

软件定义的 D2D 和 V2X 通信研究综述

邵雯娟^{1,2}, 沈庆国^{1,3}

(1. 解放军陆军工程大学通信工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 南京理工大学紫金学院, 江苏 南京 210023;
3. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 211189)

摘 要: 设备到设备 (D2D) 和车辆到万物 (V2X) 技术有一定相似性, 都被视为 5G 通信的重要组成部分, 可为蜂窝移动通信提供备用网络服务和多种应用服务。而软件定义网络 (SDN) 可提高 D2D 和 V2X 的通信能力和灵活性。对软件定义的 D2D 通信 (SD-D2D) 和软件定义的 V2X 通信 (SD-V2X) 进行了梳理, 基于它们的共性和特色, 分别剖析了它们的发展现状和通信架构, 并分析了 D2D 节点位置和发现管理、D2D 路由控制、D2D 流表管理、V2V 路径规划、V2V 路径恢复等关键技术。最后指出 SD-D2D 架构已接近成熟, SD-V2X 框架也已初步确定, 原有 D2D/V2X 通信中存在的干扰管理、移动管理和路由管理等问题能够得到有效改善, 同时还指出现有 SD-D2D/V2X 研究存在的与实际应用脱节的现象有待克服。

关键词: 设备到设备; 车辆到万物; 5G 移动通信; 软件定义的 D2D 网络; 软件定义的 V2X 网络

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2019075

Survey of software defined D2D and V2X communication

SHAO Wenjuan^{1,2}, SHEN Qingguo^{1,3}

1. College of Communications Engineering, PLA Army Engineering University, Nanjing 210007, China

2. Zijin College, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210023, China

3. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 211189, China

Abstract: The related D2D (device-to-device) and V2X (vehicle-to-everything) are regarded as vital components of 5G communication system, which providing alternative network services and multiple application services for cellular network. In the meanwhile, SDN (software defined networking) can improve the compatibilities and flexibilities of D2D and V2X. SD-D2D (software defined D2D communication) and SD-V2X (software defined V2X communication) technologies were reviewed. Based on their similarities and respective characteristics, their state-of-arts and architectures were reviewed accordingly, and the key technologies such as D2D location/discovery management, D2D routing control, D2D flow table management, V2V path scheduling, and V2V path recovery were analyzed. Finally, it was pointed out that the SD-D2D architecture was approaching mature and the SD-V2X framework had been preliminarily determined, the existing problems of interference management, mobile management and routing management in D2D/V2X communication could be effectively solved. Furthermore, it was also pointed out that the disconnection between the existing SD-D2D/V2X studies and the actual application needed to be overcome.

Key words: D2D, V2X, 5G mobile communication, SD-D2D, SD-V2X

收稿日期: 2018-11-06; 修回日期: 2019-02-14

通信作者: 沈庆国, shenqg@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61271254); 南京理工大学紫金学院科研基金资助项目 (No.2018ZRKX0401004)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61271254), The Research Project of Zijin College, Nanjing University of Science and Technology (No.2018ZRKX0401004)

1 引言

作为 4G 和 5G 通信系统中的关键技术, 设备到设备(D2D, device-to-device)和车辆到万物(V2X, vehicle-to-everything)通信具有提高系统性能、提升用户体验、扩展蜂窝通信应用等前景, 受到人们的广泛关注。D2D 通信是指用户数据可不经网络中转而直接在终端之间传输; V2X 泛指车辆使用邻近服务实现和其他任意网络、任意个体间的通信, 包含车辆到车辆(V2V, vehicle-to-vehicle)、车辆到行人(V2P, vehicle-to-pedestrian)、车辆到路边基础设施(V2I, vehicle-to-infrastructure)等多种通信形式^[1], 可为许多新的应用场景提供支持, 如车辆自动驾驶、公路安全系统、交通信息管理等。

D2D 和 V2X 技术有很大的相关性。自 3GPP 在 LTE Rel.12 和 Rel.13 中提出了基于 D2D 的 V2V 概念后, V2X 技术发展迅速, 日益受到产业界的关注。伴随着 3GPP LTE-V2X Rel.14 版本的完成, V2X 产业推动也正式开始启动, 全球多家通信公司发布了支持 V2X 的芯片或模组, 国内也开展了 V2X 的测试床试验。V2X 可以基于 D2D 通信技术实现, 但在可靠性和时延特性的要求上更加严格, 而 D2D 无线资源的分配是影响可靠性和时延的关键因素。因此, 大多数 D2D 通信的原理及应用场景能转化成适用于 V2X 通信, 只有极少与 V2V 特性相关的技术需要重新规划考虑(比如车辆移动会造成瞬时的信道状态改变, 导致 D2D 通信中的资源管理技术不适用于 V2V)^[2]。V2V 和 V2P 既可采用基于 IEEE 802.11p 的专用短程通信技术, 也可采用蜂窝网授权通信频段的 D2D 技术; 同样, V2I 既可采用 IEEE 802.11p 技术, 也可采用蜂窝网络技术。相比较而言, 采用基于蜂窝网络/D2D 技术进行 V2X 更能节约传输轮询信号的能量, 通信连续性更好, 而 IEEE 802.11p 对同步要求低, 标准更为稳定^[3], 因此人们认为 IEEE 802.11p 是一种非蜂窝网授权频段的 D2D, 它们将长期共存, 且软件定义的统一控制将使它们各自的优点得到充分发挥。

D2D 和 V2X 都被视为 5G 通信的重要组成部分, 可为蜂窝移动通信提供备用网络服务和多种应用服务。由于 D2D 和 V2X 通信的建立可以不依赖基站控制进行, 其在降低通信时延、扩大基站覆盖范围的同时, 也因缺乏统一协调而存在带内(in-band)频谱管理及 D2D 或 V2X 用户间和蜂窝

用户间的干扰管理、移动管理和路由管理等问题。

软件定义网络(SDN, software defined networking)数据/控制分离的设计理念在网络灵活性和集中控制能力之间取得了较好平衡。把 SDN 理念和技术应用到 D2D/V2X 网络架构中, 可以提升 D2D/V2X 网络智能和整体控制能力, 并为解决上述问题提供了有力的支撑。为此, 近年来, 学术界提出了软件定义的 D2D 通信(SD-D2D, software defined D2D communication)和软件定义的 V2X 通信(SD-V2X, software defined V2X communication)这 2 个概念, 并进行了广泛的研究, 取得了一些成果, 有力推动了 D2D 和 V2X 技术的发展。

基于 SD-D2D 和 SD-V2X 的共性和特色, 本文对 SD-D2D 和 SD-V2X 的技术特点进行了梳理, 分别剖析了它们的发展现状和通信架构, 并对 D2D 节点位置和发现管理、D2D 路由控制、D2D 流表管理、V2V 路径规划、V2V 路径恢复等关键技术进行了细致分析, 同时对未来发展趋势进行了展望。

2 软件定义的 D2D 通信研究现状

目前, 学术界对软件定义的 D2D 系统开展了细致的研究, 以期解决 in-band 频谱管理和蜂窝用户间的干扰管理、移动管理、路由管理、模式切换等问题。

如何在频谱资源有限、超密集异构的网络中进行通信是未来 5G 网络中实现 D2D 技术必须要解决的重要问题, 而高效的网络架构有助于 D2D 技术在 5G 通信系统中更好地融合^[4]。基于以上原因, 运营商迫切需要一种新的技术, 一方面能够利用 D2D 通信构建的传输资源降低蜂窝网络的流量拥塞, 提高用户的业务体验质量(QoE, quality of experience); 另一方面能够通过虚拟化等方法, 增强 D2D 通信的灵活性、可管理性和便捷性。

最初 SDN 是为有线通信而设计的, 但是 OpenFlow 协议的灵活性提供了网络重新配置的能力, 为 SDN 在无线通信的应用前景铺平了道路。SDN 数据/控制分离的设计理念使网络获得很高的灵活性, 可以对网络设备进行集中控制。当前, 学术界、产业界对于 SDN 在无线通信的研究和应用主要集中在核心网、基站(eNode B)和接入网层面。针对不同的应用场景和实际需求, 研究者们已经提出多种成熟有效的典型应用场景和成熟用例^[4-7]。近几年, SDN 技术已经整合到 D2D 通信架构中, 基于节点间

协助, 提供移动小片云、边缘计算等, 在接入网引入 SDN 也逐渐成为学术界的研究重点。

基于 SDN 的设计理念, 产业界把它运用到移动通信的 D2D 通信架构中, 提出了 SD-D2D 架构, 来提高异构网络环境下 D2D 组网的灵活性与高效性, 其基本架构如图 1 所示, 其中, eNode B 和手机终端构成数据平面, SDN 控制器和顶端的资源分配、路由管理等功能模块构成控制平面。

Ngo 等^[8]提出了一种在网络全控制的情况下使用 SDN 的 D2D 通信架构, 分别在网络端和移动终端中共同集成了 5 个组件: D2D 服务器、SDN 全局控制器、SDN 本地控制器、Open vSwitch 和无线资源映射器, 这种架构的优点是解决了传统技术的缺点, 允许 2 个移动设备在没有管理者的情况下相互通信, 使网络拓扑结构具有可伸缩性, 避免出现管理节点能量耗竭、单点故障等恶劣情况。此外, 分层控制系统不需要移动设备的 LTE 接口保持活动状态, 节约了终端的传输能耗, 提高了资源利用的有效性。

不同于上述 SDN 方案, 基于 SDN 和 NFV 的概念, Orsino 等^[9]提出了一种新型的, 基于集中化无线接入网(C-RAN, centralized RAN)、层次化 D2D 和分布式 SDN 控制器相结合的架构, 通过微蜂窝基站和 D2D 的相互配合, 在有效分流主基站流量的同时, 减少了网络信令开销和能耗。

Meneses 等^[10]在异构网络环境下, 提出了一种基于 SDN 的可携带通信方法, 将移动中的终端设备虚拟化成云环境下的虚拟设备, 使用 SDN 和 NFV 技术, 将设备上的数据流和多媒体流, 机会式地重路由到附近的设备上, 实现在接入云框架中处理流

