

· 专题:5G移动通信基础理论与关键技术 ·

蜂窝车联网(C-V2X)综述

陈山枝^{1*} 时 岩² 胡金玲¹

1. 电信科学技术研究院有限公司 无线移动通信国家重点实验室,北京 100191
2. 北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室,北京 100876

[摘要] 车联网作为产业变革创新的重要催化剂,正推动着汽车产业形态、交通出行模式、能源消费结构和社会运行方式的深刻变化。智能交通和自动驾驶对车联网的通信速率、时延和可靠性等系统性能提出更加严苛的要求。蜂窝车联网(C-V2X, Cellular Vehicle-to-Everything)提供低时延、高可靠的V2X通信能力,已成为国际主流的车联网通信标准。随着移动通信从4G向5G演进,C-V2X标准正在从LTE(Long Term Evolution)-V2X到NR(New Radio)-V2X演进,并在全球竞争中已形成超越态势。基于作者所承担的国家自然科学基金重点项目相关研究工作及成果,本文介绍了C-V2X的研究进展,分析其相对于IEEE 802.11p的技术优势,并从基础理论、关键技术和应用前景等方面展望了C-V2X的发展方向。

[关键词] C-V2X;5G;LTE-V2X;NR-V2X;智能交通;自动驾驶

1 蜂窝车联网(C-V2X)进展

汽车作为现代社会重要的交通工具,在给人类带来舒适和方便的同时,随着其数量的快速增长,交通安全、城市拥堵、能耗等问题日趋严重。据统计,全球范围内,交通事故年均致死人数约为130万,成为青年人死亡的首要原因^[1],上班族由于交通拥堵导致的时间损失每年可达几十甚至上百小时^[2],由此导致的经济损失在某些国家GDP(Gross Domestic Product)中占到了1%~3%的比例^[3,4],全球超过10%的温室气体排放来自交通运输业的燃油^[5],美国每年由于交通拥堵造成的燃油浪费可达150亿升^[6]。

在此背景下,车联网(V2X, Vehicle-to-Everything)技术应运而生,实现车辆与周围的车、人、交通基础设施和网络等全方位连接和通信,在提升交通效率、提高驾驶安全、降低事故发生率、节能减排等方面表现出突出优势^[6,7]。另外,近几年来,汽车工业呈现“新四化”(网络化、智能化、电动化、共享化)发展趋势,智能交通系统(ITS, Intelligent



陈山枝 教授级高工/博导,国家杰出青年科学基金获得者,政府特殊津贴专家,“新世纪百万人才工程”国家级人选。现任中国信息通信科技集团有限公司副总经理、专家委主任,中芯国际非执行董事,无线移动通信国家重点实验室主任。主要研究领域为5G/6G移动通信系统、蜂窝车联网、移动性管理等理论与关键技术,以及相关标准制定及产业化。主持国家自然科学基金重点项目、国家科技重大专项等20余项科研项目,在信息领域权威期刊发表SCI论文60余篇,授权发明专利40余件,部分被ETSI披露为4G和5G国际标准必要专利,出版学术专著6本。研究成果获国家科学技术进步奖特等奖、一等奖、二等奖,国家技术发明奖二等奖,何梁何利基金科学与技术创新奖、光华工程科技奖等奖项。

Transportation System)领域的专家也提出数字化、网联化、智能化、自动化等发展方向,均迫切需要车联网为其提供基础性的通信和连接支撑能力。车联网技术已引起美、欧、亚多个国家和地区政府的高度重视,均将车联网产业作为战略制高点,通过制定国家政策或通过立法推动产业发展。

车联网通信包括车与车之间(V2V, Vehicle-to-Vehicle)、车与路之间(V2I, Vehicle-to-Infrastructure)、车与人之间(V2P, Vehicle-to-Pedestrian)、车与网络

