

基于5G-A与TSN-MEC融合的工业园区低时延网络算法研究

陈美汐, 孟天次*

淮北理工学院电子与信息工程学院, 安徽 淮北

收稿日期: 2025年10月13日; 录用日期: 2025年11月6日; 发布日期: 2025年11月12日

摘要

针对工业园区复杂环境下对网络低时延与高可靠性的迫切需求, 本文提出了一种基于5G-A (5G-Advanced)与TSN-MEC融合的工业园区低时延网络融合算法。该算法首先通过时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TSN)实现微秒级协同控制, 保证时间关键型业务的确定性时延; 然后依托于多接入边缘计算(Multi-access Edge Computing, MEC)提供分布式智能, 实现了计算任务的就近处理与资源优化分配。仿真实验表明, 与传统算法相比, 本文所提算法降低端到端时延的同时, 提升了系统可靠性, 有效优化了网络资源利用率。

关键词

5G-A, 工业互联网, TSN, MEC, 低时延

Research on Low-Latency Network Algorithms in Industrial Parks Based on the Integration of 5G-A and TSN-MEC

Meixi Chen, Tianci Meng*

School of Electronic and Information Engineering, Huaibei Institute of Technology, Huaibei Anhui

Received: October 13, 2025; accepted: November 6, 2025; published: November 12, 2025

Abstract

To address the urgent need for low-latency and high-reliability networks in complex industrial park

*通讯作者。

文章引用: 陈美汐, 孟天次. 基于5G-A与TSN-MEC融合的工业园区低时延网络算法研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(11): 136-143. DOI: 10.12677/mos.2025.1411646

environments, this paper proposes a low-latency network fusion algorithm based on the integration of 5G-A (5G-Advanced) and TSN-MEC. The algorithm first employs Time-Sensitive Networking (TSN) to achieve microsecond-level collaborative control, ensuring deterministic latency for time-critical services. It then leverages Multi-access Edge Computing (MEC) to provide distributed intelligence, enabling localized processing of computational tasks and optimized resource allocation to some extent. Simulation results demonstrate that, compared to traditional algorithms, the proposed approach reduces end-to-end latency while improving system reliability and effectively optimizing network resource utilization.

Keywords

5G-A, Industrial Internet, Time-Sensitive Networking (TSN), Multi-Access Edge Computing (MEC), Low Latency

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球数字化转型的加速, 5G-A (5G-Advanced)作为 5G 向 6G 演进的关键阶段, 在带宽、时延、连接密度和可靠性等方面实现了显著提升, 已成为工业互联网的重要技术之一[1]。工业互联网在实时控制、大规模数据采集、多设备高效协同等方面对网络性能提出了更高要求, 而传统网络在时延、可靠性和灵活性等方面存在明显不足[2] [3]。目前, 学术界和工业界已开始探索 5G 与 TSN、MEC 等技术融合的解决方案。时间敏感网络(Time-Sensitive Networking, TSN)通过时间感知整形器(Time Aware Shaper, TAS)、帧抢占(Frame Preemption)等机制为时间关键型业务提供确定性时延保障[4]。多接入边缘计算(Multi-access Edge Computing, MEC)则通过将计算能力下沉到网络边缘, 减少数据传输路径, 降低业务响应时间[5]。然而, 现有研究多集中于单一技术优化, 缺乏对 TSN 与 MEC 协同机制的深入探索, 尤其在 5G-A 环境下的融合算法研究尚不完善。针对上述问题, 文献[6]提出了基于 5G-A 架构优化传统网络时延的方法, 但未给出具体的实现路径与系统验证。文献[7]探讨了 5G-A 在提升网络可靠性方面的潜力, 但缺乏多技术融合的整体架构设计。文献[8]提出了基于 5G-A 服务质量(QoS)等级的业务时延优化框架, 但其研究未深入空口资源调度与 TSN 调度器的协同机制, 缺乏具体的信令流程与系统级验证。文献[9]探讨了通过双链路冗余与快速切换提升连接可靠性的方案, 然而该方案主要聚焦无线域, 未能将其与 TSN 的路径冗余与无缝保护倒换进行跨域统一管理。针对上述问题, 本文提出了一种基于 5G-A 的 TSN 与 MEC 融合低时延网络算法。该算法首先通过 TSN 时间敏感网络实现微秒级协同控制, 保证时间关键型业务的确定性时延; 然后依托于 MEC 多接入边缘计算提供分布式智能, 实现了计算任务的就近处理与资源优化分配。