量的转移, 从而减少对物理实体的潜在影响。该方法将物理网络中所有的移动性管理和计算移动到云中, 虽然增加了云端计算的功率, 但物理网络可以减少控制信令的传输。

Abolhasan 等^[11]将移动自组网络、无线传感网络、D2D 网络、车联网等统一归纳为无线分布式网络(WDN, wireless distributed network), 进而提出了一种基于 WDN 的混合 SDN 框架。该框架使用 2 个不同的频带分别进行数据传输和网络控制, 并采用混合控制的思路, 集合了集中处理和分布式处理的优势, 即控制器集中地进行预处理, 转发节点分布式地决策路由, 提高了无线网络的规模化和可靠性。

Oztoprak 等^[12]将 D2D 技术和 SDN 技术相结合, 提出了一种文件分发系统。在该系统中, 网络节点和网络设备通过 D2D 通信, 具有面向邻近设备的缓存和转发能力, 以提高网络吞吐量和减少能量损耗。根据缓存内容放置的不同, 文中将该系统细分为 2 种模型: 模型 A 中 CDN 服务器和 SDN 控制器部署在数据中心; 模型 B 中 CDN 服务器部署在数据中心, 但基站具备 SDN 的控制功能和缓存功能, 该模型将控制和缓存功能下移至接入网中, 极大地提高了内容分发的响应速度。

Usman 等^[13]在移动云环境下, 提出了一种新型软件定义的混合式 D2D 框架, 集中式部署 SDN 控制器, 将终端设备群分割成若干个移动云, 每个移动云由一个簇头(CH, cluster header)进行管理, CH 通过 D2D 通信与所辖终端进行控制管理, SDN 控制器通过 LTE 链路与 CH 联系。该框架减少了原来终端的 LTE 无线链路和网络的能量损

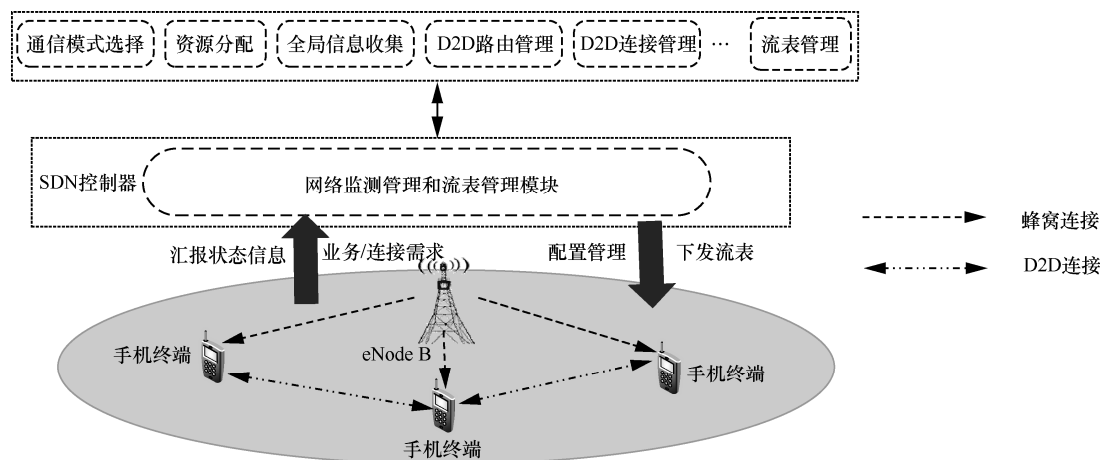


图 1 SD-D2D 基本架构

耗,同时移动云的管理方式也增强了无线网络的扩展性。

在文献[13]的基础上,Usman 等^[14]进一步针对 5G 网络中的公众安全应用,提出了一种软件定义的移动云 D2D 通信框架,采用分层的体系架构进行 SDN 控制器的放置,即面向核心网采用全局控制,面向移动云、小片云采用局部控制,这种分层架构的好处是提供了移动云、小片云的可扩展性和伸缩性,节约了网络的能量,保证了基础网络的顽健性。

Wang 等^[15]将无线网络虚拟化和 SDN、自主学习的 D2D 通信相结合,在移动网络的边缘部分,提出了一个以知识为中心的、D2D 通信辅助的蜂窝网络体系结构。首先,设计了一个 D2D 辅助的虚拟化边缘蜂窝网络体系结构,由物理层、知识层和虚拟管理层组成,该体系结构通过充分利用移动用户之间 D2D 通信中获得的知识信息,动态检测网络结构并管理通信资源;然后描述了系统中存在的问题和潜在的解决方案,包括知识提取、社会感知、激励方案、信任管理机制和优化资源分配。

总体而言,目前,针对 SD-D2D 的研究比较广泛,但也存在不足。从研究的领域看,SD-D2D 研究主要偏重于网络通信性能(如带宽、时延、吞吐量)提升,相关研究仍不够深入和细致,一些具体的、有潜力的场景,如演唱会多播、物联网 D2D 等,却很少有人研究;从研究的内容看,需要针对 5G 网络的核心应用进行拓展,例如,关于流量卸载的研究目前主要针对小型普通文件的本地卸载,缺少对高带宽需求的多媒体卸载的研究工作;从 D2D 部署和应用来看,现有的研究已经将 D2D 通信与社会网络相结合,进行资源分配、干扰控制、路由转达、数据分发,有效地提升网络性能,但缺少在实际蜂窝网络 SD-D2D 架构中进行部署和应用研究。

同时还应看到,尽管 D2D 技术早已成为通信热点技术,但规模化应用偏少,这是其发展中的瓶颈问题,需要有良好的商业应用模式解决信任问题、好友匹配、激励/收费中的恶意欺诈等问题。在未来的研究中,需要考虑如何在控制器中加载社会网络功能和应用终端的社会属性以及如何在控制器中维护社会网络信息等问题。依托 SDN 构建良好的生态链,这些问题有望得到合理解决,相关领域可能是未来的研究热点。

3 软件定义的 V2X 通信研究现状

V2X 通信技术是智能交通和智能汽车的支撑技术之一,它使配备多联网接入技术和传感技术(例如照相机、传感器、雷达、定位设备)的新一代车辆间及其与周围环境间具有增强的相互作用^[16-17]。V2X 通信被广泛认为是提高道路安全和交通效率的关键技术,可以极大地促进智能交通系统(ITS, intelligent traffic system)的发展。基于 V2X 通信,车辆可以迅速检测出潜在的危险和不舒适的道路状况,并将其传达给其他车辆、附近行人以及路边节点,以进一步传播信息,主要目的是改善道路安全。此外,通过 V2X 通信对突发交通状况产生快速反应,可减少在拥挤的交通中所花费的时间,带来减少能量消耗和车辆排放等额外好处。

目前,在全球范围内,V2X 对公路运输系统的明显影响已经得到了不同汽车制造商和电信公司等参与者的认可。同时,在产业界已经给出了一系列较成熟的研究方案和提议。迄今为止,大多数国家已分配专用无线电频谱来支持 V2X 通信,并促进相应的 V2X 安全技术和 ITS 应用的发展。主要的汽车制造商和电信公司参与者加入了第五代汽车协会(5GAA, 5G automotive association),基于 LTE 的增强及 5G 系统,提供与蜂窝 V2X(C-V2X, cellular V2X)技术互操作的解决方案^[18]。

在 5G 车联网的技术发展中,SDN 技术将网络管理功能从网络传输功能中解耦和独立出来,使网络管理更为有效,这将成为网络体系架构的一个重要方法。除了给有线网络和无线网络带来的优势外,SDN 还具有特别适用于车联网的独特优势。基于 SDN 的逻辑集中控制功能,提供了对网络拓扑的全局认识,能够高效地分配所有类型的网络资源(例如带宽、频谱、功率传输等)。一方面,通过针对每个特定的路况,SDN 控制器优选最合适的解决方案,并根据实际情况调整系统参数,可以增强现有车辆体系结构的性能;另一方面,随着 SDN 带来的虚拟化和抽象化,使异构网络技术在车载网络中的集成变得简单和透明。因此,产业界提出了 SD-V2X 网络,其基本架构如图 2 所示,它与第 2 节介绍的 SD-D2D 结构有很大的相似性。图 2 中,eNode B、RSU 和车载终端构成数据平面,SDN 控制器和顶端的资源分配、路径管理等功能模块构成控制平面。

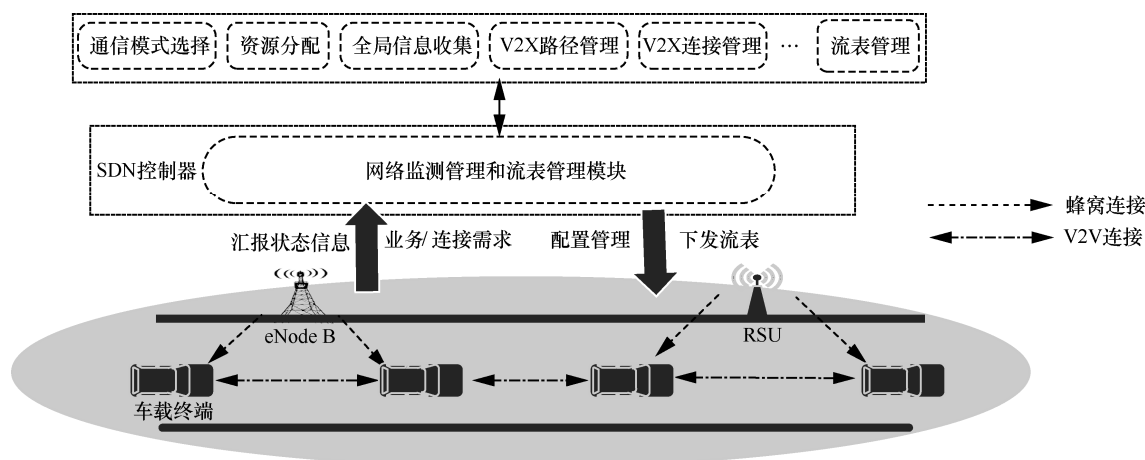


图2 SD-V2X 基本架构

1) SDN 控制下的资源分配和优化

V2X 网络扩展了 SDN 的转发功能，为防止网络拥塞、减少分组丢失、节省频谱资源，学者们研究了基于 SDN 的异构接入环境下的无线资源管理技术^[19-23]，例如，在文献^[19-21]中，学者们将基于簇的车辆自组网络（VANET, vehicular Ad-Hoc network）与 5G 蜂窝网络相结合，使用 SDN 控制器，对车辆的相似访问行为（如车辆行驶路线、车辆速率、与 RSU 的距离等）进行聚类，挖掘共通性，从而形成车辆簇群，通过 SDN 控制器对簇头进行管理，实现分层的体系架构，提高车联网网络性能的稳定性。Huang 等^[22]提出了一种在软件定义的车联网中多种异构接入环境下的资源分配机制，该机制以最大限度提高系统的 QoE 为目标，利用车辆状态信息获取车辆与不同接入技术间的关联度，联合地确定资源分配策略：当 V2I 通信不能满足用户的 QoE 要求时，为进一步提高性能，调配到 V2V 通信。仿真结果表明，该方案能有效利用 LTE 和 Wi-Fi 网络的可用带宽，从而更好地满足用户 QoE 的需要。Cordeschi 等^[23]解决了 V2I 中认知无线电接入网的资源管理问题，利用自适应控制器，优化能量管理，处理由可靠性引起的突发性网络变化。

