

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202412007



位置感知及背景扫描下软件定义 车联网无缝切换方案

陈宏¹, 周雅琴², 蒋文贤²

(1. 华侨大学 信息化建设与管理处, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对车联网传统架构中集中式方案的信令冗余与分布式方案的 IP 重配置瓶颈, 提出一种软件定义车联网无缝切换方案, 融合了位置感知、多接口背景扫描与流表动态重定向技术。首先, 分析传统集中式架构的缺陷, 以及造成切换延迟过大的原因。然后, 依托软件定义网络(SDN)控制器的全局网络视图动态调度能力, 通过预判式扫描优化目标基站选择效率。最后, 结合车辆多网络接口的特点, 将数据传输与背景扫描任务解耦, 利用多链路负载均衡实现业务无中断迁移。结果表明: 文中方案能有效减少切换时延, 满足业务的服务质量(QoS)需求。

关键词: 车联网; 位置感知; 无缝切换; 软件定义网络

中图分类号: TP 393

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)03-0337-10

Seamless Handover Scheme for Software-Defined Internet of Vehicles With Location Awareness and Background Scanning

CHEN Hong¹, ZHOU Yaqin², JIANG Wenxian²

(1. Department of IT Development and Management, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To address the signaling redundancy in centralized schemes and the IP reconfiguration bottleneck in distributed schemes within traditional architectures of the internet of vehicles, a seamless handover scheme for software-defined internet of vehicles is proposed, which integrates location awareness, multi-interface background scanning, and dynamic flow table redirection techniques. First, the shortcomings of traditional centralized architectures are analyzed, along with the factors contributing to excessive handover delay. Then, relying on the dynamic scheduling capability of the global network view of the software-defined network (SDN) controller, the target base station selection efficiency is optimized through predictive scanning. Finally, considering the characteristics of vehicle multi-network interfaces, data transmission and background scanning tasks are decoupled, and multi-link load balancing is utilized to achieve uninterrupted service migration. Experimental results demonstrate that the proposed scheme can effectively reduce the handover delay while ensuring the quality of service (QoS) requirements of vehicular applications.

Keywords: internet of vehicles; location awareness; seamless handover; software-defined network

收稿日期: 2024-12-12

通信作者: 陈宏(1980—), 女, 工程师, 主要从事软件定义网络、车联网、区块链技术的研究。E-mail: chenh@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62372190)

随着智能交通系统的不断发展,实时交通监控、道路安全预警、远程车辆诊断及车载多媒体服务等应用已成为现代车联网的核心功能模块^[1]。这些服务对网络连接的实时性与可靠性提出了严苛的要求,尤其在车辆高速移动场景下,如何保障服务质量(QoS)成为亟待解决的关键问题。尽管 5G 网络的大规模部署显著提升了通信带宽,但车辆动态拓扑变化频繁、覆盖盲区切换频繁等特性仍对传统移动性管理方案形成严峻挑战。

在大规模车联网场景下,代理移动 IPv6(PMIPv6)协议作为车联网主流的网络层移动性管理方案,通过本地移动锚点(LMA)与移动接入网关(MAG)协同实现车辆位置管理,但集中式架构下锚点负载过重、信令交互冗余等问题依然存在^[2-3]。分布式移动性管理(DMM)将锚点功能分布式部署于 MAG 节点,虽缓解了集中式瓶颈,却因频繁的 IP 重配置与隧道建立导致切换效率受限^[4]。上述方案均难以解决大规模车联网场景下的低时延需求与信令开销之间的矛盾。

软件定义网络(SDN)通过解耦控制平面与数据平面,为车联网移动性管理提供了新范式^[5],它将网络控制和智能管理能力从传统的网络设备迁移到一个集中式的软件实体网络控制器。SDN 控制器可基于全局网络视图动态优化路径决策,规避传统锚点架构的性能瓶颈。然而,现有 SDN 方案多聚焦于网络层路由优化^[6]和资源预分配设计^[7],鲜有研究深度融合终端多接口特性与 SDN 流表控制机制,导致切换过程中扫描延迟与业务中断问题未能得到根本解决。值得注意的是,现代智能车辆终端普遍配备多模通信接口(如 5G、V2X、Wi-Fi),其硬件性能的跃升为多链路协同传输提供了物理基础。传统单接口切换机制在 MAG 覆盖边缘需经历“断连—扫描—重连”过程,造成显著业务中断。若能在 SDN 全局管控下,利用背景扫描技术预判最优接入点,并通过多接口分流实现无缝过渡,则可突破现有方案的局限。基于此,本文融合位置感知、多接口背景扫描与流表动态重定向技术,提出一种软件定义车联网无缝切换方案。

1 网络切换方案的对比分析

MAG 切换方案,如图 1 所示。图 1 中:RSS 为接收信号强度。在 5G 技术下,车辆的网络切换由信号测量、切换启动、切换执行及切换完成 4 个阶段组成^[8],各阶段都会产生切换时延。因此,关于车辆等移动节点(MNs)的无缝切换方案一直是研究的重点与难点^[9]。

早期研究多围绕 PMIPv6 及其扩展协议展开。Kosmopoulos等^[10]结合媒体独立切换(MIH)与快速 PMIPv6(FPMIPv6),通过预判车辆速度优化切换流程,但受限干集中式架构,仍面临信令开销大等问题。类似地,Hussain 等^[11]提出基于位置感知的 PMIPv6 扩展方案,通过 RSS 动态调整锚点选择,虽降低了资源消耗,但未解决 IP 地址频繁重配置的时延问题。此类方案的共性在于依赖传统集中式移动性管理(CMM)架构,难以支撑车辆高动态场景。

