

SDN 在车载网中的应用综述

谷晓会 章国安

南通大学信息科学技术学院 江苏 南通 226019)

(1792808186@qq.com)



摘 要 随着车载应用、移动设备和物联网的快速发展,开发处理车载网大数据的高效架构已成为未来智慧城市关注的重要问题。然而,车载网复杂且不灵活的架构面临一系列挑战,如高移动性、间歇性连接、应用程序的异构性。在这种背景下,软件定义网络(Software Defined Network,SDN)可编程和灵活的网络架构,在有线网络管理和异构无线通信中受到学术界和工业界的广泛关注。在车载网中应用 SDN 可以提高灵活性、可靠性、可编程性和可扩展性,增强车载网提供应用和服务的能力,提高用户服务质量。文中首先描述了 SDN 的体系结构,然后从架构和数据传播角度出发概括了软件定义车载网络(Software Defined Vehicular Networks,SDVN)的研究进展,随后概述了结合移动边缘计算(Mobile Edge Computing,MEC)的 SDVN 研究现状,接着讨论了 SDVN 存在的问题和挑战,最后介绍了 SDVN 的应用前景。

关键词: 车载网;软件定义网络;软件定义车载网;智能交通系统;移动边缘计算;云计算

中图法分类号 TN92

Survey of SDN Applications in Vehicular Networks

GU Xiao-hui and ZHANG Guo-an

School of Information Science and Technology, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China

Abstract As vehicle applications, mobile devices and the Internet of Things (IoT) have been developing rapidly, building an efficient architecture to deal with big data in vehicular networks has become an important concern for the future smart city. However, the complex and inflexible architecture of vehicular networks faces a set of challenges such as high mobility, intermittent connectivity, heterogeneity of applications. In this context, software defined network (SDN), with the programmable and flexible network architecture, has recently been gaining great attentions from research communities, businesses, and industries in wired network managements and heterogeneous wireless communications. Applying SDN to Vehicular Networks can significantly improve its flexibility, reliability, programmability and scalability, enhance the capacity of vehicular Networks in providing applications and services, and further improve the quality of experience of users. Firstly, the SDN framework was described. Secondly, the research progress of the software defined vehicular network (SDVN) was summarized from two perspectives: architectures and data dissemination. Then the current research state of SDVN combined with mobile edge computing (MEC) was surveyed. After that, existing problems and challenges faced by SDVN were discussed. Finally, several SDVN application prospects were introduced.

Keywords Vehicular networks, Software defined network, Software defined vehicular networks, Intelligent transport system, Mobile edge computing, Cloud computing

1 引言

随着移动通信技术的发展,研究人员已经开发了许多车载安全和非安全应用,如协作避撞、路线规划、自动驾驶等,但是由于基础设施部署和管理的困难,车载网仍面临许多挑战,如连接设备数量呈指数增长、资源利用效率低、车流量不均

衡、地理寻址困难、车辆的高移动性和不可靠连接等^[1-2]。传统的车载网架构在车辆组件中采用特殊算法监控交通密度、规划路由路径,以实现有效的消息传输。但是,车辆通信频繁中断、异构网络接口,以及车载网对可扩展性、灵活性、安全性和可靠性的需求不断增长,使得传统车载网络的弊端逐渐显露^[3-4]。另外,硬件设备的私有制和紧密耦合方式阻碍了计算

到稿日期:2019-01-22 返修日期:2019-05-01 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(61801249)

This work was supported by the Young Scientists Fund of National Natural Science Foundation of China (61801249).

通信作者:章国安(gzhang@ntu.edu.cn)

机网络的创新和发展。随着网络设备数量的增长和网络数据传输速度的加快,基于 IP 的传统网络在部署和管理方面越来越困难,已经不能满足未来网络的发展需求^[5]。同时,新业务的引进也为网络的建设、维护和升级带来了巨大的挑战^[6],使得运营成本增加、设备生命周期短、网络日趋复杂。而 SDN 为解决以上问题指明了方向。SDN 代表了一种新兴的网络模式,具有加入蜂窝网络和车载网络的潜力^[7]。第一,SDN 将控制和转发功能分离,使得研究人员可以直接编程网络控制,并为应用程序和网络服务抽象化基础设施^[8]。第二,逻辑上的集中控制提高了资源的利用效率^[9]。第三,可编程性使网络更加灵活,应用程序可选择最合适的无线访问接口来传送数据^[10]。因此,SDVN 的设计是处理车辆应用需求、管理动态网络拓扑、支持网络异构性以及最小化网络管理成本和设计复杂度的有效途径。

本文第 2 节介绍了 SDN 架构;第 3 节描述了 SDN 在车载网中的研究进展,以及结合 MEC 和 SDN 的车载网的研究现状;第 4 节和第 5 节分别讨论了 SDN 在车载网中的相关挑战和应用前景;最后总结了全文。

2 SDN 网络架构

SDN 的核心思想是将网络控制(控制平面)和转发功能(数据平面)分离,以简化网络管理。许多组织已针对不同需求提出了相应的 SDN 参考架构,图 1 展示了由开放网络基金会(Open Network Foundation,ONF)提出的 SDN 架构^[11],包含数据平面、控制平面和应用平面。该架构已经得到了工业界和学术界的普遍认可。

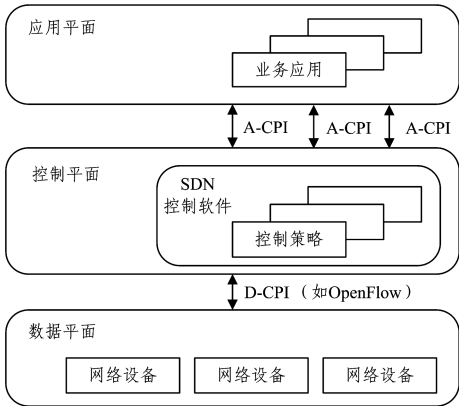


图 1 SDN 参考架构
Fig. 1 SDN reference architecture

数据平面由交换机、路由器等网络元件组成,负责数据的处理、转发和设备状态的搜集。在 SDN 环境中,网络设备是深度可编程的,并且支持标准接口。控制平面由集中式控制器组成,负责处理数据平面资源,产生全网逻辑控制策略,维护系统的网络状态、网络视图等,并通过标准协议管理网络设备,从应用层接收请求。应用平面包含各类基于 SDN 的网络应用和业务,用户无须关心底层设备的技术细节,仅通过简单的编程就能实现新应用的快速部署^[12]。应用程序使用应用

