足工业控制类业务对通信性能的严苛要求,已然成为工业互联网架构中至关重要的核心支撑技术<sup>[10]</sup>。

收稿日期:2025-04-08

尽管5G uRLLC技术前景广阔,但在实际应用中仍面临诸多挑战。工业领域存在着种类繁多的通信协议,如Modbus<sup>[11]</sup>、CC-Link<sup>[12]</sup>、Profinet<sup>[13]</sup>等,这些协议与5G网络的融合存在兼容性问题,导致难以有效控制数据传输时延,成为制约5G在工业领域深度应用的瓶颈。因此,深入研究基于5G uRLLC的工业网关端到端低时延通信技术<sup>[14]</sup>,对突破工业协议与5G网络的融合难题,实现工业设备与5G网络的高效协同,为智能制造提供低时延、高可靠的通信解决方案具有重要的现实意义。

2 系统架构设计

2.1 硬件架构

本研究设计的工业网关硬件架构旨在满足工业场景对数据处理与通信的严苛要求,网关具体架构如图1所示。

该架构的主控模块选用SG3568Z CPU,可提供4核64位ARM Cortex-A55处理器,具备强大的运算能力,吞吐量≥1 Gbit/s,能够快速处理工业协议数据。在工业自动化生产线场景中,大量的传感器数据通过不同协议传输至终端,SG3568Z凭借其加速引擎,可并行解析和处理这些数据,确保数据处理的时效性,避免因数据堆积导致的处理延迟。

该架构的通信模块选用了鼎桥MT5700模组,该

模组采用3GPP Release 16技术,全面兼容uRLLC标准,对工业控制中时间敏感的应用场景尤为关键。例如,在油田远程控制抽油机的启停操作中,该模组能够实现近乎实时的控制指令与反馈数据的传输,确保远程操作的即时性和精确性。

在接口设计上,工业网关配备了多个千兆以太网接口,并集成了RS-232/RS-485等接口,通过这些接口将众多工业协议转换成标准协议,使工业网关能够与PLC、传感器等下位机设备进行稳定的数据交互,从而实现对工业生产过程的精准监控和有效控制。

2.2 软件架构

软件架构除了基础通信模块,还包含工业协议模块与5G管理模块。工业协议模块负责实现Modbus、CC-Link等不同的工业协议,以获取各类工业设备的实时运行数据。此模块如同工业网络中的“翻译官”,打破了不同设备因协议差异形成的通信壁垒。以Modbus协议为例,在使用485协议的基础上,在工业网关上开发适配Modbus RTU和Modbus TCP协议。在适配Modbus协议后,工业网关能够与大量支持Modbus的工业设备进行无缝对接,从而迅速搭建起统一的数据采集网络,高效汇聚分散在各个角落的设备数据。工业网关可使用Modbus RTU或Modbus TCP方式实时收集各从机数据,这些数据经工业网关的进一步处理与整合后,上报到通过mqtt协议连接的平台(见