为了突破集中式架构限制,近期研究将 SDN 引入车联网。Amiri 等^[12]采用动态锚点分配策略,降低传输成本,但部署复杂度较高。Tong 等^[13]结合多路径 TCP(MPTCP)与 SDN,通过子流保活机制减少垂直切换中断,但需要额外协议栈支持。现有 SDN 方案多聚焦网络层优化,缺乏终端多接口协同设计。针对接口冗余与链路稳定性,Hapanchak 等^[14]提出基于 MPTCP 的路径选择系统,动态匹配最佳接入技术,但未改善切换过程中扫描与认证时延。Al-Khalidi 等^[15]引入随机线性编码与移动预测,通过多播补偿切换丢包,但模型依赖高精度定位数据。此类方法通过多路径或预测机制提升鲁棒性,但缺乏与网络层控制的深度协同。

部分研究尝试通过本地缓存或预扫描降低切换开销。Neetu 等^[16]提出缓存增强的切换管理方案,减少重复认证次数,但受限干缓存容量与更新策略。Fan 等^[17]结合 SDN 与移动性预测,通过预加载目

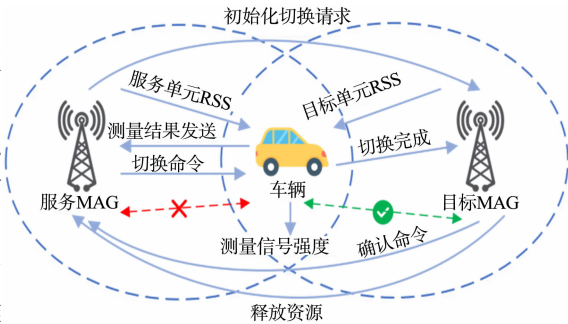


图 1 移动接入网关切换方案

Fig. 1 Mobile access gateway switching scheme

标基站信息缩短扫描时延,然而预测误差可能导致无效资源占用。Ko 等^[18]构建了一个约束马尔可夫决策过程,利用中央控制器收集每个设备的移动信息,使从中央云到边缘云切换相关信息的信令开销和迁移成本最小化。此类方案虽简化了流程,但未充分利用 SDN 对全局资源的动态调配能力。

现有方案与文中方案的对比,如表 1 所示。

表 1 网络切换方案的对比
Tab. 1 Comparison of network switching solutions

方案	具体方法	切换时延	吞吐量
文献[10]方案	MIH 与 FPMIPv6 协议融合,基于车速优化切换流程	高	低
文献[11]方案	位置感知 PMIPv6 扩展,动态锚点选择	高	低
文献[12]方案	动态锚点选择,分布式部署降低传输成本	高	高
文献[13]方案	MPTCP 与 SDN 子流保活机制,提升稳定性	低	高
文献[14]方案	MPTCP 动态路径选择,实现链路质量自适应	低	高
文献[15]方案	随机线性编码,多播补偿切换丢包	高	高
文献[16]方案	缓存增强切换管理,减少重复认证次数	高	低
文献[17]方案	移动性预测,预加载基站信息,缩短扫描时延	低	高
文献[18]方案	约束马尔可夫决策,降低信令开销和迁移成本	高	高
文中方案	SDN 全局位置感知,多接口背景扫描,流表重定向	低	高

由表 1 可知:现有方案存在一些局限性,传统 CMM 方案依赖单一锚点,SDN 方案多聚焦路由优化,均未实现终端-网络协同控制;多路径与预测机制复杂度高,背景扫描缺乏动态调度,难以平衡时延与稳定性;需要特定协议栈或硬件支持,限制实际部署范围。

文中方案设计了基于软件定义的车联网架构,通过 SDN 控制器对 MAG 及全局网络视图进行管控,高效地指导车辆终端进行切换。此外,对车辆进入某个 MAG 的覆盖范围开始,到切换至另一个 MAG 的整个过程中何时进行信道扫描、触发切换,以及如何有效地使用多网络接口进行深入的研究,提供了更完善的优化方案。

2 基于软件定义的车联网架构

2.1 网络架构

SDN 架构,如图 2 所示。图 2 中:API 为应用程序编程接口。SDN 架构主要分为基础设施层、控制层和应用层。基础设施层是由网络的底层转发设备构成,包含了特定的转发面抽象(如 OpenFlow 交换机中流表的匹配字段设计);控制层集中维护网络状态,并通过南向接口(控制和数据平面接口)获取底层基础设施信息,同时为应用层提供可扩展的北向接口;应用层根据网络不同的应用需求,调用控制层的北向接口,实现不同功能的应用程序。通过这种软件模式,网络管理者能通过动态的 SDN 应用程序配置、管理和优化底层的网络资源,从而实现灵活、可控的网络。

基于 SDN 架构,并结合研究目标和方法,设计一种能够适用于文中方案的基于软件定义的车联网架构,如图 3 所示。

基于软件定义的车联网架构描述如下。

1) 基础设施层。该层包括 MAG、交换机(SW)和中间路由器等物理设备。在车联网场景中,基站(BS)承担 MAG 功能,负责车辆接入认证、移动状态监测及数据包转发。因此,将用 BS 代指 MAG。所有设备均支持 OpenFlow 协议,通过南向接口与控制器实现标准化通信。具体而言,BS 负责监控车辆的移动情况和接入请求,向 SDN 控制器(SC)上报车辆及自身的有效信息(包括车辆设备信息和连接信息),并接收 SC 下发的流表指令,以执行相应操作。SW 则作为不同 BS 间传输数据的通道,连接 BS 与 SC,负责数据转发和与 SC 的交互,SW、BS 都受到 SC 的控制与管理。