2) 基于 SDN 的路由和转发功能

基于 SDN 构建全局动态信息库，做出全局的路由决策。在传统的车联网中，车辆间相互协作并交换各自传感器收集到的不同信息，从而构建局部动态信息库。该局部动态信息库包含道路标志等静态信息，以及交通、天气条件等动态信息。将 SDN 集成到车联网中，允许控制器集中管理和维护全局动态信息。通过收集和过滤车辆提供的局部动态

信息，控制器获得并构建整个（或部分）网络状态的全局动态视图，该视图可对车辆的路由请求做出更明智和更精细的决策。例如，Dong 等^[24]提出了一种基于 SDN 的车辆自组网按需路由协议，将数据转发层和网络控制层相分离，提高数据传输效率；RSU 起到局部控制器的作用，负责在路段所辖区域范围选择适合的车辆转发分组。该方案采用全局层和局部层两级的设计架构，全局层采用“排名查询方案”采集车辆信息，确定路段沿线的范围；局部层负责在全局层确定的范围中选择适合的车辆转发分组。

3) 基于 SDN 的车联网流量卸载

在传统的车联网中，只能局部地基于网络的有限信息进行卸载决策，如基于历史网络参数，它不能反映当前网络实时状态，甚至会导致非有益的决策。此外，在基于 SDN 的车载网络中，采用 SDN 控制器集中式全局视图，可以动态地根据实时网络状态做出更有益的卸载决策，更适合用户的需求，适应当前的网络条件^[19,25-26]。

Huang 等^[22]提出了一种在 VANET 中，通过 V2V 车辆通信来卸载蜂窝通信流量的方案，该方案通过测算在 VANET 中存在的 V2V 路径，来有效卸载蜂窝网络流量。同时，该方案还设计了一种基于 SDN 的移动边缘计算服务器——SDNi-MEC，解决了 VANET 中 V2V 流量卸载的复杂问题。每个车辆向 SDNi-MEC 服务器的状态数据库报告它的状态信息，服务器上的 SDN 控制器根据状态信息，测量两辆车之间是否存在 V2V 路径，以此卸载两者间现有的蜂窝流量。通过该方案的性能分析表明，当车辆密度达到中等

时,这种流量卸载方案在蜂窝网络链路和 V2V 路径上都具有较好的吞吐量。

Baron 等^[27]提出了一种类似 SDN 的集中式车联网流量卸载框架,通过车联网将数据中心源端产生的数据流机会式地传输到目的端。其中,SDN 控制器充当中心服务代理 (SB, service broker),在控制平面中配置车联网数据流的转发路径,同时在道路中设定若干个卸载热点,充当本地服务代理 (SA, service agent),根据转发路径在数据平面实行数据流的转发。

将 SDN 方法集成到浮动内容 (FC, floating content) 的分发中,实现在一个给定的地理区域——锚区 (AZ, anchor zone) 分布式地、机会式地实现内容的共享,能有效提高 FC 的分发性能^[24,28]。Soua 等^[24]提出了一种以 SDN 为内容中心网络和 FC 提供支持下的 VANET 内容分发机制,根据节点移动性,SDN 控制器选择较佳的缓存效用节点、决策分发路径、转发激活内容所经过的 AZ 等。仿真结果表明,该机制能适应高动态和易失性的网络环境,并有效改善 VANET 中内容存储、传播和转发性能。Maio 等^[28]提出了一种基于 SDN 的车辆自组网 FC 分发体系架构,将 RSU 作为 SDN 控制器,通过在其覆盖范围内收集车辆的速度和位置等移动信息,优化 AZ 大小,可以极大地改善 FC 性能。

4) 基于 SDN 的车辆云资源管理

车联网的应用需要更短的等待时间来实现低时延和高可靠的响应,因此学者们提出了基于 SDN 的车辆云服务器来解决上述实时要求问题。除网络管理外,SDN 控制器还提供对车辆云资源(如计算资源、存储资源)的管理,并对每个终端的 OBU 进行管理。Azizian 等^[29]提出了一个基于 SDN 和云计算的车辆嵌入式软件更新的架构。SDN 控制器位于数据中心或边缘设备中,并与 RSU、基站子系统和其他数据中心,形成一个移动车辆云。因此,控制平面的决策不是由一个集中的元素决定的,而是由云中的元素合作做出决定的。在上述情况下,车辆可以基于 SDN 控制器的指令彼此协作,以获得完整的更新内容。这种基于 SDN 的软件更新分发方式,通过减少所使用的蜂窝带宽和相应的使用费用(如专用短距离通信带宽)以及软件更新传递时延来提高网络性能。Hussein 等^[30]通过在架构中集成 5G 的雾计算技术来更快地处理、高效地切换和

跟踪管理,可以执行不同级别的实时用户定义的安全性,同时保持系统的低开销和最小配置。

5) 基于 SDN 的车联网安全

车载通信的安全性对 SDN 的使用也提出了更高的要求,SDN 对车辆应用的安全和隐私问题也是至关重要的^[30-32]。由于 SDN 控制器具有智能的、集中式的网络视图,因此它可以通过对数据平面的流量分析来识别潜在的攻击,从而执行异常检测,并相应地隔离恶意或受感染的节点。Meneses 等^[10]建议 SDN 控制器可以协调基于信任的授权方案,并且根据声誉选择中间节点以充当中继。Daniel 等^[17]也采用了类似的信任机制,用于传播安全紧急数据。Hussein 等^[30]提出了一种支持 SDN 的 VANET/5G 安全体系结构,该体系结构基于 SDN 控制器,具备全局视图和管理能力,实现了针对不同类型攻击(如针对控制器或车辆),开展分布式拒绝服务 (DDoS, distributed denial of service) 攻击等的预测、溯源跟踪等安全技术,并减轻它们带来的影响。

综上所述,现有的 SD-V2X 研究覆盖了干扰管理、路由管理、资源分配和安全等问题。但是,车辆不同于其他移动设备,它只能在已有的公路上行驶,其运动状态具有一定的限制性,而已有的研究对车辆运行限制性考虑尚不多。针对车辆移动的快速性和限制性,结合地图覆盖层,控制器需要增强对单个车辆轨迹的预测和感知能力,提前规划 V2V 路径,使用车辆簇进行协同 V2X 通信,提高通信的可靠性和吞吐量。

未来,V2X 要获得广泛应用,需要构建良好的产业生态环境,解决跨运营商和汽车厂商等各方协调问题。随着 5G 网络中 SDN 和 V2X 相关技术逐步深化和成熟,如何基于 SD-V2X 所具有的开放架构解决跨产业、跨厂商的协调问题,针对可行商业模式进行更深入的应用性研究,将成为本领域的研究热点。

4 移动网络中与 SD-D2D/V2X 相关的一些通信架构

4.1 蜂窝网络中 SD-D2D 架构

在蜂窝网络 D2D 通信中引入软件定义的概念,利用 SDN 控制器从多个源端收集的信息,来动态调整转发决策,数据平面由多个基站构成,控制平面负责对网络设备进行集中控制和网络资源的调配,查询基站的资源使用、负载等网络状态信息。

5G 技术通过采用网络协助系统 (NAS, network assisted system), 基站可以同时管理移动节点的蜂窝连接和 D2D 连接^[33], 同时通过在基站加载 SDN 控制器的应用模块, 基站可以获得节点移动信息、资源信息等全局信息^[34-35]。基站 i 可直接获得其覆盖范围内终端节点的移动信息和资源信息, 并提供给 SDN 控制器; 邻居基站 j 再通过 SDN 控制器获取基站覆盖终端节点的这些信息。

面向 SD-D2D 通信的分层体系架构如图 3 所示。在 SD-D2D 架构中, 控制平面的性能对整个网络有着很大的影响。目前, 关于 SDN 控制器在 5G 移动通信网络中的放置位置, 学术界分为 3 种观点: 集中式、分布式和层次型。

由于单一的控制面无法适应巨大网络压力的挑战, 因此可以考虑对控制器进行分层的部署, 以减少 D2D 通信管理产生的大量信令交互, 满足应用低时延的需求, 同时面向移动小片云、雾计算的扩展需求, 提高蜂窝网络的可扩展性和伸缩性。在文献[9,13-14]提出的混合 D2D 通信框架基础上, 本文采用一种分层的控制方式, 即面向核心网的全局控制、面向接入网的局部控制, 在一个自治域内, 所有基站集中控制于全局 D2D 控制器, 全局控制器维持着整个自治域的控制平面; 在每个基站侧加载 D2D 本地控制器模块, 由本地 D2D 控制器负责本区域内部节点间 D2D 的路由转发。