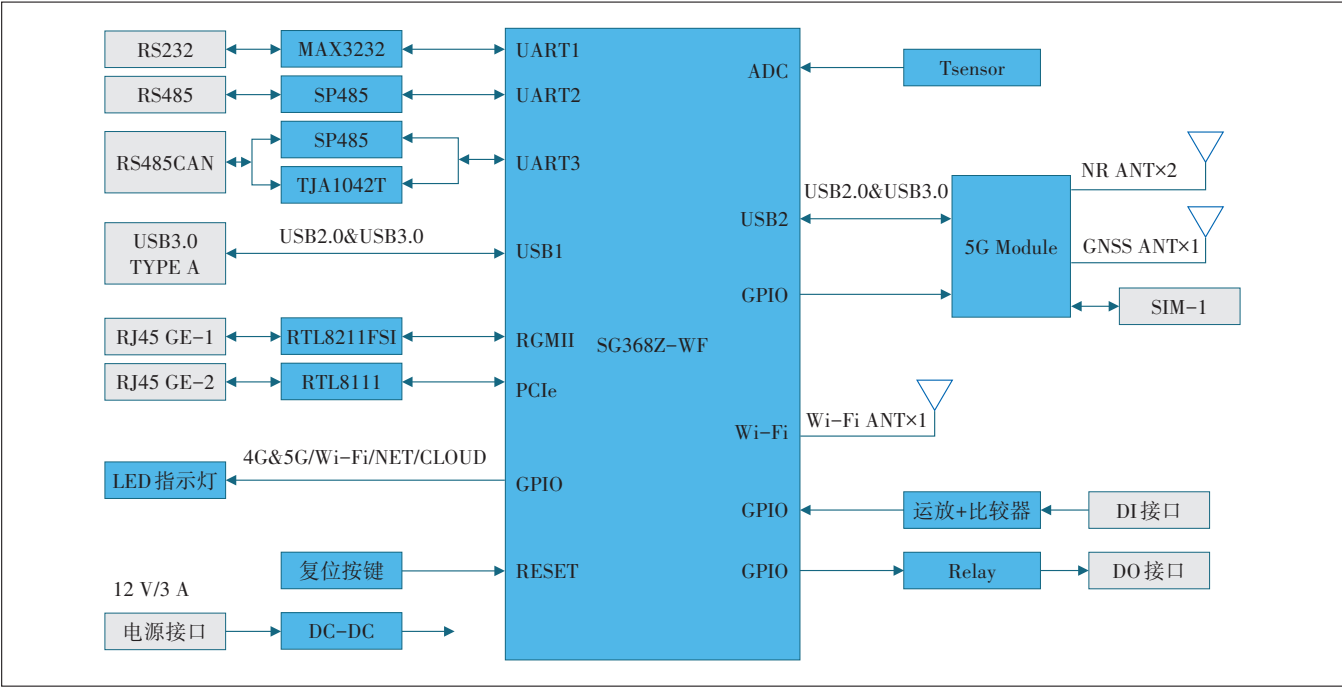


图1 工业网关架构

图2),从而为工业企业的生产调度、设备维护以及优化控制策略等提供有力的数据支撑,助力企业提升生产效率、降低运营成本。

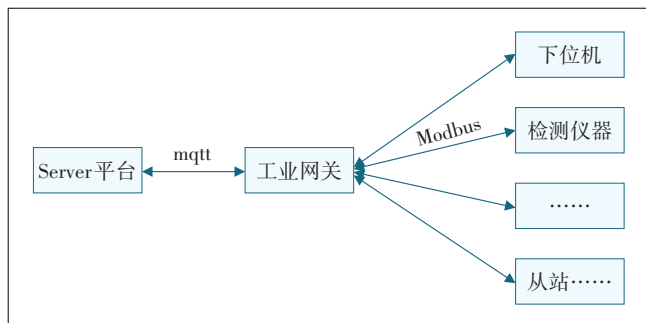


图2 PLC数据到平台流程

本研究设计的5G管理模块主要实现5G拨号和切片管理,其中切片管理可根据业务优先级及QoS要求,将不同业务流精准映射至相应的5G切片,从而确保工业控制类业务获得高优先级的切片资源,满足其低时延、高可靠的通信需求。

### 3 关键技术实现

#### 3.1 工业协议模块

在工业网关中,工业协议适配是实现工业设备与5G网络互联互通的核心环节。本研究中的工业协议模块在工业网关的工业协议适配方面具有重要作用。首先是多协议解析与适配。工业现场存在着Modbus、Profinet、Profibus、CanOpen、CC-Link、EthernetIP等各式各样的协议,本研究针对这些协议的内在特征展开了深入剖析,达成了对这些协议的高效适配。其次是动态配置管理。工业协议模块专门设计了动态配置功能,用户能够借助配置界面或者管理接口,依据实际情况灵活设定工业协议的相关参数,例如Modbus主从模式、读写寄存器范围、波特率、数据位、停止位、校验位、最大等待回复时间等。

#### 3.2 uRLLC增强技术

uRLLC增强技术是提升工业网关在5G网络中通信性能的关键,该技术通过空口优化与切片映射技术,有效降低了端到端时延,提高了通信的可靠性,满足工业控制类业务对实时性与稳定性的严苛要求。