2) 控制层。该层以 SC 为核心,其通过南向接口(如 OpenFlow)获取基础设施层的全局拓扑与链路状态信息,并基于预定义策略动态生成流表规则。SC 通过实时分析车辆移动轨迹与网络负载触发流表更新,以优化切换路径。

3) 应用层。通过北向接口调用控制层 API,部署移动性管理策略。无缝切换算法被封装为独立应

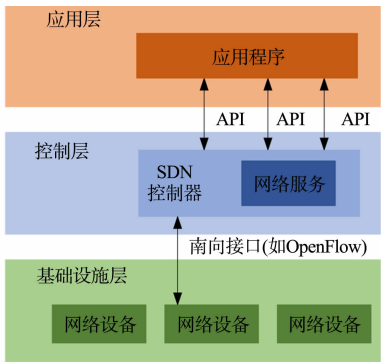


图 2 软件定义网络架构

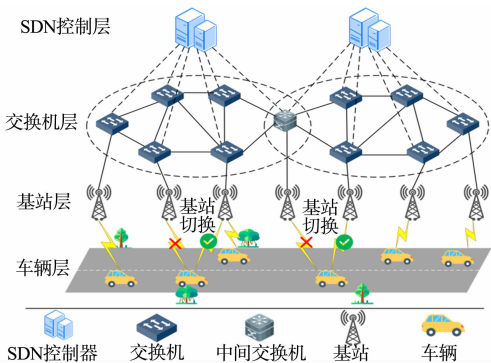


图 3 基于软件定义的车联网架构

Fig. 2 Software defined network architecture Fig. 3 Software-defined internet of vehicles architecture

用程序,实时接收 SC 提供的网络状态数据(基站负载、车辆位置),并通过决策模型反馈切换参数。

4) 车辆终端。车辆终端能够同时或在不同时间通过多个网络接口与不同的通信网络(蜂窝网络、V2X、Wi-Fi 及卫星通信)进行连接。车辆终端的多接口功能能够确保数据的高效传输,优化车辆的网络接入体验。

因为车辆终端以嵌入式智能设备为主,搭载了基于 Linux 内核的操作系统(OS),而该 OS 的优势在于将各组件的驱动程序抽象为模块,并使网卡驱动程序支持 softMAC 方式,由此可以通过操作系统内置的命令工具灵活便捷配置管理各网络接口^[19],而架构中的其他设备也大多基于该操作系统研发^[3]。因此,同内核的情况可以顺利地进行数据交换。对于非 Linux 系统,可通过适配驱动或虚拟化技术实现兼容,此部分可以作为未来的研究方向。

2.2 信息交互

由于 OpenFlow 协议在制订标准时并未考虑无线网络的特性,这将导致控制器与 BS 在某些信息的交互上出现障碍(如 OpenFlow 定义之外的封包),因而对 BS 的管理能力十分有限。因此,在不改变标准的 OpenFlow 协议的基础上,通过增加一条新的 Socket 管理通道单独连接 SC 与 BS,实现 SC 对 BS 的精准管理。架构整体的细节逻辑视图,如图 4 所示。车辆通过 5G NR V2X 系列协议与 BS 进行通信,而 BS 既能被控制器直接管理,也能通过 SW 与控制器交互。BS 与 SW 可以通过协议中定义的对称消息类型与控制器保持联系。这类消息是控制器和交换机双向对称的消息,其主要功能是建立连接、检测对方是否在线等,包括以下 3 个方面:1) Hello 消息,交换机和控制器建立连接时,互相发送该消息;2) Echo 消息,用于控制器与交换机计算时延,以及探测对方是否处于激活状态;3) Experimenter 消息,用于今后对协议扩展时预留的消息类型。

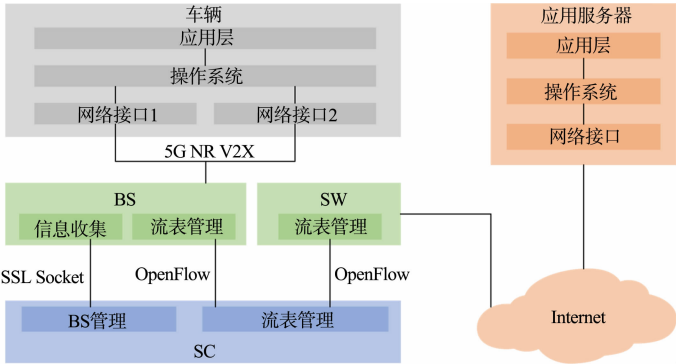


图 4 架构整体的细节逻辑视图

Fig. 4 Overall detailed logical view of architecture

当控制器需要下发流表到 BS(即各自的流表管理模块进行交互)时,可以直接通过 OpenFlow 安全通道;当需要交换链路及车辆的相关数据(即 BS 的信息收集模块与 SC 的 BS 管理模块进行交互)时,则通过额外的 Socket 通道,该方法可以通过网络编程实现。控制器主要完成两个功能,一是向 BS、SW 下发更新流表,控制其数据的转发,二是通过 Socket 通道对 BS 数据的监控和管理,实现 BS 和车辆数据

的统计获取。协议中同样也有对应的消息类型供控制器使用。这类消息由控制器发起, 然后由 OpenFlow 交换机接收并处理, 其主要功能是对 OpenFlow 交换机进行配置和状态查询, 包括以下 5 个方面: 1) Features 消息, 用来获取交换机的基本性能情况, 交换机收到该消息后必须返回一个应答消息进行回复, 该消息一般在控制器和交换机建立连接后使用; 2) Config 消息, 控制器通过该消息在交换机上查询和设置配置参数, 交换机仅对查询消息作反馈; 3) Mod 消息, 用于在交换机添加、删除和修改流表及配置交换机端口的属性; 4) Stats 消息, 用于实时获取当前交换机上的各种信息; 5) Packet-out 消息, 控制器指导交换机如何发送数据的消息。