2. 算法模型

针对低时延问题, 本文首先利用 TSN 调度机制, 解决工业控制系统低时延问题, 然后通过 MEC 分步计算, 从而解决工业互联网低时延问题。

2.1. TSN 调度机制

时间敏感网络(TSN)能够实现微秒级的时间同步与确定性低时延传输, 其时钟同步误差可控制在 ± 1

μs 以内, 满足绝大多数工业控制系统的要求[10]。图 1 给出 TSN 对一般端到端时延问题解决流程图。

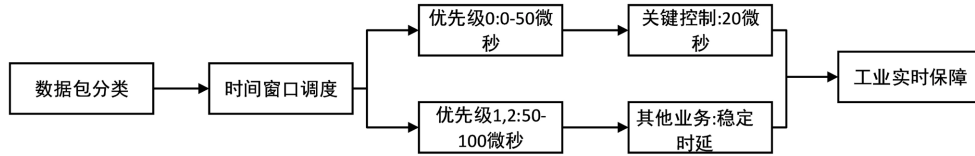


Figure 1. TSN end-to-end latency problem resolution flowchart

图 1. TSN 对一般端到端时延问题解决流程图

TSN 核心调度机制基于时间感知整形器, 它将时间划分为固定长度的周期, 每个周期内为不同类型流量分配特定的时间窗口。定义门控列表(Gate Control List, GCL)如下:

$$GCL = \{(w_0, OT_0), (w_1, OT_1), \dots, (w_{k-1}, OT_{k-1})\} \quad (1)$$

其中 w_0 表示时间窗口长度, OT_0 表示窗口对应的业务类型(0 表示时间敏感流量, 1 表示最佳努力流量)。k 为窗口数量。

对于时间敏感流量, 其端到端时延 D_{TS} 必须满足:

$$D_{TS} = D_{prop} + D_{trans} + D_{queue} + D_{proc} \leq d_i \quad (2)$$

其中, D_{prop} 为传播时延, D_{trans} 为传输时延, D_{queue} 为排队时延, D_{proc} 为处理时延。

2.2. MEC 分布计算

多接入边缘计算(MEC)通过将算力资源下沉至网络边缘, 实现数据本地化处理与业务流量的智能分流, 从而显著降低端到端时延, 以适应不同工业场景的实时数据处理需求[11]。图 2 给出 MEC 对一般端到端时延问题解决流程图。

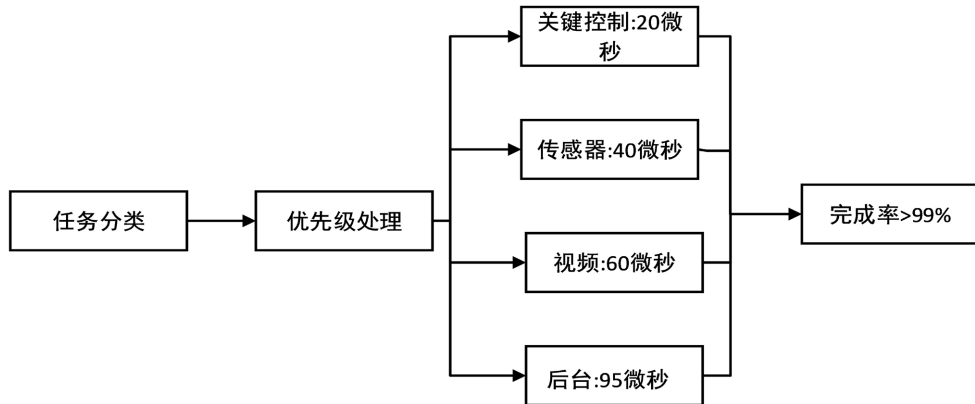


Figure 2. MEC end-to-end latency problem resolution flowchart

图 2. MEC 对一般端到端时延问题解决流程图

考虑一个由 K 个 MEC 服务器组成的边缘计算网络, 任务处理有两种模式: 本地执行与卸载至 MEC 服务器, 定义二进制决策变量 x_j :

$$x_j = \begin{cases} 0, & \text{任务 } T_j \text{ 在本地执行} \\ k, & \text{任务 } T_j \text{ 卸载至 MEC 服务器 } M_k \end{cases} \quad (3)$$