收稿日期:2020-03-31;修回日期:2020-04-04

* 通信作者,Email:chensz@cict.com

本文受国家自然科学基金项目(61731017、61731004、61931005)资助。

之间(V2N, Vehicle-to-Network)的通信等,具有低时延、高可靠等特殊严苛的要求。车联网基于V2X通信提供的环境感知、信息交互与协同控制能力,支持交通安全类、交通效率类、自动驾驶类、信息娱乐类等丰富的应用类型^[8],与智能交通、自动驾驶等领域融合发展、协同演进。从远程信息处理(Telematics)到车路协同,从单车智能到网联智能,对通信性能的要求愈加严苛,表现为更低的时延、更高的可靠性、更高的速率,例如:消息发送频率从基本安全业务的10 Hz到自动驾驶应用的100 Hz,消息大小从300~400 Byte到6 000~12 000 Byte,可靠性要求达到99.999%等^[9]。

V2X通信面临车辆移动引起的网络拓扑高度动态性与时空复杂性、无线传播环境复杂快时变、高密度下的低时延和高可靠通信难题等新科学问题。美国主导的IEEE 802.11p标准,在WiFi基础上增强设计为V2X直通通信,也已有近十年的研究和测试评估,虽然能够提供多对多、低时延通信,但可靠性差;蜂窝移动通信(如4G LTE)技术具有覆盖广、容量大、可靠性高的优点,但端到端通信时延大。单一的蜂窝通信或直通通信制式各具优缺点,但均无法满足车联网通信需求。

大唐电信科技产业集团(以下简称大唐)研究团队(即本文作者团队)在2013年最早基于4G LTE提出蜂窝通信与直通通信融合的LTE-V2X概念和关键技术^[10,11],之后联合我国企业共同牵头在3GPP主导LTE-V2X国际标准制定,于2017年3月完成标准化^[12,13]。随着移动通信系统从4G向5G的演进,为满足自动驾驶、车辆编队等增强应用及更高通信传输速率、更低时延、更高可靠性等要求,LTE-V2X目前正在向NR-V2X演进,3GPP正在5G新空口无线传输基础上制定NR-V2X标准过程中。蜂窝车联网(C-V2X, Cellular Vehicle to Everything)是5GAA(5G Automotive Association)提出的新术语,目的是为了区别IEEE 802.11p,专指基于蜂窝移动通信系统的V2X无线通信技术。因此,C-V2X包含了LTE-V2X和NR-V2X。大唐、华为等中国公司在C-V2X技术标准、样机开发、产业合作、应用示范等方面已取得主导地位 and 领先优势,走在世界前列。C-V2X系统示意图如图1所示。

蜂窝通信与直通通信融合的C-V2X包含了两种通信模式:一种是蜂窝方式,终端和基站之间通过Uu接口通信,由基站作为集中式的控制中心和数据

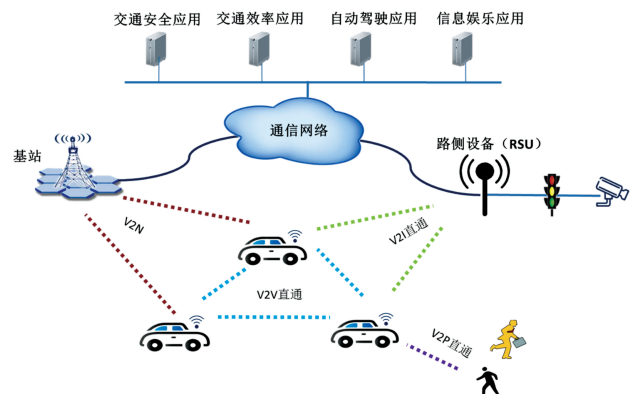


图1 C-V2X系统示意图

信息转发中心,完成集中式无线资源调度、拥塞控制和干扰协调等功能,在LTE-V2X中称作LTE-V-Cell^[10];另一种是直通通信模式,车、人、路之间通过PC5接口实现短距离直连通信接口,解决车联网中终端间低时延、高可靠传输的问题,在LTE-V2X中称作LTE-V-Direct^[10]。这两种通信模式共同支持车联网多样化的应用需求,直通方式可支持在没有蜂窝基站覆盖的场景下工作。通过增加V2X应用层与接入层间的适配层,实现通信模式智能选择,支持业务分流控制、无线传输控制、业务质量管理、连接控制管理等功能。蜂窝通信(Uu)和直通通信(PC5)两种模式优势互补,通过合理分配系统负荷,自适应快速实现车联网业务高可靠和连续通信。