基站工作模式被设定为监听模式, 由此可以实时监听到所有的管理帧及数据帧, 然后, 可从每个帧的 radiotap 头中获取车辆发送的数据帧信息, 如信号强度、传输速率、数据源的 IP 及 MAC 地址等。这些统计信息会传送至控制器, 上层应用通过接口调用这些统计信息来实现切换管理方法, 也可以实现其他网络服务。BS 可以通过协议中定义的异步消息与控制器交互。这类消息由交换机发送给控制器, 其主要目的是通知控制器自身发生的某些异步事件, 包括以下 4 个方面: 1) Packet-in 消息, 当数据包找不到匹配的流表条目时, 交换机将向控制器发送该消息, 如果交换机可以缓存该数据, 则此消息只携带数据包的包头部分及缓存 ID, 如果交换机不能缓存该数据, 则将整个数据包内嵌作为此消息的一部分, 发往控制器, 缓存的数据包一般由控制器的 Packet-out 消息进行处理; 2) Flow-removed 消息, 流表中每个流的条目都有一个闲置超时值, 用来指示该条目在非活跃状态下多长时间就要被移除, 当流条目超时, 就使用此消息移除该条目; 3) Port-status 消息, 当交换机状态发生变化时, 交换机向控制器发送该消息通报变化情况; 4) Error 消息, 通知控制器出现了某种错误。

3 基于位置感知及背景扫描的软件定义无缝切换

3.1 切换过程

传统的 BS 间切换过程是车辆在断开与源 BS 的连接后重新接入新 BS, 期间会导致通信中断, 并且需要一定时间来完成重连。

对此过程进行扩展, 以应对高速移动中的网络切换需求, 具体包括以下 5 个步骤: 1) 车辆进入 BS 覆盖范围并接入网络; 2) 与 BS 建立稳定连接, 并开始数据通信; 3) 当连接质量下降或车辆远离 BS 时, 准备进行切换; 4) 车辆搜索并选择新 BS, 尝试建立连接; 5) 完成与新 BS 的切换并恢复通信。为了减少切换延迟, 车辆可以通过预扫描技术提前探测周围 BS 的信号强度和覆盖范围, 为切换做好充分准备。

假设每辆车配备两个网络接口 ($v2x0$ 、 $v2x1$), 初始通过 $v2x0$ 与 BS 通信, 在需要切换时启用 $v2x1$ 。扩展后的车辆移动切换流程图, 如图 5 所示。图 5 中: 圆形区域表示不同 BS (BS_1 、 BS_2) 的覆盖范围; 矩形区域表示车辆在移动过程中信道质量的变化; t 为时刻; Q 为信道质量; Q_1 为 P_1 时刻的信道质量; $Q_{4,v2x0}$ 、 $Q_{4,v2x1}$ 分别为 P_4 时刻 $v2x0$ 、 $v2x1$ 的信道质量。

经扩展后的车辆移动切换流程有以下 4 个关键的步骤。

1) 车辆初始接入与信息采集。车辆进入 BS 覆盖区域后, 通过 $v2x0$ 接入网络并启动背景扫描。根据接收的信标帧与探测响应帧, 采集相邻 BS 的物理层参数, 服务集标识 (SSID)、IP 地址、MAC 地址、信噪比 (signal to noise ratio, SNR)、接收信号强度指示 (received signal strength indication, RSSI) 和信道号 (Ch) 等信息可以通过基站发送的信标帧或探测响应帧获得。构建的 BS 列表 (BL) 为

$$BL = \{BS_i | (ID, SSID, IP, MAC, R_{SN}, I_{RSS}, Ch), i = 1, 2, \dots, n\}.$$

(1)

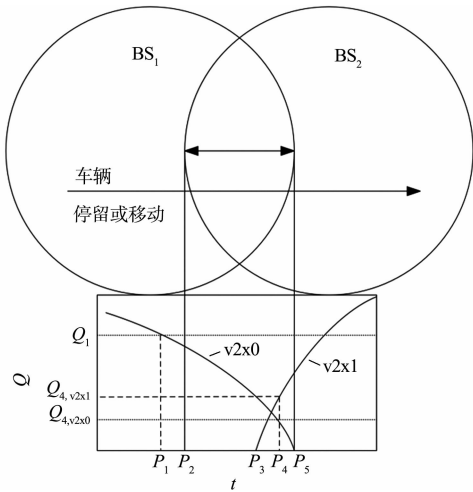


图 5 扩展后的车辆移动切换流程图

Fig. 5 Expanded vehicle movement handover flowchart

Fig. 5 Expanded vehicle movement handover flowchart

式(1)中: R_{SN} 为信噪比, I_{RSS} 为接收信号强度指示,二者的计算公式分别为

$$R_{\text{SN}}(t)=P(t)\times d(t)^{-\theta}\times\frac{G(t)}{\eta},\tag{2}$$

$$I_{\text{RSS}}(t)=P(t)-10\theta\log_{10}d(t)+\xi(t)。\tag{3}$$

式(2)、(3)中: $P(t)$ 为 t 时刻的发射功率; $d(t)$ 为 t 时刻接收方与发送方之间的距离; θ 为路径损耗因子; η 为噪声水平; $G(t)$ 为 t 时刻的信道平均增益; $\xi(t)$ 为阴影衰落噪声。

