



综述

蜂窝车联网 (C-V2X) 技术发展、应用及展望

陈山枝¹, 葛雨明², 时岩³

(1. 中国信息通信科技集团有限公司无线移动通信国家重点实验室, 北京 100191;

2. 中国信息通信研究院, 北京 100191;

3. 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, 正推动着交通管理模式、汽车产业形态、人们出行方式和能源消费结构的深刻变化。首先分析了智慧交通和智能驾驶等对车联网通信在通信速率、时延和可靠性等方面的需求与挑战, 进而介绍了蜂窝车联网 (cellular vehicle-to-everything, C-V2X) 中 LTE-V2X 和 NR-V2X 的关键技术及其国际标准演进, 并指出 C-V2X 在全球竞争中已形成超越态势。在此基础上, 分析了应用 C-V2X 的车车协同和车路协同在智慧交通和智能驾驶中的应用优势。最后介绍了 C-V2X 在我国的示范应用情况和发展展望, 指出中国发展智慧交通和智能网联汽车之路: 将积极推进“5G+C-V2X”新型基础设施建设, 探索基于车联网的“聪明的车、智慧的路、协同的云”发展模式, 进而支撑我国达成“碳达峰”与“碳中和”战略目标。

关键词: 5G; C-V2X; LTE-V2X; NR-V2X; 智慧交通; 智能网联汽车

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022007

Technology development, application and prospect of cellular vehicle-to-everything (C-V2X)

CHEN Shanzhi¹, GE Yuming², SHI Yan³

1. State Key Laboratory of Wireless Mobile Communications, China Information Communication Technology Group Co., Ltd. (CICT), Beijing 100191, China

2. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

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

Abstract: V2X (vehicle-to-everything) is a promote and profound reform-and-innovation in transportation and automobile industries. It is changing the people's travel mobility modes and ways of society energy consumption. The re-

收稿日期: 2021-12-01; 修回日期: 2022-01-05

通信作者: 陈山枝, chensz@cict.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61731017, No.61731004, No.61931005); 北京市自然科学基金资助项目 (No.L202018)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61731017, No.61731004, No.61931005), Beijing Natural Science Foundation of China (No.L202018)



quirements and challenges of V2X communication performance in data rate, latency, and reliability, being required and challenged by intelligent transportation and automated driving applications were analyzed. The critical technologies and international standards evolutions of cellular vehicle-to-everything (C-V2X) were introduced, including LTE-V2X and NR-V2X. Then, the advantages of applying C-V2X were analyzed for vehicle-vehicle and vehicle-infrastructure cooperation in intelligent transportation and automated driving. Meanwhile, the field testing and industrial practice of C-V2X in China were presented, and the roadmap was envisioned for developing intelligent transportation and intelligent connected vehicles (ICV) in China. For example, the envisions include actively promoting the construction of “5G+C-V2X” and new type infrastructure, exploring the development mode of vehicle-infrastructure cooperation based on V2X, and eventually supporting China to reach the national low “carbon peak” and to achieve the national “carbon neutralization” strategic goals.

Key words: 5G, C-V2X, LTE-V2X, NR-V2X, intelligent transportation, intelligent connected vehicle

1 车联网通信需求、挑战与技术标准

车联网 (vehicle-to-everything, V2X) 技术实现车辆与周边环境和网络的全方位通信, 包括车与车 (vehicle-to-vehicle, V2V)、车与路 (vehicle-to-infrastructure, V2I)、车与人 (vehicle-to-pedestrian, V2P)、车与网络 (vehicle-to-network, V2N) 等, 为汽车驾驶和交通管理应用提供环境感知、信息交互与协同控制能力^[1-5]。

