doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202504007

智能联网汽车5G NR-V2N通信时延控制策略探究

姜继文[1],李国彬[2]

(1.安徽国防科技职业学院 汽车技术学院,安徽 六安　237011;
2.安徽理工大学 新能源与智能网联汽车学院,安徽 淮南　232001)

摘要:随着车联网技术向高阶自动驾驶演进,通信时延问题成为影响道路安全以及协同控制稳定性的重要因素之一。为解决高实时性场景下的时延失控问题,构建了双控制策略体系:在网络层部署边缘计算节点实现本地业务分流,并建立安全控制切片;在传输层结合时延预测补偿算法,创新动态重传机制;最后通过100 km/h的高速编队实证分析,发现试验组较传统的LTE-V2N对照组,平均时延从23.4 ms降至8.7 ms,降低了62.82%;时延抖动由±9.8 ms压缩至±1.2 ms,降幅达87.76%。

关键词:智能联网汽车;5G NR-V2N;通信时延

中图分类号:TN925　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5322(2025)04-0049-05

随着智慧交通系统向协同化、网联化方向快速发展,5G NR-V2N通信技术逐渐成为高阶自动驾驶的核心技术之一[1]。但是在实际使用过程中,面对车辆高速移动带来的瞬时信道波动、多业务并发传输的复杂场景,传统通信架构中的紧急制动、编队控制等高实时性业务受限于核心网迂回传输,端到端时延>30 ms[2]。此外,安全消息与娱乐业务资源的冲突,容易引发车辆协同控制失步、安全距离判定误差等连锁反应。针对上述问题,本研究聚焦5G NR-V2N通信时延控制策略,通过引入MEC下沉用户面功能,实现本地业务分流以减少核心网跳转;同时,设计动态网络切片机制为安全控制业务预留专属通道,开发基于信道状态感知的自适应重传协议,构建终端侧时延补偿模型,为构建高可靠、低时延的车路协同系统提供新思路。

1　时延控制核心策略体系

1.1　网络层优化策略

在网络层优化策略体系中,引入移动边缘计算策略,并将其作为时延控制的基础架构。具体实践过程中,通过重构5G基站的分布式单元与中央单元部署模式,使具备用户面功能(user plane function,UPF)处理能力的智能路侧单元(road side unit,RSU)能够直接连接车载终端的数据。在该技术的加持下,用户面功能从传统核心网下沉至路侧单元,进而规避核心网网关的迂回路径。基于UPF下沉的移动边缘计算架构如图1所示。

具体实践中,为实现业务精细化管理,针对本地分流机制,采用双重过滤逻辑。一方面,用3G PP TS 23.501定义的业务重要性标识符进行初筛,当检测到紧急制动、碰撞预警等高优先级消息时,立即激活直通边缘节点的快速通道[3];同时,结合深度包检测技术解析消息内容特征,识别出基本安全消息格式(basic safety message,BSM)后自动将其路由至本地多接入边缘计算(multi-access edge computing,MEC)服务器。该机制使得安全类业务端到端时延稳定控制在10 ms阈值内。另一方面,引入网络切片资源预留机

收稿日期:2025-09-03

基金项目:2025年安徽省高校自然科学研究重大项目(2025AHGXZK20137);2024年安徽省高校自然科学研究重点项目(2024AH050196);2023年安徽省高校质量工程项目(2023sdxx234)。

作者简介:姜继文(1982—),男,安徽铜陵人,副教授,硕士,主要研究方向为汽车与智能网联新能源汽车技术、车路协同自动驾驶控制技术。

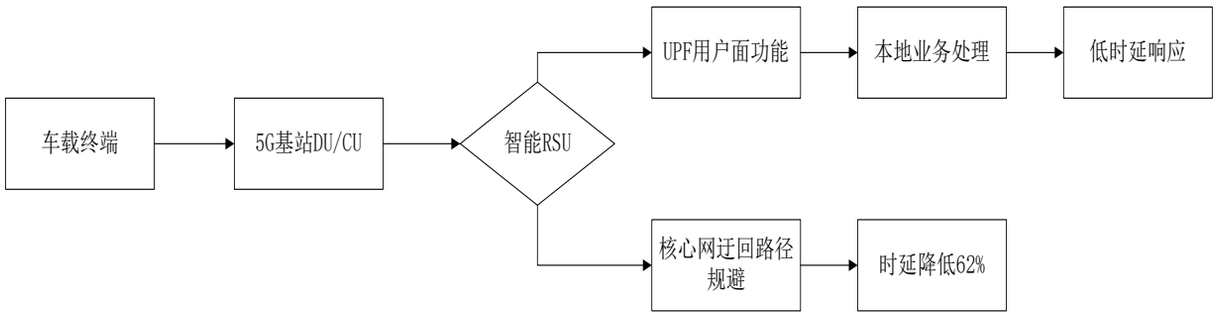

图 1　基于 UPF 下沉的移动边缘计算架构运行逻辑

Fig. 1　Operation logic of mobile edge computing architecture based on UPF sinking