控制平面接口(Application-Control Plane Interface,A-CPI)与控制平面通信,控制平面和数据平面通过应用控制平面接口(Data-Control Plane Interface,D-CPI)互相通信。A-CPI 是为开发者提供网络高层逻辑抽象和业务模型的编程接口,实现了顶层应用与网络之间的信息交换^[13]。D-CPI 负责转发 SDN 控制器下发的逻辑控制策略和从网络设备采集网络状态。D-CPI 具有统一的通信标准,目前主要采用 OpenFlow 通信协议,图 2 展示了一种简单的适用于车载网的 OpenFlow^[14]。OpenFlow 流表的每个流表项主要由 3 部分组成:匹配域、计数器和指令集。流表处理数据包时,数据包首先与流表中的流表项进行匹配,如果找到匹配的流表项,则执行该流表项中的指令集,否则丢弃该数据包,将数据包传到另一个流表或者向控制器发送消息。

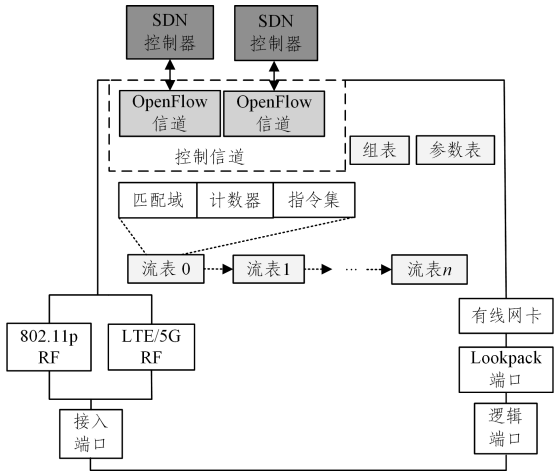


图 2 车载网中的 OpenFlow
Fig. 2 OpenFlow in vehicular networks

3 SDN 在车载网中的应用

表 1 概述了近年来一些基于 SDN 的车载网研究工作。

3.1 SDVN 研究进展

通过支持安全、办公和信息娱乐服务,车载网在实现智慧城市方面发挥着重要作用。然而传统的车载网架构难以满足日益复杂的用户需求^[15],而 SDN 为设计灵活、可持续演进的车载网架构提供了技术支持。支持 SDN 的车载网通过修改网络中的数据转发规则,可以自适应动态变化的拓扑结构。在车载网中,安全相关和非安全相关的应用具有不同的延时、传播和带宽要求^[16]。除此之外,SDN 还支持车载通信架构中无线接口的异构性,以使用更低的成本实现更好的计算、存储和性能。SDN 控制器能够有效地为不同任务选择不同的接口。图 3 所示的 SDVN 架构由 SDN 控制器、车辆、蜂窝基站和路边单元(Road Side Unites,RSU)组成。使用 802.11p 接口启用车辆到车辆(Vehicle to Vehicle,V2V)通信的成本可以忽略不计;车辆与路边单元(Vehicle to RSU,V2R)使用 5G/LTE 技术通信,可以扩大通信覆盖面积,提高通信速率^[17]。具有全局网络知识的 SDN 控制器控制整个网络的行为。为了获得更好的性能和易于管理,用户可以根据通信的带宽、覆盖范围和成本选择无线接口^[18]。

表 1 软件定义车载网络
Table 1 Software defined vehicular networks

文献	时间	架构	通信	控制器连接 丢失策略	多个 控制器	资源管理	仿真平台	贡献
[19]	2014	集中式	V2V			✓	NS-3	基于 SDN 的 VANET 架构
[20]	2015	集中式	V2V,V2I			✓	Matlab	基于 SDN 的 RSU 云
[21]	2016	集中式	V2V,V2I				NS-3 和 SUMO	基于 SDN 的 VANET 架构
[22]	2015	集中式	V2V,V2I			✓	-	集成雾计算和 SDN 的 VANET 架构
[23]	2017	集中式	V2V				Matlab	集成雾计算和 SDN 的车载网架构
[24]	2016	分布式	V2V,V2I		✓	✓	OMNET++和 SUMO	基于 SDN 的 VANET 分布式架构
[25]	2017	分布式	V2V,V2I	✓	✓	✓	NS-3 和 SUMO	基于 SDN 的 VANET 分布式架构
[27]	2017	分布式	V2I		✓		Matlab	基于延迟性能的 SDN 车载网架构
[29]	2017	分布式	V2V,V2I	✓	✓		NS-3 和 SUMO	基于集群和 SDN 的异构车载网架构
[32]	2015	集中式	V2V,V2I				OpenNet	基于 SDN 的 VANET 广播方法
[33]	2016	集中式	V2V,V2I			✓	POX 和 NS-3	基于 SDN 的车载网数据传播策略
[34]	2016	集中式	V2V,V2I			✓	CSIM19	基于 SDN 的 VANET 数据传播策略
[35]	2015	集中式	V2V,V2I			✓	-	基于 SDN 和云计算的车载网内容更新策略
[14]	2017	分布式	V2V,V2I		✓		NS-3	集成 MEC 和 SDN 的车载网架构
[39]	2017	集中式	V2V,V2I			✓	-	集成 MEC 和 SDN 的 5G 车载网架构
[40]	2018	集中式	V2V,V2I			✓	TensorFlow	基于 SDN 和 ICN 的车载网资源管理
[41]	2018	集中式	V2V,V2I			✓	-	基于 SDN 的车载网协作边缘计算架构