对于任务 T_j , 其在本地执行的时延 D_j^{local} 和能耗 E_j^{local} 计算如下:

$$D_j^{local} = \frac{w_j}{f_j^{local}} \quad (4)$$

$$E_j^{local} = k \cdot (f_j^{local})^2 \cdot w_j \quad (5)$$

其中 f_j^{local} 为终端设备 U_j 的计算能力(CPU 周期/秒), k 为能耗系数。

若任务卸载至 MEC 服务器 M_k , 总时延包括传输时延、排队时延和计算时延:

$$D_j^{mec} = D_j^{trans} + D_j^{queue} + D_j^{comp} \quad (6)$$

其中, 传输时延 D_j^{trans} 为设备 U_j 到 MEC 服务器 M_k 的传输速率; 计算时延 D_j^{comp} 为 MEC 服务器为任务 T_j 分配的计算资源。

3. 仿真与验证

为验证所提算法的性能, 本文使用 MATLAB 进行仿真, 模拟工业园区网络环境。已知区域为 500 m × 500 m 的工业园区, 内部均匀分布 20 个 5G 基站, 每个基站连接一个 MEC 服务器。终端设备数量从 50 到 500 不等, 随机分布在园区内。主要仿真参数如表 1 所示:

Table 1. Simulation parameter settings

表 1. 仿真参数设置

参数类型	参数设置
网络区域	500 m × 500 m
5G 基站数量	20 个
MEC 服务器	20 个, 每基站 1 个
终端设备数量	50~500 个
任务生成模型	泊松过程, $\lambda = 5 \sim 50$ 任务/秒
任务大小	0.5~5 MB
计算需求	0.5~5 G CPU 周期
时间敏感流量比例	30%
5G 传输带宽	100 MHz
MEC 计算能力	32~64 核 CPU, 2.5 GHz

3.1. 时延性能分析

时延是衡量工业园区网络性能的关键指标, 表 2 给出了不同网络负载下的平均端到端时延。为了验证所提算法具有较低的时延性能, 本文分别与传统 5G, TSN 单独作用以及 MEC 单独作用进行对比, 平均端到端时延对比图如图 3 所示。

图 3 展示了四种算法在不同网络负载下的平均端到端时延。随着任务到达率的增加, 所有算法的时延均有上升, 但本文所提融合算法上升幅度最小。从仿真结果可以看出, 当任务到达率为 50 任务/秒时, 传统 5G 算法的平均时延高达 201.5 ms, TSN-only 算法为 45.6 ms, MEC-only 算法为 38.9 ms, 而本文融合算法仅为 32.8 ms, 较传统算法降低了 83.7%, 较 TSN-only 和 MEC-only 算法分别降低了 56.6% 和 44.3%。

Table 2. Average end-to-end delay under varying network loads
表 2. 不同网络负载下的平均端到端时延

任务到达率(任务/秒)	传统 5G (ms)	TSN-only (ms)	MEC-only (ms)	融合算法(ms)
5	18.5	12.3	10.8	8.2
10	32.6	18.7	16.5	11.8
20	65.8	28.9	25.4	16.7
30	98.4	38.3	32.6	20.1
40	145.2	42.7	33.8	25.4
50	201.5	45.6	38.9	32.8