在空口优化技术层面,本研究除采用低码率场景适配的CQI/MCS表格设计及调整PDCCH聚合级别外,还重点应用了基于时隙绑定的资源分配策略与预调度机制。在工业控制实际场景里,对于传感器状态监

测这类需要高频次传输小数据包的情况,时隙绑定技术能够把多个小数据包合并起来进行传输,缩短数据包之间的间隔,极大地提升了传输效率。除此之外,预调度技术依据工业业务所具备的周期性与实时性特点,提前为终端分配无线资源,避开每次传输前都要进行资源申请的流程,减少了信令交互的时间,进一步降低了时延,有力地保障了控制指令及时、精准地传送到目标设备。

#### 3.3 切片映射技术

在切片映射方面,基于5G服务质量标识符(5G QoS Identifier, 5QI)参数实现业务流与网络切片的动态匹配。5QI值为1~255,每个值对应一组QoS参数,包括延迟、吞吐量、数据包丢失率和抖动等<sup>[15]</sup>。对于工业控制类业务,根据其对时延和可靠性的严格要求,通过配置5QI参数,为该切片分配高优先级的资源,确保工业控制信号在传输过程中能够优先获得网络资源,满足其低时延、高可靠的传输需求。同时,根据业务负载的动态变化实时调整5QI参数,实现切片资源的动态优化分配,提高网络资源的利用率,满足工业生产过程中不同业务场景对网络性能的多样化需求。

### 4 实验与结果分析

#### 4.1 测试方案

为全面评估基于5G uRLLC的工业网关在Modbus协议下的端到端时延性能,本研究主要基于Modbus TCP构建了测试环境。测试依托5G SA核心网,在PC端部署Modbus Client/Server软件,模拟工业现场的数据交互场景。工业网关作为Modbus从机(Server端),通过5G网络与核心网服务器下挂的电脑相连,电脑上安装的Modbus主机软件(Client端)负责发起数据请求。在测试指标定义方面,将双向通信时延明确界定为回复时间戳与请求时间戳的差值(见图3),这一指标能够直观反映数据从请求发出到接收回复整个过程所需的时间,是衡量工业网关通信性能的关键参数。

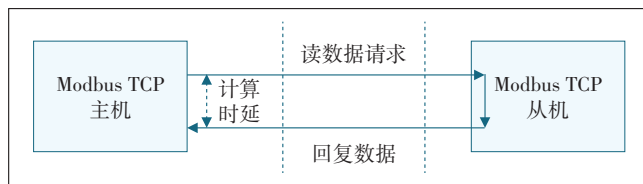


图3 时延计算方式

测试涵盖3种典型场景:5G SA模式(无切片)、5G uRLLC模式以及5G uRLLC+切片映射模式。在5G SA模式下,工业网关以传统的5G网络连接的方式进行通信,未进行专有切片资源的分配。该场景将被作为对比基准,用于展现常规5G网络下Modbus协议的时延水平。在5G uRLLC模式下,基站开启时隙绑定和预调度功能,利用uRLLC技术的低时延特性,评估uRLLC技术对时延的优化效果。在5G uRLLC+切片映射模式下,网络侧创建多个切片,设置不同的优先级和资源分配策略,进一步探索切片映射对Modbus协议数据传输的影响,通过将Modbus业务流精准映射到特定的5G切片,分析其在复杂工业应用场景中的性能表现。

4.2 测试结果

经过大量的测试与数据采集,得到了不同场景下的时延数据,如表1所示。

表1 测试数据统计

| 场景         | 平均时延/ms | 最小时延/ms | 最大时延/ms |
|------------|---------|---------|---------|
| 5G SA      | 11.8    | 8.7     | 15.2    |
| 5G uRLLC   | 8.2     | 5.1     | 10.5    |
| uRLLC+切片映射 | 8.0     | 5.0     | 10.2    |