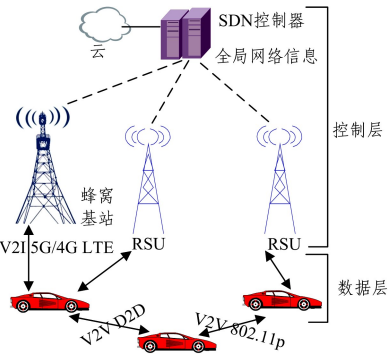


图 3 SDVN 架构
Fig. 3 SDVN architecture

3.1.1 集中式架构

由于传统的车载自组织网络(Vehicular ad hoc Network, VANET)体系结构缺乏灵活性,很难部署新的服务和协议,Ku 等^[19]提出了基于 SDN 的 VANET 架构,为网络提供灵活性和可编程性。它在 VANET 中部署 SDN 所需的组件和要求,以及基于 SDN 的 VANET 的操作模式和可以提供的服务,最后在不同参数设置下仿真数据包传输成功的概率,并根据仿真结果得出以下结论:1)通过比较基于 SDN 的路由协议和传统的移动自组织网络(MANET)/VANET 路由协议,证明了软件定义 VANET 的可行性;2)故障恢复机制对移动无线场景应用 SDN 的必要性;3)软件定义 VANET 可以为无线节点提供功率调整服务,提高数据包传输成功的概率。

Salahuddin 等^[20]提出了将 RSU 云作为计算和通信基础设施的车载云,由传统的 RSU 和包含微型数据中心的专用 RSU 组成。RSU 微型数据中心支持虚拟化和 SDN 功能,可利用 SDN 的灵活性和深度可编程性,动态地实例化、迁移和复制服务,也可以动态调整 RSU 云的配置,满足车辆频繁变化的服务需求。另外,他们设计了 RSU 云资源管理器,通过最小化服务延迟、控制平面开销和服务主机数量、减少网络重构的次数,来提高服务提供商的收益和车载用户的服务质量(Quality of Service, QoS)。最后,他们还考虑了重新配置网络的开销,并提出了一种启发式算法来降低网络重置的成本。

无线基础设施的异构性和协议部署的不灵活阻碍了车辆通信的发展和应用,SDN 通过统一的网络抽象和可编程性能来解决异构网络中存在的问题。He 等^[21]提出了一种支持异构无线接口以提高网络性能的 SDVN 架构,其中异构无线设备(包括车辆和 RSU)被抽象为具有统一接口的 SDN 交换机。逻辑上集中的控制平面为网络设备分配带宽和频谱等网络资源,使车载网络的配置更灵活。为了突出 SDVN 架构的优点,他们研究了几种应用案例,如自适应协议部署和多租户隔离;最后,基于网络流量的仿真验证了这几种案例在所提架构中的可行性和有效性。

Truong 等^[22]结合雾计算和 SDN 提出了一种新的 VANET 架构,称为 FSDN。其基于 SDN 的架构提供了网络的灵活性、安全性、可编程性和网络全局内容,而雾计算用于提供延迟敏感和位置感知服务,可以满足未来 VANET 应用场景的需求。他们介绍了基于 FSDN 的基本操作和组件功能,并通过分析两个非安全应用(数据流传输)和安全应用(协助车辆变换车道)案例,说明了 FSDN 架构的优点,其中 FSDN 可以动态地适应拓扑变化并为相应的服务部署选择最佳配置,以保证车载用户的体验质量(Quality of Experience, QoE);SDN 控制器收集 VANET 的全局信息,用于构建性能更好的自主车道变换系统。

Ge 等^[23]提出了一种集成 5G 移动通信技术、SDN 以及云计算和雾计算的车载网架构,由云计算中心、SDN 控制器、RSU 中心、RSU、BS、雾计算集群、车辆和用户组成。该架构基于 SDN 网络架构的 3 个逻辑平面,将 5G SDVN 的控制层和数据层分开,以提高车载网络的灵活性和可扩展性。此外,为了减少车辆和 RSU 的频繁切换,在 5G SDVN 的边缘提出了由车辆和 RSU 组成的雾小区,雾小区中的车辆以多跳中继方式与 RSU 通信,车辆之间采用设备到设备(Device to Device, D2D)毫米波通信。结果显示,在设置的仿真参数下,车辆与 RSU 的传输距离为 300 m、400 m 和 500 m 时,对应的最小传输延迟分别为 0.32 ms、0.46 ms 和 0.63 ms。此外,他们在雾小区中提出了一种自适应带宽分配方案,仿真结果表明,

使用自适应带宽分配方案的雾小区的吞吐量优于传统交通管理系统使用的平均带宽分配方案。最后指出,如果能解决 5G 车载网面临的延迟、车辆与 RSU 的频繁切换、服务效率以及可扩展性和兼容性问题,那么 5G SDVN 可以提供足够的灵活性和可靠性来满足未来无人驾驶和智能交通系统(Intelligent Transport System, ITS)的严格要求。

3.1.2 分布式架构

由于车流量不均衡和网络资源利用率较低,VANET 的设计和部署较困难;由于高度动态的拓扑和不可靠的连接,VANET 的管理工作非常艰巨;由于网络的特殊性质,车辆和基础设施节点在地理上分布稀疏和广泛,会导致 VANET 可扩展性问题。软件定义的 VANET(SD-VANET)通过增加网络的吞吐量、可靠性和降低延迟来提高网络效率,但是当网络规模增加时,管理动态变化的数据层请求就变得困难。Kazmi 等^[24]提出了一种分布式 SD-VANET 架构,将 VANET 分区管理,并在每个区域内部署支持 SDN 的控制器,以有效管理高速公路场景中的大规模车辆流量。他们利用 SD-VANET 的控制中心将网络智能地分发到各个分区,以提高网络的可伸缩性,降低网络控制开销,并在 VEINS 试验台上评估该架构,验证了提出的 SD-VANET 对于公路场景的适用性。