2) 信道质量评估与切换触发。车辆持续监测当前 BS 的信道质量 Q ,其定义为接收信号强度指示与信噪比的加权组合,即

$$Q=\alpha\times I_{\text{RSS}}+\beta\times R_{\text{SN}}。 \tag{4}$$

式(4)中: α,β 反映信噪比对链路稳定性的更高权重, $\alpha=0.4,\beta=0.6$ 。

当 Q 下降至阈值 Q_1 时,触发切换,即

$$Q_1=Q_{\text{stable}}\times A。 \tag{5}$$

式(5)中: Q_{stable} 为稳定连接期的信道质量,反映了连接成功后至切换启动前这段时间内的平均信道质量; A 为动态调整系数,用于适配不同场景需求, $A\in[0,1]$ 。

3) 目标 BS 选择与流表重定向。控制器根据车辆位置与 BS 覆盖半径 R ,计算距离阈值 D_{TH} ,即

$$D_{\text{TH}}=R\times B。 \tag{6}$$

式(6)中: B 为权重系数, $B\in[0,1]$ 。

当 $d(t)>D_{\text{TH}}$ 时,SC 从 BL 中选择信道质量最高的目标 BS,并下发流表更新指令,将数据流无缝切换至备用接口 $v2x1$ 。切换完成后,原接口转为背景扫描模式,持续更新 BL 信息。

4) 接口任务切换与稳定性验证。在切换过渡期($P_3\sim P_4$),系统验证新链路的稳定性,即

$$Q_{\text{TH}}=Q_{4,v2x1}(t)-Q_{4,v2x0}(t)=Q_{4,v2x1}(t)\times C。 \tag{7}$$

式(7)中: C 为稳定性验证系数。

当 Q_{TH} 满足预设条件 $C\in[0,0.5]$ 时,确认切换成功并释放原接口资源。

在车辆移动过程中,通过实时计算与当前 BS 的距离来判断其位置变化。通常,车辆距离 BS 越远,信号强度会逐渐衰减,当超过阈值范围时,信号质量下降,导致通信质量差。为了保证通信不中断,车辆可以启用备用网络接口进行切换,确保稳定连接。车辆首次扫描周围 BS 时,已获取其他 BS 的信号强度和覆盖情况。在车辆远离当前 BS 或信号质量下降时,当前 BS 可主动与 SC 通信,获取最新网络信息,并根据车辆位置、移动轨迹和需求选择目标 BS 进行切换。当目标 BS 确定后,SC 会通知车辆启用备用接口进行连接请求。连接成功后,SC 会更新流表项,将数据流重定向至新 BS,确保数据通信无缝切换。随后,SC 会更新车辆连接表,删除原 BS 的连接项,添加新 BS 的连接项,以确保 BS 与 SC 的连接信息一致。

3.2 切换准则

在切换过程中, P_1 、 P_3 和 P_4 是 3 个关键时刻,根据这些时机,提出以下 7 个切换准则。

1) 车辆通过主动扫描判断是否在某些 BS 的覆盖范围内。车辆向周围 BS 发送探测请求帧,并根据 BS 设定的 100 ms 间隔接收信标帧,进而获取 BS 信息,如 SSID、IP 地址、MAC 地址、链路信息(信噪比、接收信号强度指示、信道号),并将这些信息存储在 BL 中。

2) BS 监测车辆并获取其位置信息,与 BS 自身位置一同上报给控制器 SC,创建车辆和 BS 的信息表。为了减少开销,信息表中仅记录位置数据,方便后续计算车辆与 BS 之间的距离。由于 BS 位置固定,只需动态更新车辆位置。

3) 在初始阶段,车辆根据已收集的有限信息,从 BL 中选择信号强度和信噪比最大的 BS(如 BS_1),通过 $v2x0$ 发送连接请求,连接成功后开始正常通信。如果车辆长时间未移动,启用 $v2x1$ 进行背景扫描,发现新的 BS 时将其添加到列表中。考虑到扫描时间较长且车辆静止,预扫描只进行一次。

4) 当信道质量下降或车辆开始移动时, $v2x1$ 将再次扫描 BL 中已有的 BS,更新信道信息。随着车辆逐渐远离 BS_1 ,在 P_1 时刻,信道质量下降至设定的阈值 Q_1 ,然后切换过程启动,但是车辆仍然与 BS_1 保持通信。

5) 在移动过程中,SC 持续更新车辆位置信息。当车辆与 BS_1 的距离达到设定阈值 D_{TH} 时,SC 会计算车辆与其他 BS 的距离,并根据距离排序选择最短的 BS(如 BS_2)。系统通知 BS_2 与车辆建立连接,并通过更新流表项,将 BS_1 的数据流重定向至 BS_2 。

6) 在 P_3 时刻,车辆通过 $v2x1$ 与 BS_2 建立稳定连接,信道质量逐渐改善。当到达 P_4 时刻, $v2x1$ 与 $v2x0$ 的连接质量差达到预定阈值 Q_{TH} ,意味着 $v2x0$ 不再适合承担数据收发任务,因此,被转为备用接口进行背景扫描。

7) 在 P_5 时刻,车辆完全离开 BS_1 , $v2x0$ 与其断开连接,随后开始重复上述过程。在整个过程中,两网络接口分别执行背景扫描和数据收发任务,确保没有丢包或通信中断。

综上所述, P_1 、 P_3 和 P_4 分别是 BS 切换启动、成功接入新 BS 和接口任务转换的关键时刻,这些时刻对应特定的阈值条件,确保切换过程顺利进行。