车联网应用从道路安全类、交通效率类、信息服务类等基本应用向智慧交通、自动驾驶等增强应用演进, 具有多样化的通信性能需求。在基本应用中, 道路安全类对通信性能要求最高, 以高频度、低时延、高可靠为主要需求^[1,6]; 信息服务类 (如下载地图、视频) 具有带宽需求, 但时延要求不高。车联网增强应用需要支持车辆编队行驶、半/全自动驾驶、远程驾驶、传感器扩展等场景, 因此提出了更严苛的通信需求, 如极低的通信时延、极高的可靠性、更大的传输速率、更远的通信范围, 以及支持更高的移动速度等^[7-8]。

为了支持多样化的车联网应用, 车联网通信技术面临诸多挑战。车辆的高速运动, 导致车辆作为通信节点构成的网络拓扑具有高速动态性与时空复杂性、引入更大的多普勒频偏、无线传播环境复杂快时变^[5]; 高密度、多点对多点的车车通信受资源碰撞、远近效应等的影响, 干扰环境更加复杂。

为此, 产业界和学术界开展了车联网无线通信技术的研究。目前, 车联网通信技术标准主要有两大类: DSRC (dedicated short range communication, 即 IEEE 802.11p) 标准、蜂窝车联网 (cellular vehicle-to-everything, C-V2X) 标准。

DSRC 的 IEEE 802.11p 标准是在 IEEE 802.11 标准基础上增强设计的车联网无线接入技术标准, 支持 V2X 直通通信, 已进行十多年的研究; 但相关研究与测试表明, 其在车辆密集时通信时延大、可靠性低。蜂窝移动通信 (如 4G LTE 和 5G) 技术具有覆盖广、容量大、可靠性高、移动性好的优点, 具有产业规模优势, 能满足车联网的远程信息服务 (telematics) 和娱乐信息服务需求。但其针对以人为主的通信场景、技术特点、通信性能等, 如点对点通信、较低通信频度、通信对象已知, 仍然与车联网的多点对多点通信、通信频度高、通信对象随机突发等特点具有明显差异; 由于端到端通信时延大, 无法满足车车、车路间的低时延通信要求。可见, 无论是单一的蜂窝通信, 还是基于 IEEE 802.11p 的通信制式, 各具优、缺点, 但均无法满足车联网通信需求^[9]。

蜂窝车联网 (C-V2X) 技术在此背景下应运而生。本文第一作者及其大唐团队在国内外最早提出融合蜂窝通信与直通通信的车联网技术概念, 即基于 LTE 的车联网技术 (LTE-V2X)^[2,4,10], 奠定了 C-V2X 系统架构和技术路线。C-V2X 以蜂

窝通信技术为基础,通过技术创新具备 V2X 直通信能力,既能解决车联网应用的低时延、高可靠通信难题,又能够利用已有的移动网络部署支持信息服务类业务,并利用移动通信的产业规模经济降低成本。

产业界、学术界针对两个标准在技术、测试、评估、应用方面开展了大量的工作。目前 C-V2X 相比 IEEE 802.11p,在国际技术与产业竞争中已形成明显的超越态势。我国已开展了 C-V2X 应用需求研究、技术研究、设备研发、测试验证、产业推动、应用推广等相关工作。我国工业和信息化部(以下简称“工信部”)于 2018 年 11 月率先在全球正式发布 5 905~5 925 MHz 的车联网直通信频率规划。美国近年也在加利福尼亚州圣迭戈、密西根州底特律、科罗拉多州、犹他州、旧金山、亚特兰大、匹兹堡等地开展了一系列 C-V2X 的测试与试点工作。2020 年 11 月,美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)决定取消已分配给 DSRC 的 5.9 GHz 频段的所有 75 MHz 带宽,将其中 5 895~5 925 MHz 共 30 MHz 带宽分配给 C-V2X^[11],表明美国政府正式放弃 DSRC,转向 C-V2X 技术路线。

2 蜂窝车联网(C-V2X)技术与标准演进

为了支持多样化的车联网应用,针对上述挑战,国际/国内的标准化组织、产业界、学术界开展了 C-V2X 关键技术和标准研究。另外, C-V2X 技术与智慧交通、智能驾驶等领域融合发展、协同演进,跨领域的 C-V2X 融合应用标准也在不断完善。