Correia 等^[25]提出了一个分层的 SDN 车载网络架构,并基于 Rawashdeh 等^[26]提出的聚类算法设计了一种新的路由协议(HSDV),即选择簇头和簇首分别作为本地 SDN 控制器,对中央 SDN 控制器进行分层访问,当中央 SDN 控制器无法访问或者无响应时,本地 SDN 控制器可以暂时控制本地网络,避免网络瘫痪。利用仿真工具 NS-3 和 SUMO 得到的实验结果表明,HSDV 协议能够选取有效的路由路线,来实现更快的数据传输、更低的传播延迟和更高的网络吞吐量。此外,HSDV 协议能够选择一组具有较少网关节点的路由路径来转发消息,有效降低路由开销。

Sudheera 等^[27]提出了一种基于延迟性能的 SDVN 架构。与其他工作只在网络中心部署一个 SDN 控制器(基于互联网的 SDVN 架构,延迟高且负载大)或在每个 RSU 上部署本地 SDN 控制器的方案(车辆与 RSU 频繁切换)不同,文献[27]提出了将本地 SDN 控制器部署在某些 RSU 上(控制器跨度表示为 n),本地 SDN 控制器不仅可以为中央控制器减轻负载,而且能够满足某些应用严格的时延要求。该文献将本地 SDN 控制器的部署问题建模为时延约束下的多目标优化问题,使用 Matlab 提供的优化工具箱求解整数规划问题,分别得到在 RSU 骨干网络为无线网和有线网,采用不同 SDN 控制器部署方案时,车辆与本地 SDN 控制器的最长和最短接触时间。结果表明其平均值比文献[28]得到的车辆与 RSU 的平均接触时间长 2.67min。另外,假设 RSU 骨干网络为有线网,理论和仿真结果都表明,所提出的架构($n=2$)在延迟方面要明显优于基于互联网的 SDVN 架构。

Alioua 等^[29]将现有的 SDN 异构车载网络(Heterogeneous Vehicular Networks, HetVNs)架构大致分为两类:1)单一控制器架构,整个网络只部署一个中央 SDN 控制器,将其安装在固定的基础设施上,处理所有的网络需求;2)分布式控制器架构,多个控制器分布式部署在多个固定基础设施

上,每个控制器只负责处理本地网络的需求。单一控制器架构具有流量拥塞、高延时和低可靠性和安全性等缺点,为此,文献[29]提出了一种灵活的半集中式车载网架构,称为基于集群的软件定义异构车载网络(CSDHVN)。CSDHVN 将网络划分为两种区域:有基础设施覆盖的区域和无基础设施覆盖的区域;将车辆集群划分两类:静态集群和动态集群,其中静态集群指基站(LTE/NodeB)覆盖范围内的车辆,动态集群算法指文献[30](基础设施覆盖区域)和文献[31](无基础设施覆盖区域)提出的聚类算法;在 Cloudlet 服务器上部署全局 SDN 控制器,在静态群集头上(如蜂窝基站、eNodeB)部署本地中央 SDN 控制器,在动态群集头(簇头车辆)配备支持 SDN 的 OBU(车载单元)作为本地控制器,动态地控制整个网络。此外,基于分布式多控制器结构,文献[29]提出了一种故障恢复机制,即提前预测各级控制器可能出现的故障并制定候选控制器流表,以便网络及时恢复运行。仿真结果证明了 CSDHVN 体系结构的可靠性和效率,并证实在设计 SDVN 体系结构时考虑无基础设施覆盖的区域是有必要的,因为它会对数据包传输成功的概率产生负面影响;还证明 SDN 控制器必须安装在网络边缘,尽可能靠近车辆,才能更好地满足延迟敏感型应用的要求。

3.1.3 数据传播

Liu 等^[32]提出了一种基于地理的广播(Geobroadcast)的 SDN VANET 架构。该架构中配置了一个组件来自动管理 RSU 的地理位置,RSU 作为路由基础设施,支持 Geobroadcast 从源车辆向位于特定地理区域中的目标车辆定期广播消息。在传统的智能交通系统中,可以使用基于核心网的 IP 网络来实现 Geobroadcast 机制,离源节点最近的 RSU 接收的警告消息必须周期性地路由到 ITS 控制中心,控制中心再将警告消息广播给控制区域内的其他 RSU,这种方法使得控制中心的开销增大并且消耗了大量的网络带宽。然而,在基于 SDN 的 Geobroadcast 机制中,源 RSU 接收的第一个警告消息作为分组输入消息被发送到 SDN 控制器,SDN 控制器对分组输入消息进行解码,利用拓扑和地理信息在相应的 RSU 和中间交换机上安装适当的流条目,建立到目标 RSU 的路由路径,用于广播周期性的警告消息。文献[32]使用 OpenNet 进行仿真实验,结果表明,控制器开销降低了 84%,网络带宽消耗降低了 60%,延迟降低了 81%。

He 等^[33]将 SDN 应用于异构车载网络中,利用 SDN 的集中控制来管理异构网络的网络资源。他们在异构 SDVN 的基础上提出了一种成本最小化的网络资源调度方案,包括有效调度无线接口(如 Wi-Fi、蜂窝网络和 DSRC)的方法和单跳、多跳通信中数据传播的数学模型,并使用网络流量评估所提方案的性能,结果证明了该方案的有效性和高效率。

Liu 等^[34]基于 SDN 开发了集成在路边单元中的协作数据调度算法,在混合基础设施与车辆(Infrastructure to Vehicle, I2V)和 V2V 通信环境中提高了数据传播性能。其中,RSU 集中地控制通信区域内的数据传播路径,收集每个车辆的基本信息和数据检索请求,并为其选择合适的 V2V 通信链路。RSU 的功能类似于 SDN 控制器,在逻辑上集中控制网络智能,车辆只需要根据 RSU 下发的控制信息做出相应动

