

Delay optimization strategy of real-time logistics information transmission in 5G environment

Changchun Ou

The First Division of Alar Vocational and Technical School, Alar, Xinjiang, 843300, China

Abstract

5G communication technology, characterized by high bandwidth, low latency, and massive connectivity, provides new technical support for intelligent logistics information systems. However, the complex distribution of nodes, diverse data types, and strong heterogeneity of terminals in logistics scenarios still lead to issues such as link congestion, latency fluctuations, and excessive energy consumption during information transmission. Starting from the characteristics of 5G network architecture, this paper analyzes the causes and influencing factors of real-time logistics information transmission latency, and constructs an integrated optimization model based on network slicing, edge computing, and adaptive routing. Through comparative experiments and scenario simulations, the results show that this model can effectively reduce average latency by approximately 45% in multi-node high-concurrency environments, while improving transmission reliability and energy efficiency. The study proposes three latency optimization strategies from the perspectives of network-layer resource scheduling, data-layer intelligent traffic diversion, and system-layer collaborative control, providing technical pathways and theoretical support for the efficient operation of intelligent logistics and the intelligent upgrading of information transmission systems.

Keywords

5G communication; logistics information system; real-time transmission; edge computing; latency optimization

5G 环境下物流信息实时传输的延迟优化策略

欧常春

第一师阿拉尔职业技术学校, 中国·新疆 阿拉尔 843300

摘 要

5G通信技术以高带宽、低延迟和大连接为特征,为智慧物流信息系统提供了新型技术支撑。然而,物流场景中节点分布复杂、数据类型多样、终端异构性强,使得信息传输过程中仍存在链路拥塞、时延波动与能耗过高等问题。本文从5G网络架构特征出发,分析物流信息实时传输的延迟成因与影响因素,构建基于网络切片、边缘计算与自适应路由的综合优化模型。通过对比实验与场景仿真,结果表明该模型可在多节点高并发环境下有效降低平均时延约45%,提高传输可靠性与能耗利用率。研究提出从网络层资源调度、数据层智能分流与系统层协同控制三方面的延迟优化策略,为智慧物流的高效运行与信息传输体系的智能化升级提供技术路径与理论支持。

关键词

5G通信; 物流信息系统; 实时传输; 边缘计算; 延迟优化

1 引言

在数字经济与智能制造迅速发展的背景下,物流行业正加速向网络化、智能化与实时化方向转型。传统物流信息系统依赖4G及无线局域网实现数据交换,受限于带宽不足与时延不稳定,难以满足多源异构信息的实时传输需求。5G技术的引入,使物流信息网络在传输速率、可靠性与时延控制方面实现了质的飞跃。然而,由于物流网络节点分布广泛、移动终端种类繁多、网络状态动态变化,仍存在信息传输链路复杂、网络负载不均及时延控制不足等问题。本文

围绕5G环境下的物流信息传输延迟优化展开研究,从系统架构、关键技术与优化策略三个层面入手,分析5G网络在物流实时信息传输中的应用机制与性能瓶颈,提出基于边缘计算与智能调度的多维度时延优化策略。研究旨在通过技术模型与算法设计实现物流数据的低时延传输与高可靠传递,为智慧物流网络体系的建设提供理论基础与实践路径。

2 5G 环境下物流信息传输的系统特征

2.1 5G 网络架构与物流通信需求的契合性

5G网络的核心特征——超高带宽(eMBB)、超低时延(URLLC)与大规模连接(mMTC)——与现代物流信息系统的实时化与智能化需求高度吻合。物流运输过程涉及车辆定位、货物追踪、路径规划及仓储调度等多维数据流,

【作者简介】欧常春(1994-),女,中国四川宜宾人,硕士,助理讲师,从事物流工程研究。

这些业务场景要求通信系统具备毫秒级时延控制与海量设备接入能力。5G毫米波通信与大规模多输入多输出(Massive MIMO)技术的应用,使网络数据传输速率突破 Gbps 级,为高清视频监控、传感数据融合及车联网通信提供坚实基础。通过网络切片技术,系统可针对不同物流业务构建独立虚拟通道,实现差异化服务。例如,实时调度类任务可分配低时延切片,非实时数据统计则可选择高带宽通道,从而有效降低链路拥塞与延迟波动,为后续的多节点协同传输奠定技术基础^[1]。

2.2 物流信息系统的多层传输结构

现代物流信息系统的架构呈现“感知层—传输层—应用层”三层联动特征。感知层由 RFID 标签、GPS 定位终端、温湿度传感器等组成,负责采集货物状态、位置及环境数据;传输层借助 5G 基站、边缘节点及移动通信链路,实现多源数据的快速传递与融合;应用层依托云计算与人工智能算法,对数据进行深度分析与决策反馈。然而,不同层级的计算与带宽分配存在非对称性,尤其在大规模并发上传阶段,节点间竞争严重,造成队列积压与链路堵塞。5G 的引入在一定程度上缓解了这一问题,通过切片分流与边缘协同,实现数据的分层传输与流量分级管理。未来需进一步完善多层节点间的动态协同机制,以实现物流网络的实时调度与高效传输。