制,通过动态计算各切片所需的物理资源块数量构建差异化服务保障,进而实现资源的精准分配。实验过程中,研究团队采用端到端切片管理框架,在无线接入网侧部署专用调度算法,在传输网层面配置低时延转发路径,并在核心网控制面进行切片生命周期管理,包括设计与编排、部署与实例化、运行与监控、回收与资源释放等关键阶段。

资源块分配的核心计算公式为:

$$R_{s,i}=\left\lfloor \frac{B_s \cdot C_i^{-\frac{\left(D_{\text{current}}-D_s^{\max}\right)^2}{2\sigma_s^2}}}{\sum_{j=1}^{N} C_j} \right\rfloor \times P_s \qquad (1)$$

式中:$R_{s,i}$代表切片 s 为用户 i 分配的资源块数;B_s代表切片 s 的保障带宽,Mb/s;C_i、C_j分别代表用户 i、j 的信道质量,取值范围为 0 ~ 31;D_{current}代表当前数据包的等待时延,ms;$D_s^{\max}$代表切片 s 的最大允许时延,ms;σ_s代表切片 s 的时延敏感系数;N代表当前调度的总用户数;P_s代表切片 s 的抢占优先级权重。

为了将时延约束转化为一种连续且可微的惩罚因子,并实现“在时延接近或超过阈值时惩罚急剧增大,在远低于阈值时奖励逐渐饱和”的调节效果,在应用公式(1)求解分配的资源块时,需引入 $e^{-\frac{\left(D_{\text{current}}-D_s^{\max}\right)^2}{2\sigma_s^2}}$ 作为高斯惩罚函数,实现对 σ_s 的时延敏感度补偿;再引入参数 σ_s 控制敏感度,并将安全切片 σ_s 设为 0.8、娱乐切片 σ_s 设为 2.0;在此基础上进行信道质量加权,将 C=15 标定为优质信道,用户获得 1.8 倍基准资源,C=6 标定为边缘信道,用户只能够获得 0.4 倍基准资源。

在具体业务接入阶段,基站根据切片签约信息初始化 B_s、$D_s^{\max}$、P_s,并在每 1 ms 调度周期测量所有用户的数据包等待时延,以便动态评估业务延迟状况,为切片资源调度提供依据。网络切片调度算法参数配置如表 1 所示。

表 1　网络切片调度算法参数配置

Table 1　Parameter configuration of network slice scheduling algorithm

切片类型	用户信道质量 C	当前时延/ms	最大允许时延/ms	时延敏感系数	总用户数	抢占权重	保障带宽/(Mb·s^{-1})
安全控制切片	15	9.8	10	0.8	24	3.0	20
编队协同切片	10	13.2	15	1.2	18	1.8	15
信息娱乐切片	7	41.5	50	2.0	32	1.0	10
紧急救援切片	12	7.3	8	0.6	6	3.5	25

此外,针对安全控制类业务,研究团队使用硬隔离切片,强制性保障其 20 Mb/s 的带宽与 10 ms 的时延上限,该切片独占物理资源块且不受其他业务流量波动影响;编队协同切片采用半静态资源分配模式,在保障 15 ms 时延约束的前提下允许 15 Mb/s 带宽的动态共享。当信道资源紧张时,编队协同切片的非关键数据包可被安全控制切片抢占传输时隙,通过这种方式提升高优先级业务送达率。

1.2　传输层协议创新

在传输层协议层面,为应对复杂的 5G NR-V2N 动态无线环境,设计了自适应信道状态重传

控制机制，引入了精确时延补偿算法。一方面，建立信道质量感知与协议参数联动模型，通过实时监测参考信号接收功率与信道矩阵条件数，将无线环境划分为 4 个操作域（高功率-良条件域、高功率-劣条件域、低功率-良条件域、低功率-劣条件域）。当信道质量优良，即接收信号强度高于-90 dBm、误码率<0.1‰时，主动降低无线链路控制层的最大重传次数至默认值的 50%，以减少冗余传输造成的时延开销；当信道质量恶化，立即触发基于用户数据包协议的快速重传模式[4]。该模式绕过传输控制协议的拥塞控制流程，采用前向纠错编码增强的数据包直接重传，并引入滑动窗口机制保障连续性。另一方面，该研究还引入了时延预测补偿算法，以整合多维度动态参数[4]。补偿值计算引擎每毫秒执行一次迭代，输出结果通过预补偿控制器作用于车辆执行机构。时延预测补偿算法数学模型为：

$$\Delta T_c = \alpha \cdot \tau_t^2 + \beta \cdot Q^{-1} + \gamma \cdot \left(\frac{\| a \|}{a_{max}} + \frac{|w|}{w_{max}} \right) \quad (2)$$