作,从而简化了网络管理,扩展了系统的伸缩性。

Azizian 等^[35]提出了一种基于 SDN、云计算和车载通信的车载网架构,用于分发软件更新的内容。文献[35]使用类似于文献[36]中的方法来计算车辆与邻居车辆的相对移动速度,车辆将相对移动速度表通过控制层直接或以多跳方式发送到 SDN 控制器。SDN 控制器将相对移动速度与阈值进行比较,确定该组车辆是否符合构建通信链路的条件,然后利用相对移动速度表构建有向的车辆连接图,并根据软件更新的类型确定分发更新的路径,从而提高了软件更新的效率和灵活性。同时,文献[35]基于二进制整数规划(Binary Integer Programming,BIP)数学优化模型提出一种频率分配方案,该方案将连接图中的信息作为优化问题的输入,SDN 控制器将通信频带递归地分配给不同通信链路,解决了隐藏节点问题和信道干扰问题,提高了网络资源的利用率。仿真结果表明,车辆使用该频率分配方案接收软件更新的延迟低于使用 WAVE 协议的延迟。

3.2 结合 MEC 的 SDVN

近年来,在物联网和 5G 通信愿景的推动下,移动计算的模式从集中式移动云计算转移到了 MEC。MEC 的主要特点是将移动计算、网络控制和存储下沉到网络边缘(如基站和接入点),以便在资源有限的移动设备上实现计算密集型 and 时延敏感型应用^[37]。MEC 致力于大幅降低延迟和移动设备能耗,解决实现 5G 愿景的关键挑战。MEC 取得的初步成果推动了学术界和产业界对该技术的广泛研究。结合 MEC 的 SDVN 可以减少数据传输时间,并提高延迟敏感应用程序的 QoE^[38]。下面综述了集成 SDN 和 MEC 的车载网络的一些最新研究工作。

目前,IEEE 802.11p、LTE-V2X 和不断发展的 5G 是车载行业主流的无线接入技术,但它们都不能满足车辆通信的所有要求。为了提供低延迟和高可靠性的通信,Liu 等^[13]提出了一种支持 SDN 的可扩展的异构车载网络架构,并根据具体的应用需求提供可靠的通信服务。此外,为了减少整体延迟并减轻骨干网络的流量负载,他们将 MEC 技术引入所提出的架构中。其以城市交通管理中的可靠通信为例,验证了该体系结构的可扩展性、响应性、可靠性和低延迟,并讨论了一些关键技术问题,包括日期同步、无缝切换和可靠通信。

Huang 等^[39]通过观察大量车辆数据发现,根据车辆与邻居车辆 V2V 连接持续时间组成的车辆邻居组(Vehicle Neighbor Group,VNG)可以丰富和增强 5G 车载网服务,由此提出了 5G 支持的软件定义车载网络(5G-SDVN)。其中 SDN 负责动态管理 5G 和车载环境中的 VNG,同时,他们利用 MEC 加强了对 5G-SDVN 的网络控制。其通过将 SDN 与 MEC 相结合,为 5G-SDVN 引入了可编程、灵活且可控的网络架构,从而简化了网络管理,提高了资源利用率,实现了网络的可持续发展。

He 等^[40]设计了一种集成 SDN 和信息中心网络技术(Information Center Network,ICN)的车载网框架,其由 MEC 协助提供服务,可以实现网络、缓存和计算的动态编排。他们基于此框架将资源分配方案建模成一个联合优化网络、缓存和计算收益的问题,并提出了一种深度强化学习算法来解决这

个复杂的最优化问题。在不同场景下的仿真结果表明,该方案改善了车载网的性能。

Wang 等^[41]基于边缘计算节点间的协作,提出了一种协作车载网边缘计算架构(CVEC)。该架构基于 SDN 的 CVEC 中央控制器在逻辑上以集中的方式编程、操作和配置异构网络,灵活地管理分布广泛的边缘基础设施,以满足多样化的车辆需求。CVEC 支持小区内和小区之间的协作以及边缘计算和云计算之间的协作,充分利用车载网中的计算资源来提供实时车载服务和带宽分配服务。此外,文献[41]还介绍了 CVEC 关键技术,包括网络功能虚拟化(Network Function Virtualization,NFV)、智能协作网络(Smart Collaboration Network,SCN)和区块链,最后讨论了实现 CVEC 系统的主要挑战和未来的研究方向。

4 问题和挑战

在提出的 SDN 架构中,控制和转发功能是解耦的,与基于硬件设计的移动网络相比,它具有许多优点。首先,可扩展性表现良好,由于无线和有线收发器都与协议无关,因此收发器可以很方便地控制和复制,且生产和维护成本较低。其次,网络设备的升级和管理非常方便、灵活,SDN 控制器运行在通用计算机上,通过增加控制器的计算能力,可以使纯软件升级更灵活,便于增强容量。同时,可编程性使网络服务更敏捷,便于网络管理。支持 SDN 的车载网虽然可以带来可扩展性、可靠性和灵活性等诸多优点,但也面临着一系列挑战。

(1)安全性。由于管理和控制整个网络环境的操作集中在 ONF 支持的 SDN 架构中的单个控制器上,因此它可能成为单点故障和恶意用户的主要攻击对象,所以必须设计 SDN 控制器免受攻击的方法,以及 SDN 控制器发生故障时的故障恢复方案。例如,在对控制器构成威胁时,恶意用户可能将自己伪装成真实控制器并试图操纵网络功能(控制器身份欺骗)^[42-43]。在 VANET 中,这种攻击可能导致司机转向拥挤的高速公路和危险区域,造成严重的道路伤亡和交通堵塞,从而严重威胁司机和乘客的安全。