2.1 C-V2X 关键技术

C-V2X 是融合蜂窝通信与直通信的车联网通信技术。C-V2X 提供两种互补的通信模式:一种是直通模式,终端间通过直通链路(PC5 接口)进行数据传输,不经过基站,实现 V2V、V2I、V2P 等直通信,支持蜂窝覆盖内和蜂窝覆盖外

两种场景;另一种是蜂窝模式,沿用传统蜂窝通信模式,使用终端和基站之间的 Uu 接口实现 V2N 通信,并可实现基于基站的数据转发实现 V2V、V2I、V2P 通信。随着蜂窝移动通信系统从 4G 到 5G 的演进, C-V2X 又包括 LTE-V2X 和 NR-V2X^[12-14]。

在系统架构方面,为了实现对 C-V2X 蜂窝网络覆盖内、覆盖外通信场景的灵活支持,以及为各类车联网应用提供差异化的服务质量(quality of service, QoS), C-V2X 系统架构除了引入实现直通信的 PC5 接口外,还引入新的逻辑网元 VAS(V2X application server)和对应接口。并针对 V2X 管控和安全需求,在 LTE-V2X 中引入核心网网元 VCF(V2X control function)^[15],在 NR-V2X 中对 PCF(policy control function)、AMF(access and mobility management function)等实体进行了适应性扩展^[16]。

在无线传输方面,帧结构是无线通信制式的基础框架。C-V2X 借鉴蜂窝通信的帧结构,并结合车联网的应用特点(如车辆高速运动引发的多普勒频偏问题等)和 5.9 GHz 高载频下的直通信特性进行了改进。LTE-V2X 采用导频加密方法^[17]等以应对车辆相对高速运动及车辆自组织网络拓扑快速变化的挑战;并在 NR-V2X 中支持两列到四列的自适应导频参考信号模式,可应用于不同行驶速度场景和不同的参数集配置。LTE-V2X 支持广播通信方式以满足道路安全类应用的信息广播需求;NR-V2X 还扩展支持直通链路的单播和多播通信方式^[16],用于支持辅助交互的业务需求。LTE-V2X 支持混合自动重传(hybrid automatic repeat request, HARQ)的盲重传, NR-V2X 引入自适应重传机制,实现比广播机制更高的可靠性。在调制方面, NR-V2X 引入了高阶调制(最高可以是 256QAM)和空间复用的多天线传输机制(最大支持 2 层空间复用),以支持更高的传输速率。



在接入控制和资源调度方面, C-V2X 支持两种资源调度方式: 基站调度方式和终端自主资源选择方式。LTE-V2X 最早提出这两种模式, NR-V2X 沿用并进行了适应性改进。在基站调度方式(即 LTE-V2X 的模式 3 和 NR-V2X 的模式 1)中, 基站调度 V2X 终端在直通链路的传输资源, 能够有效避免资源冲突、解决隐藏节点问题。在终端自主资源选择方式(即 LTE-V2X 的模式 4 和 NR-V2X 的模式 2)中, C-V2X 采用分布式资源调度机制。对于周期性特征明显的道路安全等 V2X 业务, 采用感知信道与半持续调度(semi-persistent scheduling, SPS)结合的资源分配机制^[18-23]。充分利用 V2X 业务的周期性特点, 发送节点预约周期性的传输资源来承载待发送的周期性 V2X 业务, 有助于接收节点进行资源状态感知和冲突避免, 提高了资源利用率, 提升了传输可靠性。对于非周期性业务, 采用感知与单次传输结合的资源分配机制, 但由于无法预测和预约未来的资源占用, 资源碰撞概率较大。

在同步机制方面, 为了减少系统干扰, 实现全网统一定时, C-V2X 支持基站、全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)、