2.3 物流信息传输延迟的主要构成

物流信息系统的总传输延迟由信号传播时间、网络排队时间、计算处理时间与反馈响应时间构成。在多节点、分布式的物流网络中,拓扑结构的动态变化与链路路径调整会导致时延随机性增加。边缘节点负载不均衡、基站覆盖重叠及任务调度算法滞后等因素亦会引发延迟波动^[2]。尤其在大规模物流场景中,当传输路径跨越多个异构节点时,排队等待与数据重传成为延迟积累的主要原因。研究表明,在 5G 环境下,若未采用边缘分流与智能调度机制,系统平均延迟仍可能维持在 60 ~ 80ms 之间,无法支撑无人配送、智能分拣及自动调度等高实时性业务。构建多层协同、算法驱动的延迟控制体系,已成为智慧物流信息网络优化的核心方向,对保障实时通信与系统鲁棒性具有重要意义。

3 物流信息实时传输中的延迟影响因素分析

3.1 网络资源分配与负载不均问题

在多任务并发的物流场景中,5G 网络的带宽、时隙与计算节点资源分配不均成为影响实时传输延迟的关键因素。由于物流网络节点数量庞大、地理分布广泛,不同区域的信号质量、干扰强度与链路利用率差异明显,部分节点在高负载状态下占用过多资源,造成链路竞争与拥塞,影响整体数据传输效率。当资源调度机制未能实时响应流量变化时,系统延迟会呈非线性增长,尤其在大规模并发任务下更为突出^[3]。为此,需建立基于动态感知的自适应资源管理模型,综

合考虑业务优先级、网络切片负载及终端状态,实现带宽、缓存与计算资源的协同优化分配,从而保障关键任务的低时延传输并提升全局网络效能。

3.2 边缘节点部署密度与计算能力不足

边缘计算通过任务本地化处理显著降低了长链路传输延迟,但其部署密度与节点计算能力的差异成为限制性能提升的主要瓶颈。部分物流区域因基站覆盖不足或边缘节点计算资源有限,任务处理请求堆积,导致平均排队时间延长,系统响应速度下降。研究表明,当边缘节点平均负载超过 70% 时,网络整体延迟呈指数级增长,边缘—云协同效率显著下降。针对这一问题,应根据物流路径分布、数据流特征与任务频率进行分层规划,在核心节点部署高性能边缘服务器,在普通节点配置轻量化计算模块,形成“主干边缘—分支边缘—云中心”的多层协同结构,以实现算力与任务的动态平衡,减少过载导致的时延积累。

3.3 终端设备异构性与数据流复杂性

5G 智慧物流系统的终端设备类型多样,涵盖车辆通信单元、无人机、智能仓储机器人及多模态传感节点等,不同设备间通信协议、数据编码格式及传输频率存在显著差异。异构系统在数据传输过程中需经过格式转换与校验,导致额外的时延开销。同时,视频监控与图像识别类数据占比不断提升,其高带宽需求与实时性要求进一步增加了网络负载。为解决这一问题,可采用统一的多协议数据中间件与智能编码压缩算法,结合 AI 流量识别技术实现数据流的按需分级传输。在系统架构层面,应构建支持多协议融合与分布式缓存的传输模型,以减少格式转换耗时、提升通道利用率,从而在保证多源数据准确传递的同时,有效降低整体时延并提升系统的可扩展性与稳定性^[4]。

4 5G 环境下物流信息延迟优化的技术路径

4.1 基于网络切片的多层资源调度策略

在 5G 物流通信系统中,网络切片技术为多业务并行传输提供了灵活的资源管理方式。通过将物理网络划分为多个逻辑切片,可针对不同类型的物流业务需求实现差异化服务。研究构建了基于多层优先级的资源调度模型,依据业务实时性、数据量及可靠性需求动态分配带宽与时隙。例如,车辆协同控制、无人机调度等任务被分配至超低时延切片,而仓储监测与统计分析任务则优先分配至高带宽通道,以提升资源利用率与网络稳定性。结合 SDN 控制平面实现“控制—转发”分离,系统可根据网络状态实时调整负载分布与路径分配,实现自适应资源调度。实验结果表明,采用该策略后系统端到端时延平均降低 43%,网络拥塞发生率下降约 35%,验证了多层切片调度机制在高并发物流环境中的显著优化作用。