文中方案的提出旨在解决车辆与 BS 之间频繁的信令交互问题,同时通过控制器对全局设备的监控,简化整个切换流程。与复杂的算法不同,文中方案基于信道质量与 BS 覆盖距离的关系,在关键时刻通过感知车辆与 BS 的相对位置,快速选择合适的基站,确保高效切换。车辆的多网络接口优势使切换过程平滑,数据传输不中断,从而显著降低了切换时延,提升了服务质量和用户体验。

4 实验结果及分析

为验证文中方案的有效性,使用接收信号强度指示加载仿真平台镜像,Ubuntu 22.04.3 LTS 操作系统,内核为最新稳定版。结合 Mininet-WiFi 2.3.0 和 Ryu 控制器 4.36 的固件,内置 Open vSwitch 2.19.0,以支持创建虚拟 OpenFlow 交换机。最后,使用 SUMO 搭建完整的交通仿真场景。

网络连通性测试基于网际控制报文协议(ICMP),通过周期性发送 ping 指令监测端到端的通信状态。数据包捕获与分析通过 Wireshark 实现,基于混杂模式监听网卡流量,解析链路层至应用层协议头部信息。

4.1 系统测试

进行车辆与远端服务器的互通性测试。实验需要创建 1 台远端服务器(S_1)、1 辆车(v_1)、1 个 SW(SW_1)及 3 个 BS($BS_1 \sim BS_3$)。车辆不断向 S_1 发送 ping 命令,验证网络的可用性。

测试拓扑图,如图 6 所示。图 6 中: x 为水平位置; y 为垂直位置;图形是 Mininet-WiFi 通过调用 Python 中的 matplotlib 库绘制而成,远程控制器未标明。

车辆与远端服务器的互通性测试时延,如表 2 所示。表 2 中: N_1 为实验次数; N_2 为封包次数; T_{min} 为最小时延; T_{max} 为最大时延; T_{ave} 为平均时延; σ 为方差。

由表 2 可知:车辆与远端服务器间的双向通信实现成功,由此验证了网络拓扑的连通性与功能性;基于独立测试的均值表明,初始阶段由于网络环境尚未稳定($\sigma=0.894$),存在显著的链路协商与路由收敛过程,导致平均时延达 4.482 ms;随着测试轮次推进,网络逐步进入稳态($\sigma=0.662$),各次测量值收敛至 $[3.702, 6.540]$ ms,最终平均时延优化至 4.318 ms,符合车联网低时延通信的 QoS 要求。

表 2 车辆与远端服务器的互通性测试时延

Tab. 2 Vehicle and remote server interoperability test delay

N_1	N_2	T_{min}/ms	T_{max}/ms	T_{ave}/ms	σ
10	30	3.710	7.510	4.482	0.894
20	30	3.702	6.540	4.318	0.662

为了验证多网络接口的协同传输性能,实验配置如下:车辆终端 v_1 部署双接口(v_1-v2x0 、 v_1-v2x1 ,

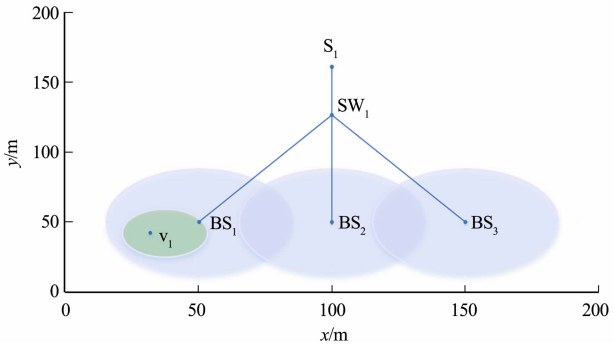


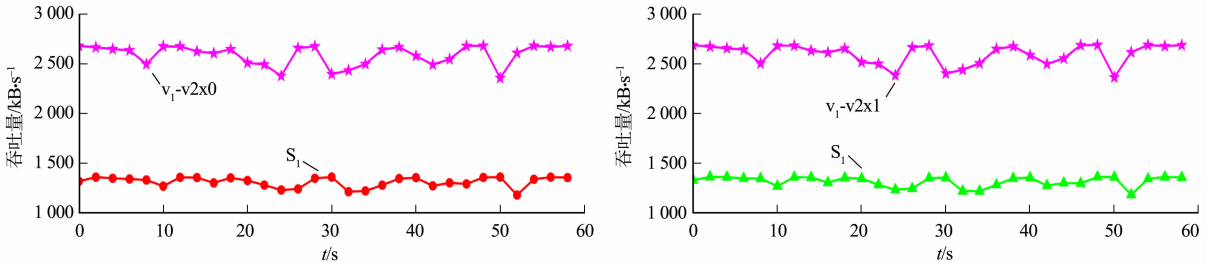
图 6 测试拓扑图

Fig. 6 Test topology diagram

IP 分别为 10.0.0.100、10.0.1.100),远端服务器 S_1 固定 IP 为 10.0.0.2,基站与交换机间链路带宽限定为 $100\text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 。采用 iperf3 工具执行端到端带宽测试,并通过 ifstat 实时监测各接口吞吐量。