另外,传统的网络设备是封闭的,而开放式的统一接口容易引入新的网络攻击形式,如工作在 D-CPI 接口的 OpenFlow 协议易受到攻击而影响网络性能^[44]。攻击者可以在 OpenFlow 中注入虚假的流条目,改变数据转发规则,而数据平面设备无法智能地识别虚假的流条目,从而导致网络故障,引发交通事故。

(2)移动性。蜂窝网络中的术语“切换”是将正在进行的呼叫或数据会话从一个信道转移到另一个信道的过程。当车辆从一个 RSU 服务区切换到另一个服务区时,必须执行无缝切换以保持业务连接不中断。在支持 SDN 的车载网络中,切换机制比传统蜂窝网络更复杂^[14]。

1)当车辆移动到另一个服务区时,需要与新接入的 SDN 控制器重新协商以分配网络资源。

2)车载网络拓扑变化频繁,SDN 控制器需要根据拓扑变化更新 OpenFlow 的流表。

3)随着云服务器的引入,实时迁移和服务器重定向是车载网中必要的操作,这增加了切换的复杂性。

轨迹预测组件可以根据车辆的位置、方向、速度和目的地,估计车辆下一步的位置,以提前完成服务迁移和流表更新。但也会出现切换失败的情况,因此,故障恢复和处理错误的机制也是值得研究的问题。

(3)可扩展性。集中式 SDN 控制器负责生成每个设备的转发规则和程序流条目,这对可扩展性造成了挑战,同时增加了延迟和网络故障的可能性。因为随着 VANET 中车辆密度的上升,控制器要管理大量设备,可能会超出其能力范围而遇到瓶颈,使得网络性能下降。同时,大量新的移动应用程序的急剧增加,导致对数据传输速率和计算能力的需求不断增长^[45]。由于缺乏专门的资源和连接管理机制,车载网中各种数据信息的传播和服务的实施受到限制,如路线规划、交警警报传播、上下文感知信息、娱乐信息、移动车载云服务等。

(4)服务效率问题。对于未来的无人驾驶车辆,车辆不仅是交通工具,而且还是用户的娱乐中心。未来 5G 车载网络需要提供多种多媒体业务。预计 5G 车载网络的流量会大幅增加,目标区域内转发条目的数量和大小可能会超过单个 SDN 控制器的内存资源^[46],因此,提高 5G 车载网络的服务效率是一个巨大的挑战。

(5)部署和标准化。SDVN 是逻辑上集中但物理上分散的网络。实际上,分布式 RSU 和 BS 设备可能由不同的基础设施提供商拥有,如何以及在何处部署这些边缘数据中心来管理用户的可用资源也是需要解决的问题。另外,SDVN 的边缘基础设施应该相互协作,共享存储和计算资源,而这些边缘设备之间的通信协议和标准对当前的研究提出了巨大的挑战。最后,SDN 控制器管理复杂的车载网络需要大量开销,因此分布式控制器对降低控制开销具有重要意义^[47],而如何部署分布式控制器和基于 SDN 的控制器之间的通信协议也是要考虑的方面。

5 应用前景

基于 SDVN 的灵活性、易管理性和可靠性,本节简要介绍了 SDVN 的应用前景。集成 SDN 的车载网能够满足安全和非安全应用的要求。

(1)带宽管理车载数据、通信要求、云网络和自组织企业网络间关联的增长,导致人们对带宽利用率的要求越来越高。传统网络是复合的,并且无法在按需分配带宽模型的新标准下动态地提供网络设施。SDN 技术可在 VANET 的动态环境中实现经济高效的带宽按需分配。应用程序通过转发设备与配置在 SDN 控制器上的带宽调度器进行交互来建立按需连接。基于 OpenFlow 的 SDN 为移动设备提供按需带宽服务,允许车辆根据需要调整通信连接和通信带宽,并仅支付实际使用的网络资源的费用。SDN 网络的设计人员可以通过 SDN 控制器的南向 OpenFlow 接口控制每次运行的共享网络带宽,同样地,智能设备、仪器或其他策略系统也可以通过北向 API 访问此类型的网络控制,协助预留所需的带宽或实时更改 QoS 策略。

(2)智能停车场

智能停车是最受欢迎的智能城市应用之一,由研究人员和商业供应商开发,其通过检索地面和云应用程序的传感器

数据,快速找到免费停车位。但是,随着物联网设备的指数级的增加和设备对网络的频繁访问,传统车载网络将无法有效管理车载设备及其产生的大量数据。SDVN 使网络控制功能集中化、转发功能分布化,能够在未来的车载网应用中解决以上问题。为此,诺基亚创建了一个基于 SDN 的独立框架,称作“Nuage Networks”,该框架提供软件定义的广域网(SD-WAN)、虚拟化云服务(Virtualized Cloud Service, VCS)和虚拟化安全服务(Virtualization Security Service, VSS)等平台^[48]。他们的 SDN 解决方案提供了服务更改的灵活性、无缝响应可扩展性,并支持虚拟化平台。网络虚拟化服务平台(Network Virtualization Service Platform, NVSP)将物联网应用于现实生活中的智能城市应用^[49],为云平台提供可扩展性,为数据中心网络基础架构提供虚拟化功能。诺基亚提供的物联网智能管理平台可轻松部署智能停车、驾驶员身份验证、车辆连接等新服务。

(3)路况监测

SDN 通过从不同传感器中获取数据,可以监测道路拥堵和紧急情况,实时收集车辆与道路固定基础设施之间的数据。基于 SDN 的通信采用异构无线网络接口,提高了网络的整体性能。SDN 路由器使用密度、延迟、抖动和丢包率等性能参数周期性地更新 SDN 控制器。

(4)交通管制和管理

SDN 控制器可以有效地收集车辆与道路固定基础设施的信息,掌握网络全局视图,同时优化 V2V/V2I 多跳路由,因此,SDVN 可以实时监控道路和交通状况,通过向车辆广播道路拥堵、交通事故等信息,来管理和控制大量交通流量。另外,SDVN 支持不同接口的接入,控制器下发的控制信息可以快速地传播到网络设备,车辆可以根据下发的策略规则灵活地做出响应。