这种分层架构的好处是: 能充分发挥集中控制的可扩展性和伸缩性, 使底层的转发设备可以被统一控制和管理, 从而使其透明化, 实现设备的虚拟化, 推动网络能力开放, 提高移动通信的网络灵活性与高效性; 同时, 又考虑了节点的移动性, 减

少核心网内 D2D 通信管理的信令交互。移动通信的数据分组首先接入距离用户最近的基站, 随后由 D2D 本地控制器决策是否是本基站内部的节点通信或能够构建本地 D2D 通信, 如果是, 则构建本地 D2D 通信; 如果不是, 则向 D2D 全局控制器决定数据分组的转发路径, 优化路径进行存储转发, 最终到达目的基站, 发送给目标用户。

全局控制器掌握了其自治域内所有基站提供的网络拓扑和负载情况, 形成网络状态信息库来管理整个网络, 状态信息库可处理的信息包括 D2D 设备标识、D2D 服务标识、IP 地址分配信息、用户识别号、用户安全信息、用户定位信息等。同时, 全局控制器还负责协调移动性管理实体 (MME, mobility management entity) 对每个 D2D 对进行无线资源管理、位置管理、连接管理、路由管理等。

本地控制器处于中间执行层, 对上层控制平面而言, 主要功能是接收控制指令和汇报本地网络信息, 具体功能为向全局控制器发送基站中收集到的状态信息, 接收全局控制器的控制指令, 通过 OpenFlow 协议将指令下发至底层的数据平面去执行; 对下层数据平面而言, 主要功能是协助基站对本地 D2D 通信终端进行本地 D2D 通信管理, 如本地位置信息管理、确定本地节点间距离、流表管理等^[36]。

终端控制器在移动终端侧作为一个后台服务, 负责为每个应用程序选择一个合适的接口, 并且负责监视状态并控制 Open vSwitch 和无线资源映射器。

4.2 采用 SDN/D2D 技术的机会网络和自组网

在 5G 通信中, D2D 技术的引入, 使蜂窝通信终端建立无线机会网络和无线自组网网络成为可

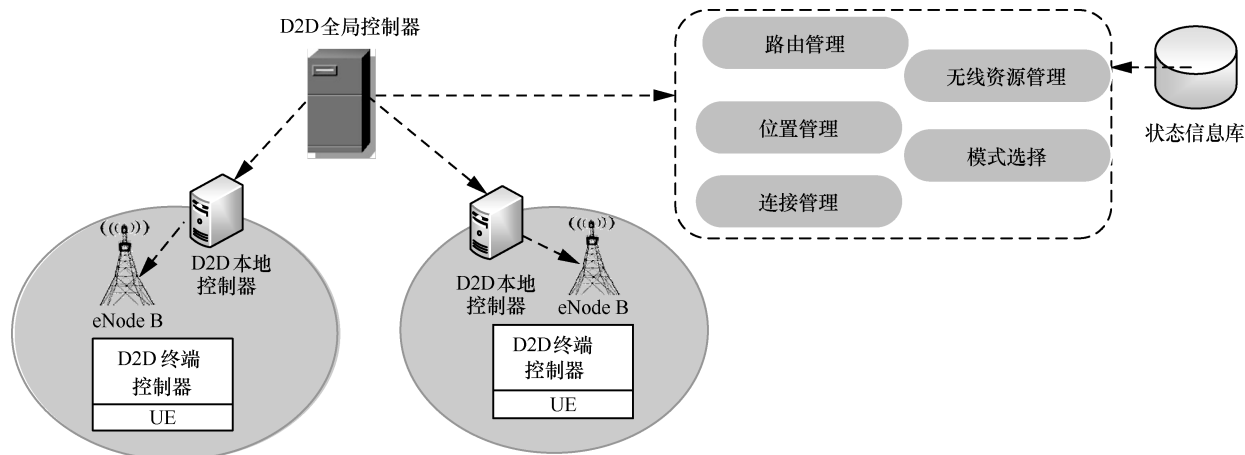


图3 面向 SD-D2D 通信的分层体系架构

能,无线通信的应用场景得到进一步的扩展,例如,蜂窝网络可以通过 D2D 技术组建自组网络(Ad-Hoc network),如移动自组网络(MANET, mobile Ad-Hoc network)或 VANET,来卸载本地流量、扩展通信区域、构建应急容灾通信网络等。同时,借助 SDN 技术也可使蜂窝网络的资源利用率更高、性能更稳定。

1) 采用 SDN/D2D 技术的自组网络

传统无线通信网络对通信基础设施的要求较高,核心网设施或接入网设备的损坏都可能导致通信系统的瘫痪。当无线通信基础设施损坏,或者在无线网络的覆盖盲区,终端可借助 D2D 实现端到端通信甚至接入蜂窝网络。因此,Kitada 等^[37]使用真实的终端设备,设计并实现了一个由 DTN 和移动自组网相结合的、基于 SDN 的容灾网络——永存网络(NDN, never die network)。当发生地震等自然灾害时,在灾害地区,NDN 作为基础通信网络设施的一部分,承担通信作用。在 NDN 中,每一个 SDN 交换机负责监测网络性能,一旦网络性能下降,NDN 控制器将切换到其他网络。通过多跳的终端设备作为中继,数据从源端传输到目的端,或接入 Internet 的网关。通过实验数据表明,该网络独立于基础通信网络,能满足灾难发生时备份网络的通信需求。同时,通过减少不必要的通信连接,能够大量节约终端电池的能量。

Wang 等^[38]提出了一个特定网络应用下的 SDN/D2D 自组网络形式——以信息为中心的基于 D2D 通信的网络虚拟化方案。该方案通过 SDN 提供系统的全局视图控制器,动态虚拟资源分配和内容缓存。在所提出的架构中,物理资源可以被抽象化并同时被多个移动虚拟网络运营商(MVNOS, mobile virtual network operator)所共享。例如,根据以信息为中心的网络虚拟化要求,可以在数据平面形成 3 个虚拟网络,分别进行常规无线通信传输、以信息为中心的无线通信传输和以信息为中心的 D2D 通信传输,相应地,在控制平面构建 3 个虚拟 SDN 控制器,负责管理对应的虚拟网络。同时,通过在以信息为中心的无线网络中集成 D2D 通信,内容缓存功能不仅在无线运维设备中启用,而且移动设备也具备内容缓存能力。该虚拟资源分配问题可作为一个大规模组合优化问题,通过离散的随机逼近方法进行求解,仿真结果表明,MVNOS 不仅能从物理基础设施共享中受益,也可从不同网络元

素的缓存功能中获得收益。

2) 采用 SDN/D2D 技术的机会网络

Yu 等^[39]提出并在实际设备中实现了一个具有 SDN 能力的多跳 MANET,SDN 控制器采用开放网络操作系统(ONOS, open network operating system),SDN 交换机采用 Open vSwitch 协议。MANET 具有 D2D 数据传输的优点和集中网络管理的灵活性,仿真结果显示,与分布式自组网络相比,该方案提出的自组网络性能更优,这证明了该种网络未来部署的可行性。除此以外,文中还提供了包含所有开发组件的存储库,使用该存储库可以设计开发出具有 SDN 能力的测试平台。

Casoni 等^[40]使用 SDN 和信息物理系统(CPS, cyber-physical system),提出并仿真构建了一种灵活的、可配置的、基于机会网络的移动协作型社区。其思路是使用本地高带宽的通信连接,如 IEEE 802.11(Wi-Fi)等技术,在 SDN 控制器的动态调度下,实现多终端的带宽聚合,从而有效地提升了原来处于低带宽环境下用户上传文件的速度。

Labraoui 等^[41]提出了一种基于 SDN 控制的机会式网络流量卸载机制,该机制通过在所有终端上运行一种基于 SDN 的应用程序编程接口(API, application programming interface),使在 SDN 控制器的部署下,终端间、终端和无线接入点(AP, access point)间通过 Wi-Fi 接口,自主构建机会式的无线网状网络,在移动接入网层面,实现将移动网络接入网的流量有效卸载到无线局域网中,利用额外的无线局域网带宽,从而提高蜂窝小区的带宽。

4.3 基于 SD-V2X 技术的车联网架构

现有的车联网架构在网络管理和集成上存在一些功能上的缺陷,例如,在大规模、高度密集和动态变化的车联网网络拓扑上部署服务非常困难,缺乏可伸缩性;车辆设备的异构性及不可编程性、对供应商的依赖性使车联网体系结构僵硬且难以管理,缺乏智能性;由于部署环境的多样性以及通信技术的异构性,很难根据实际情况和网络参数的快速变化来选择合适的技术,缺乏灵活性和自适应性。这些缺陷限制了系统的功能,常常导致网络资源的利用不足。

因此,采用基于 SD-V2X 技术的车联网架构,能够提高当前车联网体系结构的灵活性、可编程性和可伸缩性。SD-V2X 与第 4.2 节和第 4.3 节介绍的基于 SD-D2D 的蜂窝和机会/自组网络架构相比,共

同点是都与 5G 蜂窝网络和 SDN 技术集成, 通过近距离通信技术增加网络容量; 不同之处在于, 由于车载通信具有机动环境下的移动性, 实时性要求更高, 因此对车载通信系统提出了更高的要求, 要求蜂窝网络为车辆提供高容量、低时延通信。因此, 首先, 鉴于车辆的高速移动性, 每个车辆都配备有蜂窝网络接口和 IEEE 802.11p 网络接口以增加通信可靠性, 根据控制器的调度, 优化选择相应的接口和通信模式。其次, 在车联网中, RSU 和 OBU 都装载了无线 OpenFlow 协议, 同其他 OpenFlow 交换机一样, 具备 SDN 功能, 可被编程控制。各种异构接入技术使车辆可以通过多种方式接入基础网络中, 如通过基站、路侧单元、无线局域网等 V2I 方式接入, 也可以通过 V2V 多跳方式接入。

原有的车联网架构中, SDN 控制器一般位于数据中心和基站侧, 为了提高车联网规模化、灵活性和可靠性, 原有的控制器需要重新部署, 控制功能下移到路侧端, 实现本地化控制, 分层功能更清晰, 管理时延更少。从控制器的部署位置和层面看, 现有 SD-V2X 技术的车联网架构主要分为集中式^[22,38,42-44]和混合式^[19-21,45-47]。