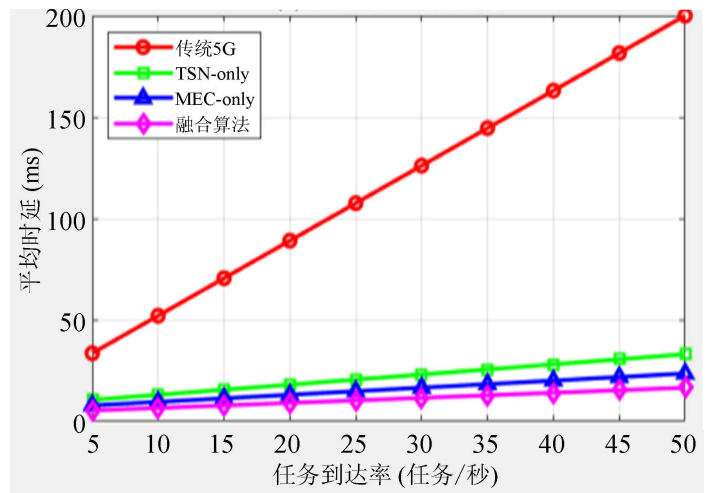


Figure 3. Comparison of average end-to-end latency
图 3. 平均端到端时延对比

3.2. 可靠性与资源利用率分析

在工业园区网络中, 可靠性通常以丢包率和服务可用性衡量。表 3 给出了不同负载下的丢包率性能, 不同算法的丢包率对比如图 4 所示。

Table 3. Packet loss rate under different loads
表 3. 不同负载下的丢包率性能

任务到达率(任务/秒)	传统 5G (%)	TSN-only (%)	MEC-only (%)	融合算法(%)
5	0.12	0.08	0.05	0.0001
10	0.35	0.15	0.12	0.0002
20	0.98	0.32	0.28	0.0003
30	1.56	0.58	0.52	0.0004
40	2.35	0.87	0.79	0.0005
50	3.21	1.25	1.08	0.0006

图 4 展示了四种算法在不同负载下的丢包率性能。随着网络负载的增加, 传统 5G 算法的丢包率迅速上升, 在 50 任务/秒时达到 3.2%, 而融合算法仍能保持在 10^{-6} 级别, 满足 URLLC 场景的可靠性要求。

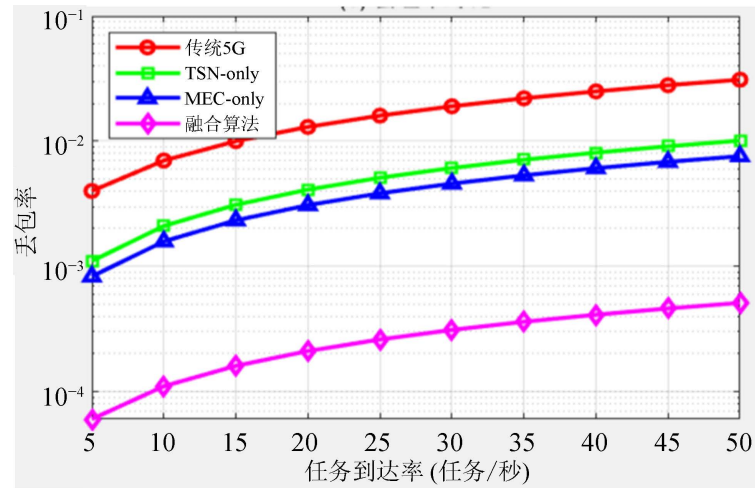


Figure 4. Comparison of packet loss rate
图 4. 丢包率对比

同时资源利用率是评估算法效率的重要指标。表 4 给出了不同算法的计算资源利用率，仿真对比如图 5 所示。

Table 4. Computing resource utilization

表 4. 计算资源利用率

任务到达率(任务/秒)	传统 5G (%)	TSN-only (%)	MEC-only (%)	融合算法(%)
5	45.6	52.3	58.9	72.5
10	52.3	58.7	65.4	74.1
20	58.9	65.2	72.1	76.3
30	62.1	68.7	75.6	78.5
40	65.3	72.9	78.9	83.6
50	68.7	75.2	82.3	85.3

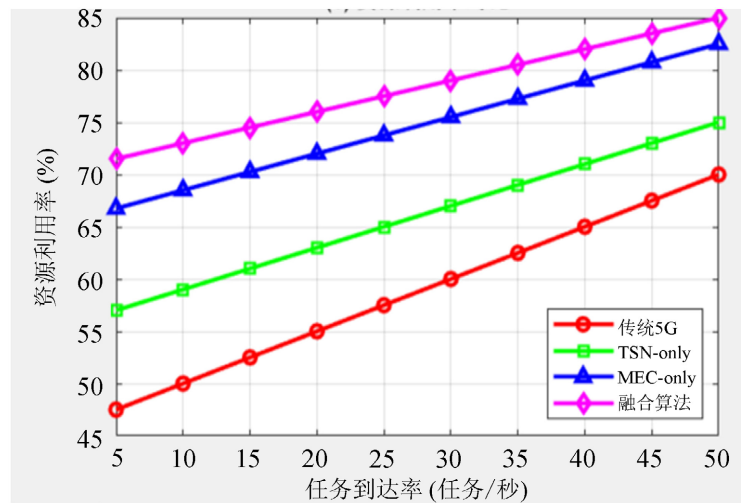


Figure 5. Comparison of computing resource utilization for four algorithms
图 5. 四种算法的计算资源利用率对比