在蜂窝移动通信基础上需要支持多点对多点的直通通信模式,并且还要解决车联网业务通信频度高、拓扑变化快、终端间的低时延高可靠传输需求等严苛难题,C-V2X对帧结构、载波传输、信道编码、干扰控制、无线资源调度与管理、同步、安全等基本方法和关键技术进行了针对性深入研究和增强设计。

在无线传输方面,帧结构是无线通信制式的基础框架,蜂窝通信和直通通信的帧结构差异较大。在蜂窝通信帧结构的基础上支持车辆高速运动和5.9GHz高载频下的直通通信特性,面临及时跟踪信道快速时变和应对功率突变的融合帧结构设计难题。首先,LTE-V2X帧结构设计重用4G LTE基本参数,包括子载波间隔、符号调制方式、子帧长度等;其次,针对车载环境下车辆相对高速运动及车辆自组网网络拓扑快速变化的挑战,采用了导频加密方法,将原有两列导频增加到四列,平衡系统开销与解决及时跟踪信道时变难题。并将子帧内第1个符号用作保护间隔(GP, Guard Period)和自动增益控制

(AGC, Automatic Gain Control), 解决车辆直通特有的接收功率突变难题。在调制方面, LTE-V2X 采用 SC-FDM (Single-Carrier Frequency-Division Multiplexing) 方式, 有效降低峰均比, 从而带来性能提升。LTE-V2X 支持灵活的调制编码方案, 支持多种消息大小, 可以满足车联网多种应用的不同需求。

在接入控制和资源调度方面, 由于车联网业务通信频度高、拓扑变化快, 低时延的直通通信易出现资源冲突, 资源协调难。LTE-V2X 结合道路安全业务周期性特性, 采用感知信道与半持续调度结合的分布式资源调度机制, 在兼顾其它发送节点的需求和业务的周期性严苛要求下, 既减少了系统干扰也减少了信令开销, 又提高了 LTE-V2X 的传输可靠性。

在通信模式智能选择方面, LTE-V2X 结合蜂窝模式和直通模式, 共同支持车联网多样化的应用需求。通过增加 V2X 应用层与接入层间的适配层, 实现通信模式智能选择, 支持业务分流控制、无线传输控制、业务质量管理、连接控制管理等功能。蜂窝通信和直通通信两种模式优势互补, 通过合理分配系统负荷, 自适应快速实现车联网业务高可靠和连续通信。

自动驾驶、车辆编队等增强应用是 C-V2X 持续演进的重要驱动力。为了满足上述应用的更低时延、更高可靠性、更高通信传输速率要求(例如特定场景下, 时延不超过 3ms, 可靠性达到 99.999%), 同时, 为了灵活支持车车行驶意图协同、传感器共享、编队行驶等丰富多样的增强应用, NR-V2X 对直通通信进行了针对性研究^[14-18]。除了支持广播方式, 还增加支持单播和组播机制, 用于支持复杂交互的业务需求, 引入反馈机制, 实现比广播机制更高的可靠性。NR-V2X 无线传输采用新的方法, 包括更大的子载波间隔、灵活的时隙结构、更短的传输时间间隔(TTI, Transmission Time Interval)、新的共享信道和控制信道映射关系、新的反馈信道等。为了支持更高的传输速率, NR-V2X 将引入新工作频段、编码、调制方式。目前, NR-V2X 国际标准还在研究制定中。