集中式架构只使用一个全局控制器, 由于在网络中控制器需要和网络元素间交换大量的状态信息, 无法满足未来车辆应用的低时延要求; 而混合式架构采用层次型管理架构, 分层交换控制信息, 为车辆应用提供低时延的保证。混合式架构平衡了网络管理时延和蜂窝网络的成本, 鼓励车辆通过蜂窝网络发送 SDN 控制请求, 采用 V2V 网络进行数据传输。基于 SD-V2X 技术的混合式架构如图 4 所示, 车辆通过 eNode B 或 RSU, 向中心控制器发送它们的上下文信息, 包括使用 GPS 获取的地理位置、车辆速度、方向和被感知的相邻车辆 ID, 全局 SDN 控制器根据中心控制器构建全局状态信息。控制平面将控制器放置于基站和路侧单元间, 控制平面由全局 SDN 控制器、基站和 RSU 组成, 全局 SDN 控制器配合基站和 RSU 共同完成控制任务, 全局 SDN 控制器根据全局状态信息, 确定一些通用的抽象策略规则, 基站和 RSU 依据本地状态信息, 执行这些规则。同时, SDN 控制器的控制范围延伸到 OBU, OBU 被控制器触发, 在数据层面上产生相应的转发动作, 如采用车辆间 V2V 技术在多个车辆间通过多跳分发实时交通信息, 提供及时的路况

预警信息共享功能。

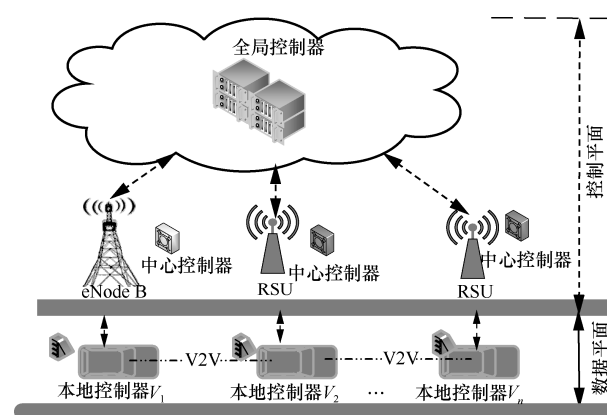


图 4 基于 SD-V2X 技术的混合式架构

通过上述各种 SD-D2D/V2X 通信架构的介绍和分析可知, 在 D2D 和 V2X 中引入集中控制的 SDN 控制器, 基于全局信息进行主导决策或协助决策, 可以灵活地解决 D2D 用户之间以及蜂窝用户与 D2D 用户之间的多层干扰、资源分配冲突、路由决策局限性和终端移动性管理等问题, 提高无线网络资源的利用率和网络拓扑的灵活性, 减少终端能耗的开销。但在解决 D2D/V2X 问题的同时, 也引入了新的缺点, 例如, 控制信道上的无线信令开销会增大; 当网络拓扑变动时, 会引起域间和域内的路由切换, 导致流表更新频繁, 相应的信令开销、节点处理开销和通信时延也会进一步加大, 这在车辆高速运动时对 V2X 的性能影响更大; 另外, 集中控制也对终端提出了新的要求, 要求终端芯片集成 Open vSwitch 流表处理能力和无线资源映射管理器等, 也相应地提高了芯片研发和制作成本。

5 关键技术分析

本节的关键技术分析中, 主要以 SD-D2D 为例进行说明。SD-V2X 的关键技术与 SD-D2D 有很多相似之处, 不作为重点, 只对 SD-V2X 的特色之处加以说明。

对 D2D 与 SDN 融合的相关探讨中, 包含以下 4 个关键技术: 1) 基于 SDN 分层控制的 D2D 体系架构; 2) SD-D2D 位置管理; 3) SD-D2D 发现管理; 4) SD-D2D 路由管理。因为关键技术 1) 已在第 4.1 节详细介绍, 所以此处重点介绍后 3 个关键技术。

5.1 SD-D2D 位置管理

D2D 通信的重要特性是利用节点间地理上的邻近性, 但是节点间的距离长短决定了发送功率的

大小,同时无线信号存在的路径损耗使节点间的距离影响接收信号的强弱,因此节点间的距离是 D2D 通信能否构建的关键。

引入软件定义的 D2D 通信使节点位置全局管理变得可行: D2D 控制器通过专用的信令通道,可以获得节点位置信息、链路信息等全局状态信息,这些信息也为 D2D 通信的发现、建立和路由等一系列技术提供了决策依据,控制器基于全局状态信息进行路由、流量卸载、通信模式选择和切换等全局调度。参考文献[34-36],本文提出了一种 D2D 通信的位置管理方案,具体介绍如下。

在每个控制周期,首先通过信令通道节点和基站进行交互,汇报当前节点位置信息等状态信息,由此 D2D 本地控制器获得每个节点的实时信息,接着由本地控制器向全局控制器汇总所控制的基站内节点的状态信息,如节点 i 的位置可表示为 (x_1, y_1) , 节点 j 的位置可表示为 (x_2, y_2) , 在控制器形成网络中,所有节点的全局位置信息可表示为 $I=\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ 。

根据节点位置信息,使用欧几里德 (Euclid) 距离 D_{ij} 来测量节点 i 和节点 j 间的直接距离,即

$$D_{ij} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

因此,在全局控制器中,使用一个邻接矩阵 M 来记录和管理所有节点间的距离信息,形成网络节点的全局位置信息,即

$$M_{n \times n} = \begin{bmatrix} 0 & D_{12} & \dots & D_{1n} \\ D_{21} & 0 & \dots & D_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{n1} & D_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在邻接矩阵 M 上运行 Dijkstra 最短距离算法,可以计算出任意两点间 D2D 通信的最短距离 $D'_{ij} = \text{Dijkstra}(M, i, j)$, 接着通过控制信道进行路径选择和通信资源分配的全局调度。

根据节点的位置信息,控制器可以进行节点间的位置测量、优化传输路径。依据传输经过的中间节点的数量,可以分为 2 种距离测量方式:单跳 D2D 通信的节点间位置测量和多跳 D2D 通信的节点间位置测量。

1) 单跳 D2D 通信的节点间位置测量

单跳 D2D 通信的节点间位置测量如图 5 所示。假设在此场景中,节点 i 和节点 j 属于同一个 eNode B, 本地控制器接收到节点 i 和节点 j 的位置信息后,

根据式(1)获得两者距离 D_{ij} , 判断该距离能否满足构建 D2D 通信的需要,如能满足,则发送 D2D 发现通知信息给双方。

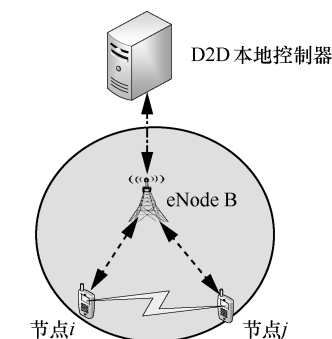


图 5 单跳 D2D 通信的节点间位置测量

2) 多跳 D2D 通信的节点间位置测量

多跳 D2D 通信的节点间位置测量如图 6 所示。假设在此场景中,节点 i 和节点 j 属于不同 eNode B, 如果 D_{ij} 值超过了 D2D 通信的距离范围, 虽然无法建立直接的 D2D 连接, 但是全局控制器判定能够构建多跳的 D2D 通信。因此, 基于最短路径的传输路径规划, 全局控制器进行规划多跳的 D2D 通信连接。

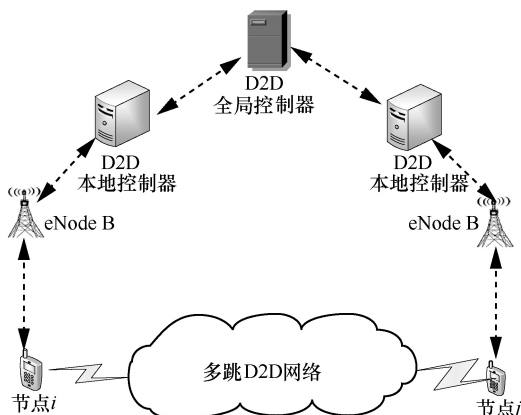


图 6 多跳 D2D 通信的节点间位置测量

5.2 SD-D2D 发现管理

网络授权 (NA, network authorized) 的 D2D 通信需要蜂窝网络的协助控制来授权连接。由于基站中并没有包含 D2D 通信功能, 因此需要建立一种 D2D 邻居发现的机制。根据 D2D 发现的层面, 可以将 D2D 邻居发现模式分为 2 种: 直接邻居发现和全局邻居发现。

5.2.1 直接邻居发现

不少研究者提出了基于同一个基站下的 D2D 发现机制^[48-50], 当 2 个通信节点处在同一个局部控

制器管理的情况下，可以使用演进的 UMTS 陆地无线接入网（E-UTRAN, evolved UMTS terrestrial radio access network）中的用户终端-用户终端（UE-UE）的专用信令，进行节点间的直接邻居发现，参照 3GPP 定义的 D2D 直接邻居发现，提出以下 2 种直接 D2D 邻居发现模型。

模型 1 “宣告性 UE”（如 UE₁）向邻近 UE 周期性地以广播的方式发送宣告请求，包含节点标识、节点状态等信息，允许自身被邻居 UE 所发现；“监视性 UE”（如 UE₂）收到广播后，匹配自己的目标节点列表，只有当 UE₁ 在 UE₂ 的目标列表中，UE₂ 才响应宣告请求，UE₁ 收到确认后向 D2D 局部控制器申请无线资源，建立 D2D 通信。

模型 2 “发现者 UE”（如 UE₃）向邻近 UE 周期性地以广播的方式发送宣告，包含节点标识、节点状态、目标节点列表等信息，只有符合目标节点列表中的节点（“被发现者 UE”，如 UE₄）才会对该发现请求进行响应，UE₃ 收到确认后，后续流程同模型 1。