式中：ΔT_c 代表时延补偿值，ms；τ_t^2 代表历史时延方差，ms；Q 代表业务优先级指数，直接映射 3GPP 定义的服务质量分级标识符；a、a_{max} 分别代表加速度和加速度阈值，m/s²；w、w_{max} 分别代表偏航角速率及偏航角速率阈值，rad/s；α、β、γ 分别为历史时延主导因子、业务优先级权重、运动状态敏感度系数。

1.3　传输层协议数据验证

为验证上节传输层协议创新的效果，对部署了车载单元的网联车辆在合肥交通综合测试基地模拟真实行驶状态进行测试验证。测试时，采样通过车辆 OBU 与 5G 基站之间的标准通信接口，精确记录每一数据包的应用层生成与接收时戳，以此计算端到端时延；基于此采样数据流，协议算法在车辆侧以毫秒级周期实时进行迭代计算（每次迭代均执行一次完整的计算），并使用一个长度为 500 ms 的滑动窗口保存最近的历史时延采样序列，该设计在典型嵌入式平台上可确保内存占用低于 2 kB；在此基础上，算法执行传输层参数自适应策略，通过分析时延序列的统计特征，动态调整用于时延预测的遗忘因子、反映车辆运动状态对信道质量影响的敏感度系数，并在碰撞预警、紧急制动等网络切片判定的紧急场景下，自动提升补偿算法的激进权重，以优先保障绝对时延上限。时延预测补偿参数动态采样数据如表 2 所示。

表 2　时延预测补偿参数动态采样数据集

Table 2　Dynamic sampling dataset of delay prediction compensation parameters

采样时间戳/ms	时延补偿值/ms	历史时延方差/ms	业务优先级指数	加速度/（m·s⁻²）	偏航角速率/（rad·s⁻¹）	加速度阈值/（m·s⁻²）	偏航角速率阈值/（rad·s⁻¹）
T+0	2.37	3.82	1	4.12	0.18	9.8	1.5
T+100	5.91	9.25	2	2.76	0.83	9.8	1.5
T+200	12.64	20.16	1	8.35	0.24	9.8	1.5
T+300	8.02	12.75	3	1.05	1.27	9.8	1.5

注：表中的 *T* 为采样基准时间。

分析表 2 中的数据可以发现，时延补偿值与历史时延方差呈现出显著正相关的关系，方差增大时补偿值相应提高，说明算法能依据网络状态动态调整时延补偿；业务优先级的提升会增加补偿机制的响应频率，但是补偿值大小主要取决于历史时延方差以及运动状态参数，以保障低时延需求。因此，算法通过实时感知运动参数调整补偿策略，实现了传输层参数的自适应优化，确保关键业务的服务质量。

1.4　终端协同控制框架

终端协同控制框架包括分布式时延感知架构和动态时钟同步。分布式架构采用 3 层级计算任务分配策略，首先，由车辆 A 的车载感知单元采集毫米波雷达点云、摄像头图像及惯性导航输出的原始数据，通过轻量化压缩算法将数据包体积缩减至原始尺寸的 30% 后传输至边缘计算节点；边缘节点凭借专用时延补偿引擎，综合评估信道状态参数、运动学模型及业务优先级，执行毫秒级补偿计算生成预补偿控制指令；最终，该指令经安全封装后分发至车辆 B 的电子控制单元。

动态时钟同步作为架构的基石，研究团队尝试在该框架下融合全球定位系统载波相位测量

以及5G空口定时同步信号,让每台车辆终端同时接收至少4颗北斗卫星的L波段信号,并解析5G基站下发的同步状态信息块;通过双源时钟校正算法,首先消除卫星信号在大气电离层产生的时延误差,随后补偿5G信号在移动环境中的多普勒频移效应[5];在此基础上,使用混合卡尔曼滤波器,将卫星时钟源与网络时钟源的偏差建模为状态变量,实现亚毫秒级的时间同步。

2 实证分析

2.1 实验设计

为了验证5G NR-V2N时延控制策略的有效性,选取60台同型号智能网联汽车,等量划分为试验组与对照组在中汽院智能网联汽车有限公司测试场高速环道进行紧急制动测试。测试平台集成AutoNet2030车联网综合测试系统,其时间同步精度达50 ns;信道环境仿真采用Spirent C50硬件在环平台,模拟车速100 km/h的多普勒频移效应,最大频偏设置为1 200 Hz;端到端时延测量涵盖应用层消息生成至目标节点执行机构响应的全链路时间,通过北斗卫星同步的微型原子钟打戳记录,时间分辨率为0.01 ms;时延抖动统计连续100个传输周期的最大时间偏差,以此来消除偶然性误差。