作为车联网的 V2X 无线通信技术, 虽然 IEEE 802.11p 具有先发优势, 但是, 相对而言, C-V2X 具有以下技术优势(如下表 1 所示)。

由于 C-V2X 所具有的上述优势, 目前已成为国际主流的车联网通信标准。美国、欧洲、日本虽然在 2016 年前后均已将车联网产业作为战略制高点, 通

表 1 LTE-V2X 相对于 IEEE 802.11p 的技术先进性^[10, 11, 14, 19]

关键技术指标	IEEE 802.11p	LTE-V2X
网络覆盖	有限覆盖	广域覆盖
通信场景	V2V、V2I	V2V、V2I、V2N、V2P
时延	不确定时延	20 ms(Rel 14 版本) 10 ms(Rel 15 版本)
可靠性	不保障可靠性	>90%(Rel 14 版本) >95%(Rel 15 版本)
峰值速率	6 Mbps	31 Mbps
同步	不同步	同步
信道编码	卷积码	Turbo 码
波形	OFDM	SC-FDM
资源复用	仅支持 TDM	支持 TDM 和 FDM
重传	不支持	支持 HARQ 重传
资源分配	CSMA/CA	基于感知的半持续调度
多天线	节点实现	支持发送分集

过制定国家政策或立法推动产业发展, 但主要基于 IEEE 802.11p 开展工作。近期, C-V2X 技术标准在全球竞争中已形成超越态势。继我国率先于 2018 年为 LTE-V2X 直连通信分配了 5.9 GHz 频段 20 MHz 专用带宽之后, 随着产业路径逐渐清晰, 美国于 2019 年 12 月为 C-V2X 分配 5.9 GHz 的 20 MHz 频段^[20], 欧洲也由支持 IEEE 802.11p 转向技术中立^[21]。

C-V2X 在我国得到系列政策的支持, 产业界也积极推动产品研发、技术示范及先导应用, 以 C-V2X 技术为核心已经形成了完整的产业生态。大唐、华为等中国企业在车联网技术标准、样机开发、产业合作、应用示范等方面已取得主导地位和领先优势, 早在 2017 年就开展了 LTE-V2X 通信设备的互联互通测试。2018 年, 我国率先实现了世界首例跨通信模组、跨终端、跨整车的互联互通示范。2019 年又举办了 C-V2X“四跨”互联互通应用示范活动, 在 2018 年“三跨”的基础上, 重点增加了通信安全演示场景, 有效试验验证了 C-V2X 通信安全技术解决方案, 实现跨“模组—终端—安全认证服务—车厂”的全方位演示, 充分体现我国在 C-V2X 产业的领先性。

2 蜂窝车联网(C-V2X)展望

2.1 C-V2X 技术展望

目前 C-V2X 从 LTE-V2X 向 NR-V2X 标准演进, 未来还将与超大规模 MIMO (Multiple Input

Multiple Output)、毫米波通信、移动边缘计算(MEC, Mobile Edge Computing)、雷达、高精度定位等新技术结合,基础理论和技术研究面临如下挑战^[14, 22, 23]:

(1) 无线信道建模

信道建模是车联网中通信系统设计和性能评价的重要基础。在车联网通信中,由于独特的传播环境、车辆高速移动、移动区域受限、天线高度低且多样等特点,其信道与传统蜂窝通信信道具有显著差别^[24, 25]。一方面,在V2V通信中,通信双方均处于高速移动中,且双方的相对移动可能呈现多状态的变化,由此会引起多径随机生灭的加剧、信道状态的快速切换、多普勒功率谱畸变,并导致信道的统计规律难以预测;另一方面,周边环境可能存在大量高速移动的散射体(如周边的移动车辆)。因此,车联网的无线信道通常具有以下特性:多普勒频移大且时变性强、深衰落特性(频繁出现比瑞利分布更加恶劣的情况)、空间—时间—频率域的非平稳特性^[24, 26—28]。