虽然这 2 种直接邻居发现模型 UE 间信令的设计不同，但能够有效、及时地发现 D2D 设备。然而，这 2 种机制对于节点而言，周期性地发出轮询信号，节点能量损耗较大，将会缩短节点待机时间，同时，受到传输功率的限制，UE 层面的直接邻居发现范围较小。

5.2.2 全局邻居发现

为节约节点 D2D 发现的能量损耗，可以由网络层面集中控制，实现和优化邻居发现，不仅能节约节点能耗，还能扩大发现范围，发现更多的邻近节点。

当 2 个通信节点归属不同的基站，并由不同的局部控制器管理时，由上层的全局控制器统一管理全局邻居发现，由控制器对 D2D 通信链路质量（如信噪比、传输距离）进行判断，当满足通信条件后，通过信令通道，通知双方进行 D2D 邻近节点发现，同时借助节点位置信息和直连技术（如 WLAN Direct 或 LTE Direct 技术），构建 D2D 通信，建立直接连接。

参考文献[48-50]可得到 D2D 全局邻居发现信令流程，如图 7 所示，具体介绍如下。

1) UE₁ 和 UE₂ 分别通过所归属的局部控制器 1 和局部控制器 2，向全局控制器注册各自的节点信息，包括用户标识、节点状态等信息。

2) UE₁ 向局部控制器 1 发出 UE₂ 的邻近请求，即：当 UE₂ 在邻近范围内时，局部控制器 1 会向本节点发送关于 UE₂ 的近邻提醒；由于 UE₂ 非当前控制器管理，因此局部控制器 1 无法进行直接邻居发现，由其向全局控制器发出 UE₂ 的邻近请求；全局控制器接收到请求后，向 UE₂ 的归属控制器发出邻近请求准备。

3) UE₁ 和 UE₂ 周期性地通过局部控制器，将当前位置更新信息汇报给全局控制器。

4) 全局控制器根据 UE₁ 和 UE₂ 的位置信息，计算 UE₁ 和 UE₂ 的相对距离，若该距离满足 D2D 通信允许的门限值，则全局控制器发送邻近通知给双方。

5) 全局控制器向 D2D 局部控制器 1 发出 UE₂ 的邻近通知响应，并向 D2D 局部控制器 2 发出 UE₁ 的邻近通知。

6) UE₁ 发现 UE₂，向全局控制器申请无线资源，

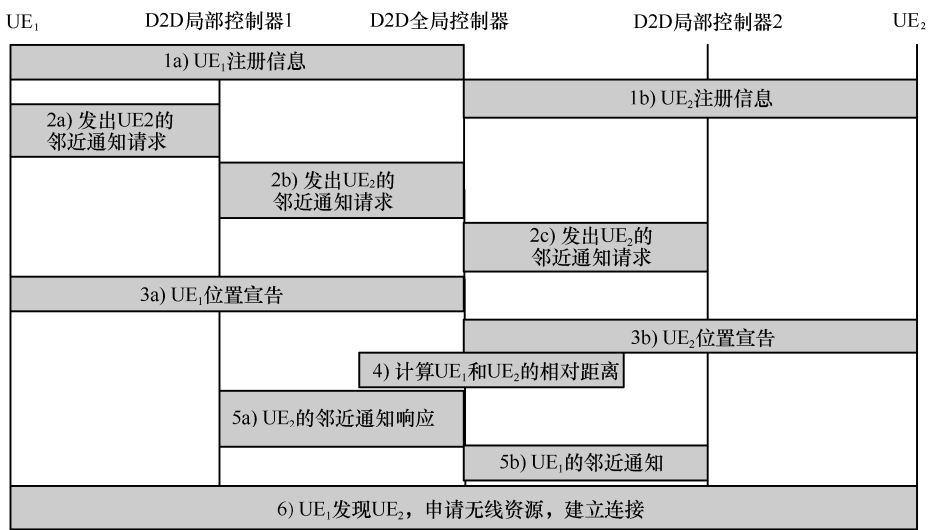


图 7 D2D 全局邻居发现的信令流程

使用 WLAN direct 或 LTE Direct 技术, 建立 D2D 连接。

5.3 SD-D2D 路由管理

5.3.1 路由管理设计

SD-D2D 继承了 SDN 的控制与底层传输网络相分离的理念, 通过流表实现了 D2D 网络的虚拟化, 提供了一种独立于传输链路的覆盖网络。利用 SD-D2D 基于流表匹配的流量转发与控制模式, 将网络的控制功能集中于控制器, 中心控制器能够对路由、流量、网络行为、终端资源等实现灵活的控制和监测, 通过控制器制定相应的执行策略和转发规则, 进行快速的部署和分发, 向终端节点屏蔽了路由决策的细节, 从而对全网视图、虚拟化、动态路由等功能提供了支持。同时, 控制器根据实时的全局网络节点信息库, 对 D2D 通信路径的规划进行动态的、连续的优化, 通过更新或删除流表项, 对转发路径进行修改或删除, 从而实现全局路径优化。

根据通信双方归属的基站划分, SD-D2D 路由管理可以分为 2 类场景: 同一基站内部的路由管理和不同基站之间的路由管理, 如图 8 所示。以同一基站下单跳 D2D 通信为例, 控制流在传输过程中, 在 UE_1 和本地控制器之间, 控制流上始终维持着一条无线网络信令, 在呼叫建立之初建立, 在通话结束后释放, 并在期间一直维持, 用来进行无线资源分配、链路状态汇报、功率控制、连接管理、路由管理。当链路信号与干扰加噪声比 (SINR, signal to interference plus noise ratio) 不满足要求时, 就会重新计算转发路径, 更新流表条目; 当通信结束时, 负责释放连接, 回收无线资源块。数据流代表节点间数据传输的路径, 通过控制流获得转发规则, 在

已规划的路径上, 使用 D2D 通信发送数据。

1) 同一基站内部的路由管理

当 2 个节点属于同一个基站时, 不论节点间通过单跳或多跳通信, 都由局部控制器用本地流表进行路由管理。

2) 不同基站之间的路由管理

当 2 个节点属于不同基站时, 节点间的通信, 需要先由各自局部控制器进行协商后, 再使用各自的本地流表进行路由管理。

5.3.2 流表的管理

1) 流表的建立

在每个本地控制器上部署相应的流表, 当有新流量到达时, 为流量建立端到端路由, 并根据流表, 在数据层面上控制数据流的传输。数据分组转发的流表结构如图 9 所示。流表字段包含以下字段: 信源 IP 地址、信宿 IP 地址、通信模式、转发路径。控制器根据路由决策, 选择相应的通信模式, 如字段值为 “D2D” 表示从信源与信宿通过 D2D 连接传递数据, 字段值为 “B2D” 表示从信源与信宿通过蜂窝网络连接传递数据。

初始状态下, 本地流表中的转发条目为空, 随着节点间的连接请求, 控制器会逐步建立并不断完善流表中的条目。

对于一个新到达的连接请求 (如 UE_1 到 UE_2), 首先, UE_1 所属的本地控制器 1 向状态信息库请求 UE_1 和 UE_2 各自的位置及归属基站 ID。然后, 根据 UE_2 归属的基站 ID 进行判断: 当 UE_1 和 UE_2 属于同一个基站时, 直接由本地控制器进行通信模式选择和路径规划, 即通过计算节点间的最短距离, 判断能否构建 D2D 通信, 进行通信模式决策, 规划单跳/多跳 D2D 通信路径, 将转发规则写入流表条

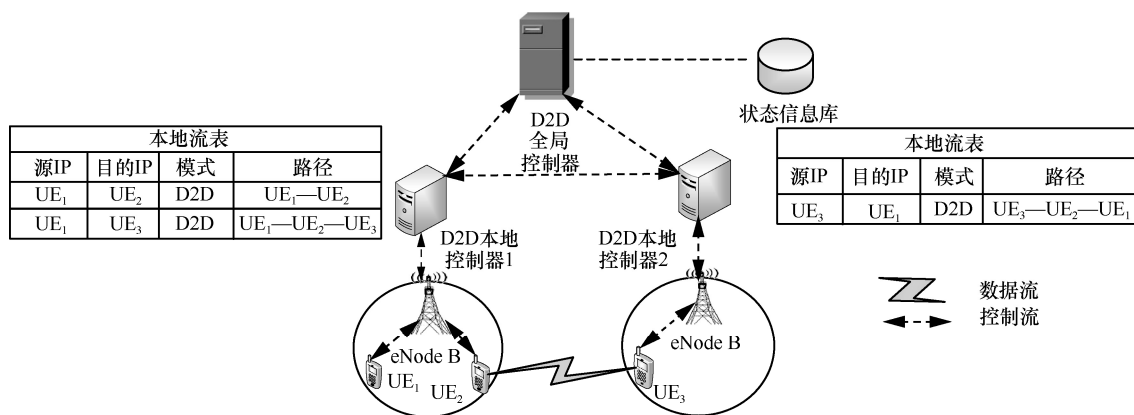


图8 基站内部/基站之间的路由管理

目中; 当 UE_1 和 UE_2 属于不同基站时, 由本地控制器 1 和本地控制器 2 进行协商, 计算节点间的最短距离, 进行通信模式决策, 规划基站间的单跳/多跳 D2D 通信路径, 并将转发规则写入流表条目中。最后, 本地控制器发送转发规则给请求节点 UE_1 。

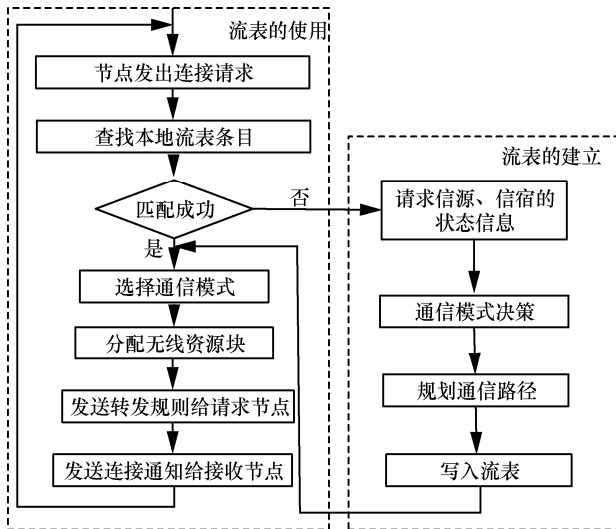


图9 流表的管理

2) 流表的更新

当节点位置发生改变时, 会触发流表更新操作, 由全局控制器获取节点最新的位置, 重新计算节点间的最短距离, 负责通知本地控制器更新相应的流表条目, 同时将该条目的定时器重新置零。