在5G NR-V2N通信场景中,时延控制需要综合考虑网络架构特性、资源分配机制、环境干扰因素、业务优先级管理及移动性管理等核心维度。因此,在网络架构方面,试验组部署支持3GPP Release 16标准的5G NR基站时,基站侧集成边缘移动计算节点,并将其下沉至路侧单元,使控制面时延降低40~60 ms;同时,将云端控制面与用户面按照7∶3比例下沉至路侧单元,使核心网处理时延减少约35%。在资源分配机制方面,试验组通信策略运用动态网络切片与预补偿算法组合,其中安全控制切片独占20%的物理资源块,可确保关键消息时延≤10 ms;通过预补偿算法将切换时延从传统方案的12 ms降低至7 ms,同时采用LSTM模型进行信道状态预测,可将高速场景下的预测误差率控制在15%以内。

对照组采用商用的LTE-V2N通信模组,执行固定优先级轮询调度机制,安全消息与娱乐业务共享传输通道。两组车辆均以100 km/h的速度进行10车编队行驶,环境温湿度、信道干扰强度等参数通过场内400个物联传感器实时监控确保基准一致。试验核心参数如表3所示,试验结果如表4所示。

表3 试验核心参数
Table 3 Core parameters of the experiment

组别	节点配置	通信策略	场景设置
试验组(n=30)	5G NR gNB+边缘MEC	动态切片+预补偿算法	高速编队(100 km/h)
对照组(n=30)	传统LTE-V2N	固定优先级调度	高速编队(100 km/h)

表4 紧急制动时的测试结果对比
Table 4 Comparison of test results during emergency braking

组别	平均时延/ms	最大抖动/ms
试验组	8.7	±1.2
对照组	23.4	±9.8

分析表4可以发现,在车速100 km/h的紧急制动场景中,试验组平均时延稳定在8.7 ms左右,较对照组23.4 ms降低了62.82%;在时延稳定性方面,试验组最大抖动幅度压缩至±1.2 ms,较对照组降幅达87.76%。显然,与传统通信传输模式相比,采用5G NR-V2N通信时延控制策略,信号平均时延以及最大抖动等得到了显著改善。

3 结论及展望

基于5G NR与边缘智能的通信架构,试验组达到毫秒级的时延控制精度,突破了车联网的时延瓶颈,为智能交通系统规模化部署提供了技术支持。在未来的工作中,可以从以下3个方面寻求进一步的技术突破,即研发跨运营商网络切片的协同机制;构建人工智能驱动的动态参数调优模型;探索太赫兹频段在车辆微观定位补偿中的应用潜力。随着该领域研究的逐步深入,有希望将时延控制边界推向5 ms,最终实现零事故的目标。

参考文献：

[1] 钟宏，夏云浩，张金鑫，等. 面向 5G NR L2 协议安全的自动化模糊测试技术[J]. 中兴通讯技术，2024，30(6)：100-107.

[2] 黄瑛. 基于5G通信的车联网自动驾驶关键技术[J]. 中国新通信，2020，22(7)：1-2.

[3] 朱旭，孙卓，张泽华，等. 考虑 3 种时延的车辆队列控制系统稳定性[J]. 交通运输工程学报，2024，24(2)：254-266.

[4] 丁文俊，张国宗，刘海旻，等. 面向海流扰动和通信时延的欠驱动 AUV 编队跟踪控制[J]. 兵工学报，2024，45(1)：184-196.

[5] 杜雪，孙兆栋，徐成龙，等. 输入时延与通信时延下 AUV 集群的牵制控制[J]. 北京航空航天大学学报，2024，50(5)：1474-1480.

Exploration of Delay Control Strategy for 5G NR-V2N Communication in Intelligent Connected Vehicles

JIANG Jiwen[1], LI Guobing[2]

1. School of Automotive Technology, Anhui Vocational College of Defense Technology, Lu'an Anhui 237011, China;
2. School of New Energy and Intelligent Connected Vehicles, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui 232001, China

Abstract: With the evolution of vehicle networking technology towards advanced autonomous driving, communication latency has become one of the critical factors affecting road safety and collaborative control stability. In order to solve the problem of time delay runaway in the high real-time scenario, a dual-layer control strategy system is constructed: Multi-access edge computing nodes are deployed at the network layer to enable local traffic offloading and establish security control slices; at the transport layer, a novel dynamic retransmission mechanism is developed by combining delay prediction and compensation algorithm; Finally, empirical analysis of a 100 km/h high-speed platooning scenario demonstrated that compared with the traditional LTE-V2N control group, the experimental group had a 62.82% reduction in average latency from 23.4 ms to 8.7 ms; it compressed delay jitter from ± 9.8 ms to ± 1.2 ms, representing an 87.76% reduction.

Keywords: intelligent connected vehicles; 5G NR-V2N; communication latency

（责任编辑：李华云）