未来,超大规模MIMO、毫米波通信等新技术将会应用在车联网中,针对上述新技术,未来车联网无线信道建模面临混合统计几何建模方法、毫米波频段快时变信道测量与建模、空间—时间—频率域的三维非平稳信道建模、高速移动环境下多径跟踪与动态成簇规律分析、基于机器学习和场景识别的信道预测等挑战^[14, 22]。

(2) 雷达与通信的融合

在传统研究中,雷达和通信独立发展^[29]。车联网具有数据传递和目标探测的双重需求。由于车载雷达和未来C-V2X通信均使用毫米波频段,雷达与通信的融合与联合设计将成为未来车联网的重要挑战和关键技术之一^[29, 30]。通过通信与探测功能共享硬件设备和频谱资源,能够降低成本、节省空间,并提高频率利用率^[30]。使用通信手段将不同车辆雷达探测结果进行共享和联合处理,能够提高探测的准确度,实现更全面的感知效果。

雷达与通信的融合与联合设计仍然面临诸多挑战。C-V2X通信和雷达技术对调制、带宽、信道和电路的要求不同,需要通过毫米波频段的信号联合设计与信号分离、借助通信波形的雷达回波定位(测距/测速/测角)、极高精度时间同步等实现融合。多车雷达的探测结果共享与联合处理面临大带宽低时延通信传输、收发双方坐标系转换、通信波束与波束对准方向选择等技术挑战^[14, 22]。

(3) C-V2X与移动边缘计算的融合

移动边缘计算将计算和存储资源从网络中心推向更靠近用户的网络边缘,减少时延,提升业务响应时间;减小骨干网络带宽占用,提高传输效率;便于灵活部署,能更好满足车联网低时延、高可靠的严苛性能需求。

C-V2X与MEC的融合能够实现车联网中通信—计算—存储的融合,实现车—路—云的协同感知、决策和控制,从而提供对交通信号灯动态优化控制、交叉路口动态车道管理、基于实时高精度地图的路径规划、远程交通监控、弱势交通参与者检测、车辆编队行驶、远程辅助驾驶等新型应用场景的支持^[31—35]。在这些增强应用中,需要支持大数据分析、数据挖掘、深度学习等计算密集、数据密集型任务,C-V2X与MEC的融合能够避免集中云的高时延,满足低时延高可靠通信需求。

为了实现通信—计算—存储资源的高效融合与协同,C-V2X与MEC的融合面临以下挑战:通信—计算—存储资源的按需部署和动态联合调度、计算卸载决策、高移动性下的通信切换与计算迁移^[14]。

(4) 基于5G增强的高精度定位

车辆行驶决策对自身及环境定位要求极高。亚米级甚至厘米级高精度定位是车联网开展车辆自动行驶和决策安全业务的重要保障,也为低速环境下的公交车靠站停车、港口物流车辆卸装集装箱、车辆编队、自动泊车、远程驾驶等车联网应用提供精准的实时位置信息^[22]。

目前普遍采用的高精度定位技术包括卫星导航差分补偿RTK(Real-Time Kinematic)定位、无线电(例如蜂窝网、局域网等)、激光雷达/毫米波雷达/微波雷达探测、惯性测量定位、传感器定位、高精度地图定位等。由于这些技术分别存在响应速度慢、定位精度低、应用场景受限(易受环境变化影响稳定性和适应性)、覆盖范围有限等缺陷,并且存在各种定位技术及模块信息反馈独立、定位信息时间不同步、空间坐标系不一致等问题^[14, 22]。未来车联网的高精度定位,需研发以5G网络的高精度定位及高精度卫星定位为基础、并将多层次定位技术实现可信融合,保障不同应用场景、不同业务定位需求的一体化定位方案。

(5) 车联网安全

车联网的功能安全、网络安全、隐私和数据安全是构建车联网应用的关键环节。需要研究相应的安全机制来保证车联网消息的完整性、机密性和抗重

放攻击,同时也需要研究相应的隐私保护机制来保证5G车联网的安全^[23]。

车联网将与边缘计算技术相结合,形成分层、多级边缘计算体系,满足高速、低时延车联网业务处理及响应的需要。车联网与边缘计算融合的体系架构需要针对数据安全、身份认证、隐私保护和访问控制提出相应的安全机制,保证安全开展车联网业务。