(5)辅助车辆换道

美国交通部对车辆安全应用(如车道变换提醒)进行了广泛的研究^[50],在车道变换期间向驾驶员发送警告信息以避免追尾事故。传统的车道变换系统存在许多挑战,如道路状况、交通密度、车辆行驶方向和速度等信息的获取困难,只能协助单车道变换。SDN 控制器可根据网络设备收集的数据动态更新道路系统的全局视图,提供可靠的车道变换辅助。RSU 将访问次数较多的数据信息存储于网络边缘,当车辆需要改变车道时,附近的 RSU 向控制平面发送请求,然后 SDN 控制器根据掌握的网络全局信息向 RSU 发出控制策略,车辆根据 RSU 转发的数据包做出响应。

(6)无人驾驶

无人驾驶汽车能够在道路上安全可靠地行驶,主要通过车载传感对行驶车辆的道路环境进行感知与识别,对获取的车辆位置、交通信号、道路以及障碍物等信息进行分析处理,从而控制汽车的速度和转向。SDVN 为联网汽车提供信息查询和导航服务,SDN 控制器根据全网信息为联网汽车发送可靠的交通信息,包括交通灯信息、指示信息、路况信息等,将其作为汽车自动驾驶的控制信号。

结束语 通过支持安全、办公和信息娱乐服务,车载网络为实现智能城市发挥着重要作用。然而,车载网络复杂且不

灵活的架构面临着一系列挑战,如高移动性、间歇性连接、网络接口的异构性。SDN 作为一种可编程和灵活的网络架构,在车载网领域受到学术界和工业界的关注。本文给出了 SDVN 的概述,介绍了 SDN 在车载网中的最新研究进展,并提出了结合 MEC 的 SDVN,分析了将 SDN 应用于车载网要面临的各种挑战,进而讨论了 SDVN 的几种应用前景。未来我们将设计一种改进的 SDVN 架构,用于车载网络中的数据传播,通过模拟现实道路环境来分析和验证其性能。

参 考 文 献

- [1] TRUONG N B, LEE G M, GHAMRI-DOUDANE Y. Software defined networking-based vehicular ad hoc network with fog computing [C]// IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management. Piscataway: IEEE, 2015: 1202-1207.
- [2] LIU J Q, WAN J F, WANG Q R, et al. A survey on position-based routing for vehicular ad hoc networks [J]. Telecommunication Systems, 2016, 62(1): 15-30.
- [3] SHAH S A A, AHMED E, XIA F, et al. Adaptive beaconing approaches for vehicular ad hoc networks; a survey [J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(2): 1263-1277.
- [4] JABBARPOUR M R, MAREFAT A, JALLOLI A, et al. Cloud-based vehicular networks: a taxonomy, survey, and conceptual hybrid architecture [J]. Wireless Networks, 2017(1): 1-20.
- [5] TALEB T, SAMDANIS K, MADA B, et al. On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge architecture & orchestration [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3): 1657-1681.
- [6] CHEN M, QIAN Y F, HAO Y X, et al. Data-driven computing and caching in 5G networks: Architecture and delay analysis [J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(1): 70-75.
- [7] LIU L, ZHOU J T. Review for research of control plane in software-defined network [J]. Computer Science, 2017, 44(2): 75-81.
- [8] TRIVISONNO R, GUERZONI R, VAISHNAVI I, et al. SDN-based 5G mobile networks: architecture, functions, procedures and backward compatibility [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2015, 26(1): 82-92.
- [9] VIZARRETA T P, TRIVEDI K, HELVIK B, et al. Assessing the maturity of SDN controllers with software reliability growth models [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2018, 15(3): 1090-1104.
- [10] SEZER S, SCOTTHAYWARD S, CHOUHAN P K, et al. Are we ready for SDN? Implementation challenges for software-defined networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(7): 36-43.
- [11] OPEN NETWORK FOUNDATION (ONF). Software-defined networking: the new norm for networks [EB/OL]. (2014-11-10) [2018-12-12]. <http://connection.ebscohost.com/c/articles/99813922/software-defined-networking-new-norm-networks>.
- [12] ZHANG C K, CUI Y, TANG Y W, et al. State-of-the-art survey on software-defined networking (SDN) [J]. Journal of Software, 2015, 26(1): 62-81.
- [13] LIU J Q, WAN J F, ZENG B, et al. A scalable and quick-response software defined vehicular network assisted by mobile edge computing [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(7): 94-100.
- [14] TOMOVIC S, YOSHIGOE K, MALJEVIC I, et al. Software-defined fog network architecture for IoT [J]. Wireless Personal Communications An International Journal, 2017, 92(1): 181-196.
- [15] ZHENG K, ZHENG Q, CHATZIMISIOS P, et al. Heterogeneous vehicular networking: A survey on architecture, challenges and solutions [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 17(4): 2377-2396.
- [16] ZHANG S J, LAN J L, HU Y X, et al. Survey on scalability of control plane in software-defined networking [J]. Journal of Software, 2018, 29(1): 160-175.
- [17] KUO J J, SHEN S H, KANG H Y, et al. Service chain embedding with maximum flow in software defined network and application to the next-generation cellular network architecture [C]// IEEE INFOCOM 2017-IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE, 2017: 1-9.
- [18] SHUAI Z, MEDHI D. Application-aware network design for hadoop mapreduce optimization using software-defined networking [J]. IEEE Transactions on Network & Service Management, 2017, 14(4): 804-816.
- [19] KU I, LU Y, GERLA M, et al. Towards software-defined VANET: architectures and services [C]// 13th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET). Piscataway: IEEE, 2014: 103-110.
- [20] SALAHUDDIN M A, ALFUQAHA A, GUIZANI M. Software-defined networking for RSU clouds in support of the internet of vehicles [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2015, 2(2): 133-144.
- [21] HE Z J, CAO J N, LIU X F. SDVN: enabling rapid network innovation for heterogeneous vehicular communication [J]. IEEE Network, 2016, 30(4): 10-15.
- [22] TRUONG N B, LEE G M, GHAMRI-DOUDANE Y. Software defined networking-based vehicular ad hoc network with fog computing [C]// IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM). Piscataway: IEEE, 2015: 1202-1207.
- [23] GE X, LI Z P, LI S K. 5G software defined vehicular networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(7): 87-93.
- [24] KAZMI A, KHAN M A, AKRAM M U. DeVANET: Decentralized software-defined VANET architecture [C]// IEEE International Conference on Cloud Engineering Workshop. Piscataway: IEEE, 2016: 42-47.
- [25] CORREIA S, BOUKERCHE A, MENEGUETTE R I. An architecture for hierarchical software-defined vehicular networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(7): 80-86.
- [26] RAWASHDEH Z Y, MAHMUD S M. A novel algorithm to form stable clusters in vehicular ad hoc networks on highways [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012, 2012(1): 1-13.
- [27] SUDHEERA K L K, MA M, ALI G G M N, et al. Delay effi-