为了解决失效流表问题, 本地控制器为每条流表设置一个定时器, 如果本地控制器发现一条流表在 T 个时隙内都没有收到与它相关的更新信息, 就将该条目设置为无效, 等待一段时间后将该条目删除。

3) 流表的使用

当 UE_1 对 UE_2 的连接请求发送给 D2D 本地控制器时, D2D 本地控制器首先在本地图表中查找源 IP 是 UE_1 和目的 IP 是 UE_2 的流表条目, 如果不能查找到条目, 则执行流表建立的过程; 如果匹配成功, 则根据流表条目中的通信模式, 选择相应的通信模式 (D2D 模式和蜂窝模式), 本地控制器分别为 UE_1 和 UE_2 分配 D2D 无线资源块, 并且将流表中的转发规则发送给 UE_1 。同时通知 UE_2 , 为即将到来的 D2D 连接做好准备。

UE_1 根据转发路径, 发出对下一跳节点 UE_2 的轮询信号, UE_2 接收到轮询信号后, 测量与 UE_1 间

的通信链路状态, 发送信道状态信息给 D2D 本地控制器, 本地控制器进行链路 SINR 测量, 当 SINR 满足一定的门限值后, 通知双方建立 D2D 连接, 数据分组从这条 D2D 链路上进行传输。

5.4 SD-V2X 关键技术

SD-D2D 的通信设备通常为静止设备或低速移动设备, 而 SD-V2X 作为面向车、路、网协同的通信综合解决方案, 能够在高速移动环境中提供低时延、高可靠、高速率、安全的通信能力, 满足车联网多种应用的需求, 并且基于 TD-LTE 通信技术, 能够最大限度地利用 TD-LTE 已部署网络及终端芯片平台等资源, 节省网络投资, 降低芯片成本。

在软件定义下的 V2X 关键技术中, 主要从路径管理方面来说明, 包括 V2V 连接建立、路径规划和路径恢复, 其中, V2V 连接建立过程包含在路径规划和路径恢复中, 因此不再单独叙述。

5.4.1 V2V 路径规划

使用软件定义的 V2V 技术, 可以将基于蜂窝的车辆通信卸载到基于 IEEE 802.11p 或 D2D 的 V2V 通信中。基于 V2V VANET 的路径发现可由第三方控制器进行, 控制器保持对车辆状态的跟踪和计算, 如果车辆之间存在 V2V 路径, 将通知双方车辆, 减少车辆 OBU 的计算开销, 车辆在保持蜂窝连接的同时, 实现快速切换到 V2V 路径, 实现蜂窝网络的流量卸载。

V2V 路径规划如图 10 所示, 具体步骤如下。

1) 初始化状态下, 网络中的所有车辆通过蜂窝网络, 将车辆实时的环境信息, 如地理位置、车辆速度、方向和相邻车辆 ID, 通过各自的中心控制器, 发送给全局控制器。

2) 控制器收到车辆信息, 保存到全局状态信息库中, 持续检查车辆情况, 为可能存在的 V2V 连接提供决策依据。

3) 在 t_0 时刻, V_1 向基站发出向 V_n 的连接请求。

4) 全局控制器根据车辆的行车轨迹, 在 V_1 和 V_n 间探寻可行的多跳 V2V 路径。以 V_1 和 V_2 间的路径为例, 考虑到车辆的高速移动性, 可采用车辆间的连接时长作为 V2V 路径稳定性的度量值^[24], 根据 OBU 的通信覆盖范围, 通过计算车辆行驶方向、车辆间的相对位置和相对速度, 预测邻近车辆间的连接时长, 将连接时长最大的路径作为最佳的多跳 V2V 路径。

5) 如果存在可行路径 $P=\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, 则 SDN 控制器通知路径 P 上所有的中继节点, 将转发规则

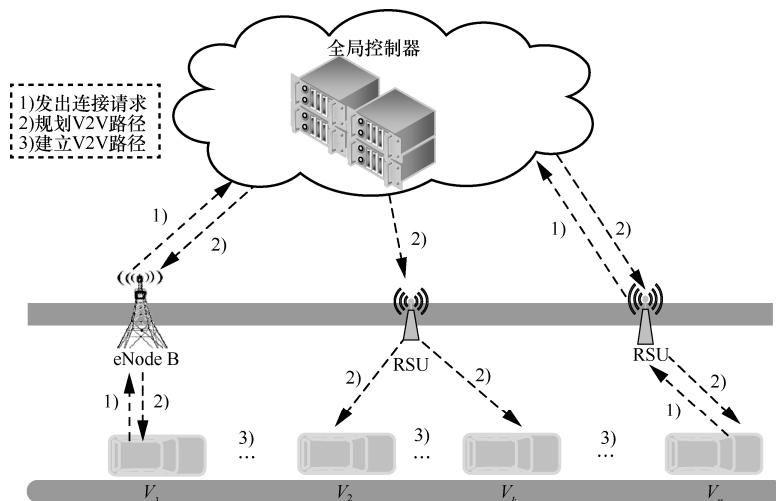


图10 V2V 路径规划

插入所有节点的流表中。

6) 如果不存在 V2V 路径, 则安排 V_1 通过蜂窝网络向 V_n 建立连接。

5.4.2 V2V 路径恢复

在车辆高速移动环境下, 由于车辆行驶的不确定性, 常常会打破其原有的路线规划, 从而对整个 V2V 多跳路径产生影响, 为了防止单点路径失效, 需要 SDN 控制器提供一种动态的快速路径修复机制应对突发路径变更, 及时做出路径重新规划和路径恢复。V2V 路径恢复示例如图 11 所示。在道路中, 当出现一条分叉路, 车辆会突然改变方向, 或者车辆突然改变其速度, 都会打破原有的 V2V 路径, 控制器启动 V2V 路径修复机制, 指导车辆的 OBU 进行异常处理, 开展路径恢复操作。

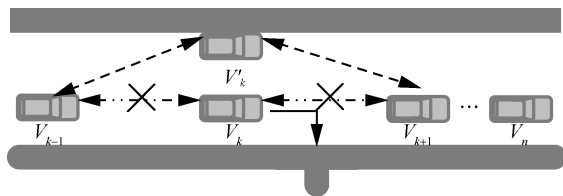


图11 V2V 路径恢复示例

假设原 V2V 路径为 $P=\{V_1, \dots, V_{k-1}, V_k, V_{k+1}, \dots, V_n\}$, 当路径集中一节点 V_k 偏离原行驶方向时, 将向控制器触发“行驶方向变更”通知。控制器收到变更通知后, 立即计算和寻找一条备份路径 P' , 在 V_{k-1} 和 V_{k+1} 间进行路径修复。假设车辆 V_{k-1} 是原路径 P 中 V_k 的上一跳节点, 车辆 V_{k+1} 是原路径 P 中的下一跳节点, 则控制器尝试在两者之间, 找到备份节点 $V_{k'}$, 使其与两者相邻并且都可以通信。

假设控制器能找到该备份路径, 则使用新的备份路径 $P'=\{V_1, \dots, V_{k-1}, V_{k'}, V_{k+1}, \dots, V_n\}$ 代替原路径 $P=\{V_1, \dots, V_{k-1}, V_k, V_{k+1}, \dots, V_n\}$, 并在相应节点执行相应的流表操作: 在 V_{k-1} 中将 V_1 到 V_n 的流表条目中的下一跳节点更新为 $V_{k'}$; 在 $V_{k'}$ 中增加一条 V_1 到 V_n 的流表条目, V_{k+1} 为下一跳节点; 在 V_k 中删除已有的 V_1 到 V_n 的流表条目, 最后发送“路径更新宣告”给所有相关节点。假设未找到该备份路径, 则删除路径集中相关的流表条目, 发送“路径更新宣告”给所有相关节点, 相关节点通过蜂窝网络发送剩余的 V_1 到 V_n 数据。值得说明的是, 替代节点 $V_{k'}$ 可能是单个节点或多个节点形成的多跳 V2V 路径, 因此修复后的路径时延可能变长, 但从单点修复的功能来看, 它对于原有路径的影响是最小的。

6 结束语

SDN 已经逐渐将其覆盖范围从单域、有线管理网络 (例如内部网、数据中心) 扩展到无线动态环境 (如蜂窝网络、VANET)。D2D 和 V2X 在技术上有很大的相关性, 在未来网络中它们将在 SDN 的支持下协同发展, 因此, 本文对基于 SDN 的 D2D 和 V2X 通信进行了研究和综述, 并对关键技术进行了分析。

综合现有的研究工作可见, 蜂窝网络 SD-D2D 架构已经接近成熟, 车联网 SD-V2X 框架也已初步确定, 通过发挥 SDN 技术集中决策的优势, 确实能够有效改善 D2D/V2X 通信中存在的用户间和蜂窝用户间的干扰管理、移动管理和路由管理等问

题, 基于 SD-D2D 和 SD-V2X 架构还会有更多的模型和概念涌现出来。

目前, 在 D2D 和 V2X 发展中, 都存在多方利益不易协调的困难, 使它们规模应用偏少。这也导致现有 SD-D2D/V2X 研究存在与实际应用脱节的现象, 成为它们进一步发展的瓶颈, 而基于 SDN 的架构优势如何突破这一瓶颈, 尚未见到相关研究。因此, 未来需要在实际蜂窝网络中对 SD-D2D/V2X 架构进行部署和应用的研究, 增强软件定义架构的可扩展性, 对 SDN 控制器、CDN 服务器、多播服务器、云计算服务器、安全认证服务器、信任服务器等网络服务器联合部署和工作的协同问题, 需要进一步的实用化研究。此外, 还需要考虑如何在控制器中加载社会网络功能和应用终端的社会属性, 以及如何在控制器中维护社会网络信息等问题。