车联网存在数据来源广、多方参与、利益不一致且无单一可信方和大量流程交互等特点。利用区块链技术通过数据防篡改和可追溯的统一账本来记录车联网中各个参与方整个生命周期的信息。研究区块链在车联网安全领域的应用可以推动车联网及安全技术的发展。

(6) 多天线、多载波和多频段应用

考虑到多天线技术在频谱效率和系统容量的增益,及未来车联网通信会使用运营商频谱、ITS专用频谱等不同频率资源,多天线、多频段和多载波技术结合是未来车联网通信的必然发展趋势。

大规模天线、多频段和多载波在技术结合上也面临诸多挑战。对于车联网而言,考虑到车载天线阵设计面临车辆外形和尺寸、车辆内部天线线缆损耗、车内电子设备的电磁干扰等诸多限制条件;大规模天线阵的小型化、天线射频前端处理单元的结构和位置、以及射频前端在小型化的基础上实现宽带化和多通路等都是未来面临的难题^[22]。

2.2 C-V2X 应用展望

C-V2X是未来智能交通和自动驾驶的重要使能技术。通过车与车、基础设施、行人、网络、云的低时延、高可靠V2X通信能力,实现数据、计算任务、决策结果、控制指令在车辆及不同道路元素之间的传输,从而实现协同感知、决策和控制。

C-V2X的应用预期将经历以下三个发展阶段:

(1) 支持辅助驾驶安全、提高交通效率:需要LTE-V2X直通模式(PC5)和4G蜂窝(Uu)支持,提供车-车、车-路协同感知能力;(2) 封闭园区和封闭道路中商用车的中低速自动驾驶:需要LTE-V2X和5G蜂窝(Uu)支持,与区域部署的MEC相结合,提供封闭区域(如工业园区、港口、矿山等)的协同决策和控制能力;(3) 高速公路的乘用车自动驾驶以及车辆编队行驶:需要NR-V2X和5G蜂窝(Uu)支持,与广泛部署的MEC融合提供开放道路的协同决策和控制能力^[14]。

在当前全球新冠疫情和经济形势下,我国持续

发布相关利好政策^[36, 37],推动5G和LTE-V2X车联网的新基建,LTE-V2X路侧基础设施部署,将走出C-V2X的车路协同方案解决智慧交通和自动驾驶的发展模式,支持我国汽车产业的变革,并将会出现智慧路网平台运营商和出行服务提供商等商业模式创新。

3 结 语

本文从蜂窝车联网(C-V2X)的需求和挑战出发,介绍了C-V2X的基本方法和关键技术及其从LTE-V2X向NR-V2X的演进方向,分析了C-V2X相对于美国主导的IEEE 802.11p的技术优势,及其在全球竞争中的超越态势,进而展望了蜂窝车联网技术和应用的未来发展趋势。C-V2X作为车联网中协同感知、决策和控制的核心关键技术之一,作为国家新型信息基础设施建设工程的重要组成部分,必将推动我国汽车产业、智能交通、智慧城市等领域的技术变革和发展模式创新。