车辆网络接口的吞吐量测试,如图 7 所示。由图 7 可知:双接口在相同操作模式下呈现均衡负载特性,平均聚合带宽趋于稳定,验证了多接口并行传输的可行性。

该结果证实了硬件配置与协议栈的兼容性,为后续无缝切换实验提供了底层通信保障。



(a) v_1-v2x0 和 S_1 的对比

(b) v_1-v2x1 和 S_1 的对比

图 7 车辆网络接口的吞吐量测试

Fig. 7 Throughput test of vehicle network interface

4.2 对比实验

对比实验以切换延迟为核心性能评估指标,基于 ICMP 报文的端到端往返时延(RTT)实现量化测量。选择 ICMP 协议的原因在于作为网络层基础协议,其实现具有跨平台普适性,同时协议头部开销低(仅 8 B),可以避免高层协议栈干扰对时延测量的影响。具体而言,车辆终端以 100 ms 为周期持续发送 ICMP Echo Request 报文至远端服务器,并通过 Echo Reply 报文的接收状态判定链路连通性。当车辆移动至源基站覆盖边缘时,链路中断触发 ICMP 报文丢失;待切换至目标基站后,通信会话恢复并继续 RTT 监测。切换时延 T_{handover} 定义为末次有效报文接收时刻 t_1 与首条恢复报文到达时刻 t_2 之间的时间差,即

$$T_{\text{handover}} = t_2 - t_1 + \Delta t_{\text{process}} \quad (8)$$

式(8)中: $\Delta t_{\text{process}}$ 为报文处理时延。

该模型不仅涵盖无线链路中断时段,还包含控制平面决策(SDN 流表更新)与数据平面转发(目标 BS 路由收敛)的全流程耗时。因此,该定义客观反映了链路中断至业务恢复的全过程耗时,与真实切换场景具有强一致性。

选择以下 4 种方案进行对比实验。

1) 方案 1,基于传统的 IEEE 802.11p 协议,该协议规定车辆以 BS 的信号强度为指标进行扫描接入和新 BS 的重连操作,车辆在与原 BS 断开之后还需继续扫描可用 BS,再重复接入过程,因此,耗费较长的切换时间。

2) 方案 2,基于 IEEE 802.11r 协议,该协议着眼于减少漫游时认证所需的时间,协议允许移动端在实现切换之前,就建立起与新接入点之间安全且具备 QoS 的状态,将连接损失和通信中断减到最小。

3) 方案 3,在传统 IEEE 802.11p 协议基础上使用背景扫描及双网络接口,使车辆连接多个不同的 BS,还未切换之前扫描周围合适的 BS,并在与原 BS 断连之前完成与新 BS 的接入,实现通信持续畅通。

4) 文中方案,基于位置感知及背景扫描的切换方案,借助控制器的全局管理能力及对底层设备的调控能力,通过下发修改流表项的方式(添加或删除)更精准地实现数据的不间断传输,利用车辆多网络接口实现无缝切换。

采用图 6 中的拓扑场景,但将方案 1,2 中的车辆设置为单网络接口,而方案 3,4 中的车辆设置为双网络接口。为了达到传统架构的效果,在验证时 SC 充当接入控制的角色,不使用流表控制的方式。

单网络接口切换时延,如图 8 所示。由图 8 可知:传统 IEEE 802.11p 协议的硬切换机制存在显著业务中断现象,具体表现在封包序号为 3~8 及 10~14 的 ICMP 报文传输过程中,分别出现 5 个和 4 个连续报文丢失,表明车辆在源基站断开至目标基站重连期间经历了两轮完整链路中断,符合传统的硬切换模式,并且再次重连新的 BS 也需要花费一段时间,切换时延约为 3~10 ms;采用 IEEE 802.11r 协议

运行的切换时延比传统方式更小,该协议通过缓存密钥,减少了传统重连过程中认证时延,但在突发性网络拓扑变化场景下,仍观测到 3 次时延峰值,主要源于无线信道快速衰减引发的重复扫描过程,但总体时延是偏小的,约为 1~9 ms。该结果验证了协议优化对常规场景的改进效果,同时揭示了极端动态环境下移动性管理的剩余挑战。

双网络接口切换时延,如图 9 所示。由图 9 可知:双网络接口架构可显著改善切换时延的波动性,时延明显减少,验证了多接口冗余对切换平滑性的正向作用;方案 3 在切换过渡期仍存在阶段性时延抬升现象,归因于源基站信号强度衰减导致的链路质量劣化,此时,尽管通过双接口维持物理层连接,但重传机制与路由震荡仍造成额外时延开销,即使数据封包能够被接收,也要耗费较长的时间;文中方案通过 SDN 控制器的流表重定向机制,在链路质量阈值触发时,将数据流无缝迁移至目标基站,避免了传统切换中的路由收敛过程;实验测得整体时延维持在 1 ms 以内,仿真环境下因排除物理层随机干扰(如多径衰落),时延绝对值虽低于实际场景,但横向对比结果仍具参考价值,证实了架构优化的有效性。

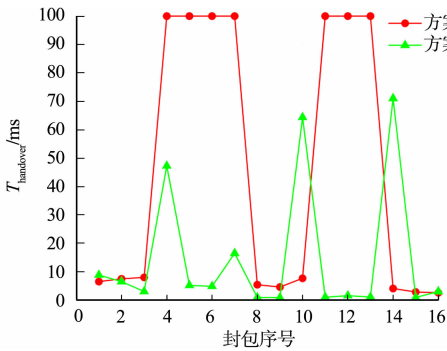


图 8 单网络接口切换时延

Fig. 8 Handover delay of single network interface

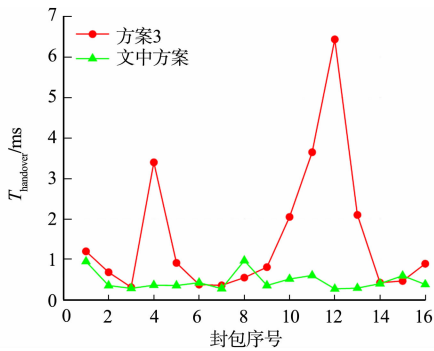


图 9 双网络接口切换时延

Fig. 9 Handover delay of dual network interface

5 结论

针对车联网高动态场景下的移动性管理瓶颈,提出一种基于 SDN 的无缝切换优化方案。通过引入位置感知与多接口背景扫描机制,结合控制器的全局资源调度能力,实现了车辆在基站间的平滑迁移。该方案通过流表动态重定向与多链路协同传输,显著降低了切换时延与业务中断风险,且端到端通信稳定性优于现有 SDN 优化方案。此外,结合基站位置固定这一实际特性,控制器能够精确掌控车辆与基站的相对位置,从而为车辆快速选取合适的基站进行切换,进一步提高了切换效率。