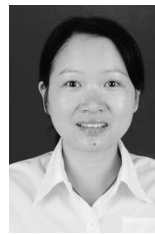
随着 5G 网络的到来和其含有的 SDN 技术的不断深化, 基于 SDN 的 D2D 和 V2X 通信将逐步得到应用。尤其是随着各界对基于 5G 的 V2X 的车辆安全/自动驾驶和智能交通系统的开发, 基于 SDN 的 V2X 的应用性研究将得到迅速加强。

参考文献:

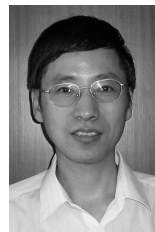
- [1] SUN S H, HU J L, PENG Y, et al. Support for vehicle-to-everything services based on LTE[J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(3): 4-8.
- [2] ANSARI R I, CHRYSOSTOMOU C, HASSAN S A, et al. 5G D2D networks: techniques, challenges, and future prospects[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(4): 3970-3984.
- [3] BAZZI A, MASINI B M, ZANELLA A, et al. Beacons from connected vehicles: IEEE 802.11p vs. LTE-V2V[C]//IEEE International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. 2016: 1-6.
- [4] MUSTAFA H A, IMRAN M A, SHAKIR M Z, et al. Separation framework: an enabler for cooperative and D2D communication for future 5G networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(1): 419-445.
- [5] 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.
- [6] LIYANAGE M, GURTOV A, YLIANTTILA M. Software defined mobile networks - SDMN: beyond LTE network architecture[M]. New Jersey: Wiley Publishing, 2015.
- [7] SUN S, KADOCH M, GONG L, et al. Integrating network function virtualization with SDR and SDN for 4G/5G networks[J]. IEEE Network, 2015, 29(3): 54-59.
- [8] NGO T H, KIM Y. A D2D communication architecture under full control using SDN[J]. Ksii Transactions on Internet & Information Systems, 2016, 10(8): 3435-3454.
- [9] ORISINO A, ARANITI G, WANG L, et al. Enhanced C-RAN architecture supporting SDN and NFV functionalities for D2D communications[C]//19th International Conference on Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications. 2016.
- [10] MENESSES F, GUIMARAES C, MAGALHAES T, et al. Deviceless communications: cloud-based communications for heterogeneous networks[J]. Wireless Personal Communications, 2018(2): 1-22.
- [11] ABOLHASAN M, LIPMAN J, NI W, et al. Software-defined wireless networking: centralized, distributed, or hybrid?[J]. IEEE Network, 2015, 29(4): 32-38.
- [12] OZTOPRAK K. mCSDN: A software defined network based content delivery system with D2D contribution[C]//International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. 2016: 2053-2057.
- [13] USMAN M, GEBREMARIAM A A, GRANELLI F, et al. Software-defined architecture for mobile cloud in device-to-device communication[C]//International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks. 2016: 75-79.
- [14] USMAN M, GEBREMARIAM A A, RAZA U, et al. A software-defined device-to-device communication architecture for public safety applications in 5G networks[J]. IEEE Access, 2015(3): 1649-1654.
- [15] WANG R, YAN J, WU D, et al. Knowledge-centric edge computing based on virtualized D2D communication systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(5): 32-38.
- [16] GUERRERO-IBANEZ J A, ZEADALLY S, CONTRERAS-CASTILLO J. Integration challenges of intelligent transportation systems with connected vehicle, cloud computing, and internet of things technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(6): 122-128.
- [17] DANIEL A, PAUL A, AHMAD A, et al. Cooperative intelligence of vehicles for intelligent transportation systems (ITS)[J]. Wireless Personal Communications, 2016, 87(2): 461-484.
- [18] NGUYEN T V, SHAILESH P, SUDHIR B, KAPIL G, et al. A comparison of cellular vehicle-to-everything and dedicated short range communication[C]//Vehicular Networking Conference. 2017: 101-108.
- [19] QI W J, SONG Q Y, WANG X J, et al. SDN-enabled social-aware clustering in 5G-VANET systems[J]. IEEE Access, 2018(6): 28213-28224.
- [20] DUAN X, WANG X, LIU Y, et al. SDN enabled dual cluster head selection and adaptive clustering in 5G-VANET[C]//Vehicular Technology Conference. 2017: 1-5.
- [21] DUAN X, LIU Y, WANG X. SDN Enabled 5G-VANET: adaptive vehicle clustering and beamformed transmission for aggregated traffic[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(7): 120-127.
- [22] HUANG W, DING L, MENG D, et al. QoE-based resource allocation for heterogeneous multi-radio communication in software-defined vehicle networks[J]. IEEE Access, 2018, 6(99): 3387-3399.
- [23] CORDESCHI N, AMENDOLA D, BACCARELLI E. Reliable adaptive resource management for cognitive cloud vehicular networks[J]. IEEE Transactions Vehicular Technology, 2015, 64(6): 2528-2537.
- [24] DONG B H, WU W G, YANG Z W, et al. Software defined networking based on demand routing protocol in vehicle Ad-Hoc networks[J].

- ZTE Communications, 2017, 15(2): 11-18.
- [25] SOUA R, KALOGEITON E, MANZO G, et al. SDN coordination for CCN and FC content dissemination VANETs[C]//Ad Hoc Networks. 2017: 221-233.
- [26] HUAG C M, CHIANG M S, DAO D T, et al. V2V data offloading for cellular network based on the software defined network (SDN) inside mobile edge computing (MEC) architecture[J]. IEEE Access, 2018(6): 17741-17755.
- [27] BARON B, SPATHIS P, RIVANO H, et al. Software-defined vehicular backhaul[C]//IEEE Wireless Days. 2014: 1-6.
- [28] MAIO A D, SOUA R, PALATTELLA M R, et al. A centralized approach for setting floating content parameters in VANETs[C]//IEEE Consumer Communications & Networking Conference. 2017: 712-715.
- [29] 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.
- [30] HUSSEIN A, ELHAJJ I H, CHEHAB A, et al. SDN VANETs in 5G: an architecture for resilient security services[C]//2017 Fourth International Conference on Software Defined Systems. 2017: 67-74.
- [31] DI M A, PALATTELLA M R, SOUA R, et al. Enabling SDN in VANETs: what is the impact on security?[J]. Sensors, 2016, 16(12): 2077-2101.
- [32] ZHANG D, YU F R, WEI Z, et al. Software-defined vehicular ad hoc networks with trust management[C]//The 6th ACM Symposium on Development and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications. 2016: 41-49.
- [33] FODOR G, DAHLMAN E, MIDH G, et al. Design aspects of network assisted device-to-device communications[J]. Communications Magazine, 2012, 50(3): 170-177.
- [34] PU L, CHEN X, XU J, et al. D2D fogging: an energy-efficient and incentive-aware task offloading framework via network-assisted D2D collaboration[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 3887-3901.
- [35] PENTIKOUSIS K, WANG Y, HU W. Mobileflow: toward software-defined mobile networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(7): 44-53.
- [36] 钱志鸿, 王雪. 面向 5G 通信网的 D2D 技术综述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 1-14.
- QIAN Z H, WANG X. Reviews of D2D technology for 5G communication networks[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 1-14.
- [37] KITADA S, HIRAKAWA G, SATO G, et al. DTN based MANET for disaster information transport by smart devices[C]//International Conference on Network-Based Information Systems. 2015: 26-31.
- [38] WANG K, LI H, YU F R, et al. Virtual resource allocation in software-defined information-centric cellular networks with device-to-device communications and imperfect CSI[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 10011-10021.
- [39] YU H C, QUER G, RAO R R. Wireless SDN mobile ad hoc network: From theory to practice[C]//2017 IEEE International Conference on Communications. 2017: 1-7.
- [40] CASONI M, GRAZIA C A, KLAPEZ M. An SDN and CPS based opportunistic upload splitting for mobile users[C]//International Internet of Things Summit. 2015: 67-76.
- [41] LABRAOUI M, BOC M M, FLADENMULLER A. Opportunistic SDN-controlled wireless mesh network for mobile traffic offloading[C]//International Conference on Selected Topics in Mobile and Wireless Networking. 2017: 1-7.
- [42] LIU Y C, CHEN C, CHAKABOTY S. A software defined network architecture for geobroadcast in VANETs[C]//2015 IEEE International Conference on Communications. 2015: 6559-6564.
- [43] HUANG X, KANG J, YU R, et al. A hierarchical pseudonyms management approach for software-defined vehicular networks[C]// Vehicular Technology Conference. 2016: 1-5.
- [44] WANG X, WANG C, ZHANG J, et al. Improved rule installation for real-time query service in software-defined internet of vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(2): 225-235.
- [45] LI H, DONG M, OTA K. Control plane optimization in software-defined vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(10): 7895-7904.
- [46] KAZMI A, KHAN M A, AKRAM M U. DeVANET: decentralized software-defined VANET architecture[C]//2016 IEEE International Conference on Cloud Engineering Workshop. 2016: 42-47.
- [47] CHAHAL M, HARIT S. Towards software-defined vehicular communication: architecture and use cases[C]//International Conference on Computing, Communication and Automation. 2017: 534-538.
- [48] TANG H, DING Z, LEVY B C. Enabling D2D communications through neighbor discovery in LTE cellular networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(19): 5157-5170.
- [49] ZOU K J, WANG M, YANG K W, et al. Proximity discovery for device-to-device communications over a cellular network[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(6): 98-107.
- [50] CHOI K W, HAN Z. Device-to-device discovery for proximity-based service in LTE-advanced system[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(1): 55-66.

[作者简介]



邵雯娟 (1979-), 女, 江苏常熟人, 解放军陆军工程大学博士生, 主要研究方向为新型网络体系结构和移动通信。



沈庆国 (1965-), 男, 江西鹰潭人, 解放军陆军工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为新型网络体系结构和移动互联。