在5G SA场景中,Modbus TCP双向通信的时延为8.7~15.2 ms,平均时延为11.8 ms。当切换至5G uRLLC场景后,平均时延降低至8.2 ms,与5G SA模式相比平均时延降低约30%。在5G uRLLC+切片场景下,平均时延进一步减小到8.0 ms。

这一结果对于工业互联网中多业务流在5G网络中的切片资源分配具有重要的指导意义,即对于像Modbus这样的工业协议,可根据其数据传输特点与实时性需求,将Modbus业务流分配到最合适的网络切片中,避免因资源竞争导致的时延增加,确保Modbus数据传输的稳定性与及时性。

5 结论与展望

鉴于工业互联网实时控制场景对低时延通信的诉求,本研究搭建了一个基于5G uRLLC技术的工业网关架构。此架构融合了高性能硬件、5G网络切片、uRLLC通信以及多种工业协议适配等关键功能,降低了工业协议通信的端到端时延。实验数据显示,相较于传统5G SA模式,在5G uRLLC接入时,Modbus通信时延显著下降,在引入切片映射技术后,时延得以进

一步优化。这一成果有力证实了本方案在工业无线化通信领域的实用价值与可行性,为工业互联网的发展提供了稳固的技术支撑。

目前的研究主要聚焦于Modbus协议,后续研究将着重探索一种适配多协议融合的动态切片调度算法,依据不同协议的业务需求以及实时网络状况,灵活调节切片资源分配,以此达成多协议业务的高效承载和低时延传输,进而提升工业通信的效率与可靠性,推动工业互联网的发展。

参考文献:

[1] 工业和信息化部. 5G+工业互联网发展白皮书[R]. 北京:中国信通院,2020.

[2] 张建雄,徐敏捷,金斐斐,等. 智能制造体系架构分析与工业互联网应用[J]. 电信技术,2016(5):28-31,34.

[3] 赵兴龙,陈炜昀,王玆达. 工业无线网络技术在工业互联网中的应用研究[J]. 邮电设计技术,2024(11):12-18.

[4] 周晋,李建军,王锐. 工业物联网无线化趋势浅析[J]. 物联网技术,2021,11(6):84-86.

[5] 孙盈. 5G关键技术探究[J]. 数字通信世界,2023(12):38-39,104.

[6] 刘珊,黄蓉,王友祥. 5G uRLLC技术应用[J]. 移动通信,2022,46(2):55-60.

[7] 梁辉,韩潇,李福昌. 5G uRLLC端到端关键技术分析[J]. 移动通信,2020,44(8):12-16.

[8] 梁健生,陈晓冬. uRLLC关键技术研究与时延分析[J]. 移动通信,2020,44(2):35-39,44.

[9] 许森,信金灿. 面向低时延高可靠的5G uRLLC增强技术研究[J]. 移动通信,2019,43(9):62-67.

[10] 黎卓芳,刘慧敏,解博森. 5G高可靠低时延通信标准现状及产业进展[J]. 信息通信技术与政策,2022(4):37-42.

[11] 张志文. Modbus-RTU通讯协议在油田物联网建设中的研究与应用[J]. 油气田地面工程,2024,43(10):68-74.

[12] 周学良. CC-Link IE TSN推动工业物联网发展[J]. 中国仪器仪表,2019(11):69-71.

[13] 郭翠娟,李中原,荣锋. PROFINET-Modbus通信网关的设计[J]. 仪表技术与传感器,2020(9):121-126.

[14] 包琅允,康孝. 5G uRLLC在配电网场景的应用方案[J]. 邮电设计技术,2023(3):67-71.

[15] 陈林,刘重军,杨波. 垂直行业5G QoS解决方案研究[J]. 通信技术,2021,54(7):1683-1689.

作者简介:

陈德进,工程师,主要负责5G终端设计及开发工作;王丽波,助理工程师,主要负责无线网络优化、园区网络架构工作;卜小琳,工程师,主要负责无线网络优化、园区网络架构工作;王红军,高级工程师,主要从事云计算、网络及网络安全、北斗规模化应用工作;安伟,高级工程师,主要从事无线网络优化与网络维护工作;姜元山,高级工程师,主要负责5G终端创新及研发工作。