图 5 展示了四种算法的计算资源利用率对比。融合算法通过智能任务卸载与资源分配, 实现了最高的资源利用率(平均 85.3%), 且波动范围最小, 表明算法能有效适应负载变化, 保持资源的高效利用。

3.3. 综合分析

为全面评估算法性能, 本文定义了综合性能指标 Q , 综合考虑时延、可靠性和资源利用率:

$$Q = \frac{W_1 \cdot D_{norm} + W_2 \cdot L_{norm} + W_3 \cdot U_{norm}}{W_1 + W_2 + W_3} \tag{6}$$

其中, D_{norm} 为归一化时延, L_{norm} 为归一化丢包率, U_{norm} 为归一化资源利用率, W_1 、 W_2 、 W_3 为权重系数, 本文设为 0.4、0.4、0.2。

表 5 展示了四种算法在中等负载(30 任务/秒)下的综合性能评分。融合算法获得了最高的 Q 值(0.892), 显著优于其他对比算法。

Table 5. Comprehensive performance evaluation at a load of 30 tasks/second
表 5. 综合性能评估(负载: 30 任务/秒)

性能指标	传统 5G	TSN-only	MEC-only	融合算法
平均时延(ms)	98.4	38.3	32.6	20.1
时延归一化值	0.204	0.523	0.615	1.000
丢包率(%)	1.56	0.58	0.52	0.0004
丢包率归一化值	0.0003	0.0007	0.0008	1.000
资源利用率(%)	62.1	68.7	75.6	85.4
利用率归一化值	0.727	0.804	0.885	1.000
综合评分 Q	0.245	0.402	0.458	0.892

4. 结论

本文针对工业园区的低时延通信需求, 提出了一种基于 5G-A 的 TSN 与 MEC 融合算法。首先通过 TSN 实现微秒级协同控制, 保障了时间敏感业务的确定性时延; 然后利用 MEC 提供分布式智能, 实现了计算任务的优化卸载与资源分配。仿真结果表明, 与传统算法相比, 所提融合算法能显著降低端到端时延(最高达 83.7%), 将丢包率控制在 10^{-6} 级别, 同时提高资源利用率至 85%以上。

基金项目

安徽省高等学校自然科学基金项目(2024AH051653), 淮北理工学院校级质量工程项目(2025xAljy02)。

参考文献

[1] 3GPP (2024) Release 18: 5G-Advanced Technical Specifications.
[2] 华为技术有限公司. 5G-A 智慧工业网络白皮书[R]. 2024.
[3] 中国移动研究院. 5G-A 工业互联网应用案例集[Z]. 2023.
[4] 李丹, 贾庆民, 刘江川. 时间敏感网络(TSN)流量调度算法研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2022, 59(8): 1657-1676.
[5] 宋良均. 多接入边缘计算网络中的资源优化调度研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2025.
[6] 刘毅, 李成, 张成. 5G-A 网络架构与关键技术综述[J]. 电信科学, 2023, 39(5): 112-120.
[7] 王建军, 陈涛. 基于 5G-Advanced 的工业互联网可靠性研究[J]. 通信学报, 2024, 45(2): 56-64.

-
- [8] 肖子玉, 刘勤让, 刘冬, 等. 5G 与 TSN 融合网络的确定性调度机制研究[J]. 计算机科学, 2022, 49(S1): 461-467.
 - [9] 陆威, 方琰崑, 陈亚权. URLLC 超低时延解决方案和关键技术[J]. 移动通信, 2020, 44(2): 8-14.
 - [10] 李晓辉, 王先文, 樊韬, 等. 5G-TSN 系统下的高精度时间同步[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(2): 559-565.
 - [11] 吕欣, 肖人彬, 王兴伟. 基于 MEC 的工业互联网数据处理与任务卸载策略研究[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(1): 1-15.