致谢 特别感谢大唐高鸿的房家奕和赵丽、大唐移动的徐晖、北京大学的程翔教授、北京交通大学的何睿斯教授、北京邮电大学的张建华教授所提出的宝贵建议。

参 考 文 献

- [1] Global Car Accident Statistics for 2019. <https://safer-america.com/car-accident-statistics/#Global>.
- [2] INRIX Research. INRIX global traffic scorecard. <https://trid.trb.org/view/1456836>. 2020, 3.
- [3] World Health Organization. Road traffic injuries. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>. 2020, 3.
- [4] Gwilliam K. Cities on the move: a world bank urban transport strategy review. World Bank; Washington, DC, USA, 2002.
- [5] Global Greenhouse Gas Emissions Data. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>.
- [6] GSMA. <https://www.gsma.com/gsmadeurope/news/gsma-and-5gaa-sign-cooperation-agreement-to-boost-deployment-of-connected-cars-and-safer-roads/>. 2019, 9.
- [7] Harding J, Powell GR, Yoon R, et al. Vehicle-to-vehicle communications: readiness of V2V technology for application. (Report No. DOT HS 812 014). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration. 2014, 8.
- [8] Boban M, Kousaridas A, Manolakis K, et al. Connected roads of the future: use cases, requirements, and design considerations for vehicle-to-everything communications. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2018, 13 (3): 110—123.

- [9] 3GPP TS 22.186. Enhancement of 3GPP support for V2X scenarios. V16.2.0, 2019, 6.
- [10] Chen SZ, Hu JL, Shi Y, et al. LTE-V: A TD-LTE-based V2X solution for future vehicular network. *IEEE Internet Things Journal*, 2016, 3(6): 997–1005.
- [11] 陈山枝, 胡金玲, 时岩, 等. LTE-V2X 车联网技术、标准与应用. *电信科学*, 2018, 34(4): 1–11.
- [12] RP-170236. Status report of WI: LTE-based V2X services. 3GPP TSG RAN meeting # 75, Dubrovnik, Croatia, 2017, 3.
- [13] 3GPP TS 36.213. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), physical layer procedures. V14.2.0, 2017, 3.
- [14] Chen SZ, Hu JL, Shi Y, et al. A vision of C-V2X: technologies, field testing and challenges with chinese development. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020.
- [15] Chen SZ, Hu JL, Shi Y, et al. Vehicle-to-everything (v2x) services supported by LTE-based systems and 5G. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2017, 1(2): 70–76.
- [16] RP-181480. New SID: Study on NR V2X. 3GPP TSG RAN meeting # 80, La Jolla, USA, 2018, 6.
- [17] RP-190766. New WID on 5G V2X with NR side link. 3GPP TSG RAN meeting # 83, Shenzhen, China, 2019, 3.
- [18] Lien S, Deng D, Lin C, et al. 3GPP NR side link transmissions toward 5G V2X. *IEEE Access*, 2020, 8: 35368–35382.
- [19] 5GAA whitepaper. <http://5gaa.org/news/white-paper-placeholder-news-for-testing/>. 2016, 11.
- [20] Use of the 5.850-5.925 GHz Band, Notice of proposed rulemaking-ET docket No. 19-138. 2019, 11.
- [21] 5GAA welcomes Council objection against C-ITS Delegated Act. <https://5gaa.org/news/5gaa-welcomes-council-objection-against-c-its-delegated-act/>. 2019, 7.
- [22] 陈山枝, 胡金玲, 等. 车联网技术、标准与产业发展态势前沿报告. *中国通信学会白皮书*, 2018, 12.
- [23] 陈山枝, 徐晖等. 车联网安全技术与标准发展态势前沿报告. *中国通信学会白皮书*, 2019, 12.
- [24] Molisch AF, Tufvesson F, Karedal J, et al. A survey on vehicle-to-vehicle propagation channels. *IEEE Wireless Communications*, 2009, 16(6): 12–22.
- [25] Fallgren M, Dillinger M, Alonso-Zarate M, et al. Fifth-generation technologies for the connected car: capable systems for vehicle-to-everything communications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2018, 13(3): 28–38.
- [26] Wang CX, Bian J, Sun J, et al. A survey of 5G channel measurements and models. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 3142–3168.
- [27] Cheng X, Zhang RQ, Yang LQ. 5G-enabled vehicular communications and networking. Cham, Switzerland: Springer, 2018.
- [28] Yang M, Ai B, He RS, et al. A cluster-based three-dimensional channel model for vehicle-to-vehicle communications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(6): 5208–5220.
- [29] Chiriyath AR, Paul B, Bliss DW. Radar-communications convergence: coexistence, cooperation, and co-design. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, 2017, 3(1): 1–12.
- [30] Dokhanchi SH, Mysore BS, Mishra KV, et al. A mmWave automotive joint radar-communications system. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(3): 1241–1260.
- [31] 3GPP TR 22.886. Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services. V16.0.0, 2018, 6.
- [32] Ferdowsi A, Challita U, Saad W. Deep learning for reliable mobile edge analytics in intelligent transportation systems: an overview. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2019, 14(1)(S1): 62–70.
- [33] 5GAA White Paper. Toward fully connected vehicles: edge computing for advanced automotive communications. 2017, 12.
- [34] IMT-2020 (5G) 推进组. C-V2X 业务演进白皮书. 2019, 10.
- [35] ETSI GR MEC 022 V2.1.1. Multi-Access Edge Computing (MEC): study on MEC support for V2X use cases. 2018, 9.
- [36] 智能汽车创新发展战略, <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202002/P020200224573058971435.pdf>, 2020, 2.
- [37] 工业和信息化部关于推动 5G 加快发展的通知, <http://www.miit.gov.cn/n1146290/n1146402/c7832340/content.html>. 2020, 3.