cient software defined networking based architecture for vehicular networks [C]//IEEE International Conference on Communication Systems. Piscataway:IEEE, 2017:1-6.

[28] XIAO X F, KUI X Y. The characterizes of communication contacts between vehicles and intersections for software-defined vehicular networks [J]. Mobile Networks & Applications, 2015, 20(1):98-104.

[29] ALIOUA A, SENOUCI S M, MOUSSAOUI S, et al. Software-defined heterogeneous vehicular networks: taxonomy and architecture [C]//Global Information Infrastructure & Networking Symposium. Piscataway:IEEE, 2017:50-55.

[30] REMY G, SENOUCI S M, JAN F, et al. LTE4V2X: LTE for a centralized VANET organization [C]//Global Telecommunications Conference. Piscataway:IEEE, 2012:1-6.

[31] REMY, SENOUCI, JAN, et al. LTE4V2X- Collection, dissemination and multi-hop forwarding [C]//IEEE International Conference on Communications. Piscataway:IEEE, 2012:120-125.

[32] LIU Y C, CHEN C, CHAKRABORTY S. A software defined network architecture for GeoBroadcast in VANETs[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway:IEEE, 2015:6559-6564.

[33] HE Z J, ZHANG D Q, LIANG J B. Cost-efficient sensory data transmission in heterogeneous software defined vehicular networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(20):7342-7354.

[34] LIU K, NG J K Y, LEE V C S, et al. Cooperative data scheduling in hybrid vehicular ad hoc networks: VANET as a software defined network [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(3):1759-1773.

[35] AZIZIAN M, CHERKAOUI S, HAFID A S. Vehicle software updates distribution with SDN and cloud computing[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(8):74-79.

[36] MACH P, BECVAR Z. Mobile Edge Computing: A survey on architecture and computation offloading[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(3):1628-1656.

[37] MAO Y Y, YOU C S, ZHANG J, et al. A survey on mobile edge computing: The communication perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4):2322-2358.

[38] ZHANG Z X, BOUKERCHE A, PAZZI R. A novel multi-hop clustering scheme for vehicular ad-hoc networks[C]//Proceedings of the 9th ACM International Workshop on Mobility Management & Wireless Access. New York:ACM, 2011:19-26.

[39] HUANG X M, YU R, KANG J W, et al. Exploring mobile edge computing for 5G-enabled software defined vehicular networks [J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(6):55-63.

[40] HE Y, LIANG C C, ZHANG Z, et al. Resource allocation in software-defined and information-centric vehicular networks with mobile edge computing [C]//IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Piscataway:IEEE, 2018:1-5.

[41] WANG K, YIN H, QUAN W, et al. Enabling collaborative edge computing for software defined vehicular networks [J]. IEEE Network, 2018, 32(5):1-6.

[42] AKHUNZADA A, AHMED E, GANI A, et al. Securing software defined networks: taxonomy, requirements, and open issues [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4):36-44.

[43] KARMAKAR K K, VARADHARAJAN V, TUPAKULA U. Mitigating attacks in software defined network (SDN) [C]//Fourth International Conference on Software Defined Systems. Piscataway:IEEE, 2017:1-8.

[44] WANG T, CHENG G Z. Research on software-defined network and the security defense technology [J]. Journal on Communications, 2017, 38(11):137-164.

[45] HWANG R H, TSENG H P. Load balancing and routing mechanism based on software defined network in data centers [C]//International Computer Symposium (ICS). Piscataway:IEEE, 2017:165-170.

[46] CHAUDHARY R, AUJLA G S, KUMAR N, et al. Optimized big data management across multi-cloud data centers: software-defined-network-based analysis [J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(2):118-126.

[47] ZHAO J L, HUA Q, ZHAO J H, et al. Towards controller placement problem for software-defined network using affinity propagation [J]. Electronics Letters, 2017, 53(14):928-929.

[48] NOKIA. SDN Nuage networks[EB/OL]. [2019-1-22]. <http://www.nuagenetworks.net/>.

[49] NOKIA. IoT for smart cities [EB/OL]. [2019-1-22]. <https://networks.nokia.com/services/iot-for-smart-cities>.

[50] VOLPE NATIONAL TRANSPORTATION SYSTEMS CENTER. Safety pilot model deployment lessons learned and recommendations for future connected vehicle activities [EB/OL]. (2015-10-19) [2019-1-22]. <https://www.its.dot.gov/index.htm>.



GU Xiao-hui, born in 1995, postgraduate. Her main research interests include vehicular network, mobile edge computing and cloud computing.



ZHANG Guo-an, born in 1965, Ph. D, professor, Ph. D supervisor. His main research interests include vehicular network, and wireless communication network theory and technology.