研究结果表明,SDN 架构与终端多接口特性的深度融合能够提升传统移动性管理框架的性能,相较于其他方案,文中方案在时延和切换效率上具有显著优势。未来工作将重点探索异构操作系统适配性优化,并进一步引入学习算法以提升复杂交通场景下的决策鲁棒性。

参考文献:

[1] 况博裕,李雨泽,顾芳铭,等. 车联网安全研究综述: 威胁、对策与未来展望[J]. 计算机研究与发展, 2023, 60(10): 2304-2321. DOI:10. 7544/issn1000-1239. 202330464.

[2] HE Daojing, LU Xintong, LI Xuru, *et al.* Design and formal analysis of a lightweight MIPv6 authentication scheme [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(19): 19238-19245. DOI:10. 1109/JIOT. 2022. 3165580.

[3] SILVA M, TEIXEIRA P, GOMES C, *et al.* Exploring software defined networks for seamless handovers in vehicular networks[J]. Vehicular Communications, 2021, 31: 100372. DOI:10. 1016/j. vehcom. 2021. 100372.

[4] ALJERI N, BOUKERCHE A. A dynamic MAP discovery and selection scheme for predictive hierarchical MIPv6 in vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(1): 793-806. DOI: 10. 1109/TVT. 2019. 2942691.

[5] 肖警续,郭渊博,常朝稳,等. 基于 SDN 的物联网边缘节点间数据流零信任管理[J]. 通信学报, 2024, 45(7): 101-116. DOI:10. 11959/j. issn. 1000-436x. 2024060.

[6] ZENG Yue, YE Baoliu, TANG Bin, *et al.* Mobility-aware proactive flow setup in software-defined mobile edge net-

works[J]. IEEE Transactions on Communications,2023,71(3):1549-1563. DOI:10.1109/TCOMM.2023.3238396.

[7] LIU Yibing, HUO Lijun, ZHANG Xiongtao, *et al.* A multi-objective resource pre-allocation scheme using SDN for intelligent transportation system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(1): 571-586. DOI:10.1109/TITS.2023.3310978.

[8] PALAS M R, ISLAM M R, ROY P, *et al.* Multi-criteria handover mobility management in 5G cellular network[J]. Computer Communications, 2021, 174: 81-91. DOI:10.1016/j.comcom.2021.04.020.

[9] 刘彩霞,季新生,邬江兴.移动通信网的内生安全共性问题及破解之道[J].通信学报,2022,43(9):70-79. DOI:10.11959/j.issn.1000-436x.2022176.

[10] KOSMOPOULOS I, SKONDRAS E, MICHALAS A, *et al.* Handover management in 5G vehicular networks[J]. Future Internet, 2022, 14(3): 87. DOI:10.3390/fi14030087.

[11] HUSSAIN A, NAZIR S, KHAN F, *et al.* A resource-efficient hybrid proxy mobile IPv6 extension for next-generation IoT networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 10(3): 2095-2103. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3058982.

[12] AMIRI E, WANG N, VURAL S, *et al.* Dynamic anchor point selection in software defined distributed mobility management[C]//2022 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC). Rhodes:IEEE Press,2022: 1-7. DOI:10.1109/ISCC55528.2022.9912766.

[13] TONG Haonan, WANG Tao, ZHU Yujiao, *et al.* Mobility-aware seamless handover with MPTCP in software-defined HetNets[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(1): 498-510. DOI: 10.1109/TNSM.2021.3050627.

[14] HAPANCHAK V S, COSTA A, PEREIRA J, *et al.* An intelligent path management in heterogeneous vehicular networks[J]. Vehicular Communications, 2024, 45: 100690. DOI:10.1016/j.vehcom.2023.100690.

[15] AL-KHALIDI M, AL-ZAIDI R, THOMOS N, *et al.* Intelligent seamless handover in next generation networks[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2023, 70(1): 1566-1579. DOI:10.1109/TCE.2023.3340416.

[16] NEETU R R, GHATAK G, BOHARA V A, *et al.* Performance analysis of cache-enabled handover management for vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024, 11(1): 1151-1164. DOI:10.1109/TNSE.2023.3321296.

[17] FAN Chunyang, CUI Jie, ZHONG Hong, *et al.* MM-SDVN: Efficient mobility management scheme for optimal network handover in software defined vehicular network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(9): 32089-32104. DOI:10.1109/JIOT.2024.3422659.

[18] KO H, KYUNG Y, LEE J, *et al.* Mobility-aware personalized handover function provisioning system in B5G networks[J]. Future Generation Computer Systems, 2024, 157: 436-444. DOI:10.1016/j.future.2024.04.002.

[19] KAUR A, KRISHNA C R, PATIL N V. A comprehensive review on software-defined networking (SDN) and DDoS attacks: Ecosystem, taxonomy, traffic engineering, challenges and research directions[J]. Computer Science Review, 2025, 55: 100692. DOI:10.1016/j.cosrev.2024.100692.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 陈婧)