Cellular Vehicle to Everything (C-V2X): a Review

Chen Shanzhi^{1*} Shi Yan² Hu Jinling¹

1. State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, China Academy of Telecommunication Technology, Beijing 100191

2. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876

Abstract As an important catalyst for industrial reform and innovation, V2X (Vehicle-to-Everything) communication was promoting profound changes in automobile industry, transportation mode, energy

* Corresponding Author, Email: chensz@cict.com

consumption structure and social operation mode. The intelligent transportation and autonomous driving put forward more stringent performance requirements in data rate, latency, reliability and other system performance of the V2X communication. C-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) provides low latency and high reliability V2X communications, and has become a major international V2X communication standards. With the evolution from 4G to 5G system, C-V2X is evolving from LTE (Long Term Evolution) -V2X to NR (New Radio) -V2X, and has presented obvious surpassing trend in global competition. Based on our research work and results supported by National Science Foundation Projects, this article introduced the research progress of C-V2X. The technical advantages of C-V2X compared with IEEE 802.11p were analyzed. Meanwhile, the fundamental theory and technical challenges with the trend of C-V2X applications were envisioned.

Keywords C-V2X; 5G; LTE-V2X; NR-V2X; intelligent transportation; autonomous driving

(责任编辑 姜钧译)

欢迎订阅《国家自然科学基金委员会 2019 年度报告》

《国家自然科学基金委员会 2019 年度报告》全面系统介绍了国家自然科学基金改革举措,2019 年度财政预算支出与资助总体情况,结题总体情况,各类项目申请与资助情况,重大研究计划、国家重大科研仪器研制项目(部门推荐)、基础科学中心等重要成果巡礼,对于广大依托单位科研管理部门和科学家准确把握科学基金发展趋势、了解中国基础研究发展现状具有重要的参考价值。

征订细则:请将征订单填写完整与贵单位(个人)的转账记录一并发至 zhaodi@nsfc.gov.cn;我们会根据征订信息开具电子发票,每周统一以挂刷的形式邮寄给各订阅单位(个人)。

征 订 单

书 名	《国家自然科学基金委员会 2019 年度报告》
定 价	128.00 元
订阅份数	份
总计金额	¥ 元
汇款日期	
经办人	
联系电话	
Email	
邮寄地址	
邮政编码	
发票抬头	
纳税人识别号或 统一社会信用代码	

联系信息

书 名	《国家自然科学基金委员会 2019 年度报告》
联系人	赵 迪
联系电话	010-62326880
电子邮箱	zhaodi@nsfc.gov.cn
银行户名	国家自然科学基金委员会 科学基金杂志社
开户银行	中国工商银行北京北太平庄支行
账号	0200 0100 0920 0062 483