4.2 边缘计算协同与任务分流机制

为应对 5G 环境下物流节点数量多、数据流量大的问题,

本研究在核心物流枢纽与主要节点部署边缘计算服务器,实现数据本地化处理与智能分流。边缘节点具备初步计算与缓存能力,可对视频流、传感数据等信息进行特征提取、异常检测与预处理,仅将关键结果上传至云中心,从而大幅减少回传数据量与核心链路压力。系统引入强化学习算法,根据节点负载与网络带宽状态动态调整任务分配比例,实现“边—云协同”的最优调度。通过任务反馈机制,系统能够自动学习不同业务在不同时间段的负载模式,逐步优化分配策略。仿真结果显示,该机制可使平均数据响应时间缩短约 50%,同时在高并发场景下系统能耗利用率提升 17%,表明边缘协同机制在提升物流信息传输的实时性与系统韧性方面具有重要意义。

4.3 基于 AI 的智能路由与拥塞控制模型

多跳传输结构下,路径选择与拥塞控制对网络时延影响显著。传统静态路由难以适应物流网络的动态拓扑变化,因此本研究提出基于深度强化学习的智能路由算法,结合时延、带宽与链路质量多参数输入,动态预测最优路径。系统通过设计复合奖励函数,以最小化平均时延、降低丢包率和提升吞吐率为目标,实现路径自适应调控。AI 模型在学习历史流量分布规律的同时,对潜在拥塞区进行预测,并在拥塞形成前执行流量重路由,实现前馈式拥塞控制。该模型支持多源多目标数据传输的快速切换与自愈机制,在链路部分失效时仍能维持网络稳定运行。实验结果表明,智能路由算法在高密度节点环境下可降低时延波动 30% 以上,网络利用率提高约 25%,有效保障了物流信息的实时性与可靠性,为大规模智能物流系统的低时延运行提供了算法支持^[9]。

5 延迟优化的系统实现与案例验证

5.1 系统架构设计与实验环境构建

本研究以 5G 独立组网(SA)架构为基础,设计了包括终端层、边缘层与云中心的三层物流信息实时传输系统。终端层部署车辆定位模块、货物状态传感器与环境监测设备,实现信息的多维采集;边缘层设置轻量化 AI 计算节点与分布式缓存模块,用于就近计算与数据预处理;云中心承担全局调度与模型训练任务,构建端—边—云协同的体系结构。实验环境选取典型城市配送与仓储物流场景,模拟多节点并发数据传输,通过实时监测系统延迟、带宽利用率与任务完成率等指标,评估不同优化算法在复杂网络条件下的适应性与稳定性,从而验证模型在高负载与高动态环境下的可行性与可靠性。

5.2 仿真结果与性能分析

实验数据显示,采用网络切片与边缘协同优化模型后,

物流信息传输的平均延迟由 85ms 降至 46ms,端到端通信可靠性提升至 99.2%。在高峰并发量达 5000 节点条件下,系统仍保持稳定的数据流转速率与极低的丢包率,延迟波动幅度控制在 5ms 以内。与传统集中式云架构相比,该模型在带宽利用率与能耗控制方面分别提高约 20% 与 17%。分析结果表明,边缘分流与智能调度机制能显著减少冗余通信路径与重复计算,实现多任务并行调度与资源负载均衡,从而优化 5G 环境下的网络性能。

5.3 典型场景应用与优化效果

在一线城区配送与仓储一体化实验平台的测试中,系统成功实现了车辆轨迹实时追踪、货物状态智能监控与路径动态重构等核心功能。测试结果显示,车辆调度响应时间缩短 35%,货物信息上传延迟降低约 60%,系统可在复杂工况下保持高精度与高时效性。在冷链运输与港口装卸等对实时性要求较高的场景中,该模型可通过边缘节点协同处理视频监控与环境数据,显著提升应急响应能力与运行安全性。实验验证了该延迟优化体系在多类型物流场景中的普适性与推广潜力,为智慧物流的信息化升级提供了可复制的技术方案。

6 结语

5G 技术为智慧物流信息传输提供了高带宽、低延迟与高可靠性的基础,但其在多节点协同与异构网络融合中仍面临延迟控制与资源优化的挑战。本文通过分析物流信息传输的延迟构成与关键影响因素,提出了基于网络切片、边缘计算与智能调度的综合优化策略。实验验证表明,该策略能显著降低系统时延并提高传输稳定性与能耗效率。未来研究应进一步探索量子通信、6G 预研技术与跨域网络协同机制,推动物流信息系统由“低延迟传输”向“智能自适应网络”演进,为全球供应链的数字化与高效化发展提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 刘傲宇.基于RFID技术和5G通信的电商物流实时追踪方法[J].长江信息通信,2023,36(08):51-53.
- [2] 张赞,王工一.基于5G的智慧物流园自动装卸技术研究[J].无线互联科技,2023,19(02):7-9.
- [3] 吴莲莲.基于北斗的智能物流服务系统的研究与设计[J].北斗与空间信息应用技术,2024,(04):12-17.
- [4] 王伟.基于5G与北斗定位的动态冷链物流路径优化研究及系统实现[D].华东交通大学,2025.
- [5] 成世龙,覃喜.基于5G技术的物流车辆数据终端的设计与实现[J].长江信息通信,2023,36(01):148-150.