终端作为同步源的多源异构同步机制^[24-25]。由基站配置同步源和同步方式, 覆盖外采用预配置方式确定同步源, 以便实现全网统一的同步定时。

2.2 C-V2X 核心技术标准演进

国际标准方面, C-V2X 技术标准的演进可以分为两个阶段: LTE-V2X 和 NR-V2X, 如图 1 所示。

LTE-V2X 由 3GPP Rel-14 和 Rel-15 技术规范定义。其中, Rel-14 在蜂窝通信中引入了支持 V2X 短距离直通信的 PC5 接口, 支持面向基本道路安全业务的通信需求, 主要实现辅助驾驶功能, 已于 2017 年 3 月完成。3GPP Rel-15 技术规范定义对 LTE-V2X 直通链路进行了增强, 包括多载波操作、高阶调制(64QAM)、发送分集和时延缩减等新技术特性, 于 2018 年 6 月完成。

NR-V2X 研究基于 5G 新空口(new radio, NR)的 PC5 接口和 Uu 接口增强, 主要用于支持车辆编队行驶、远程驾驶、传感器扩展等高级 V2X 业务需求。3GPP 于 2019 年 3 月完成了 Rel-16 NR-V2X 的研究课题, 于 2020 年 6 月完成了 Rel-16 NR-V2X 标准化项目。后续仍将在 Rel-17 研究弱势道路参与者的应用场景, 研究直通链路中终端

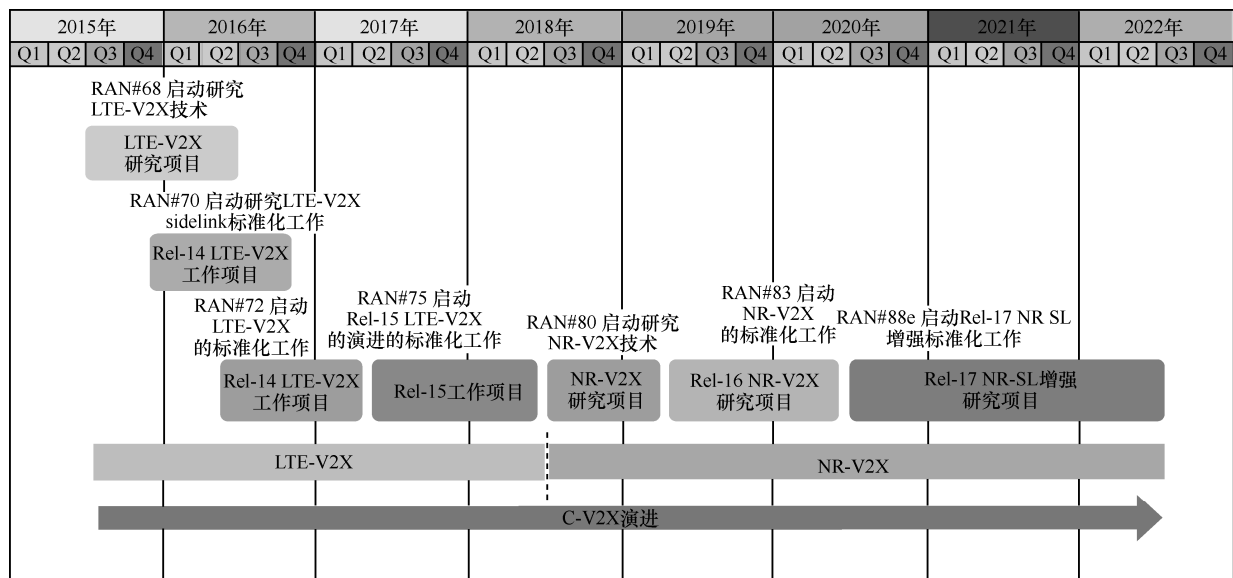


图 1 C-V2X 标准演进^[9]

节电机制、节省功耗的资源选择机制，并开展终端之间资源协调机制的研究以提高直通链路的可靠性和降低传输的时延。

国内标准方面，中国通信标准化协会（China Communications Standards Association, CCSA）围绕互联互通和基础支撑，体系化布局并完成了 C-V2X 总体架构、空中接口、网络层与消息层、多接入边缘计算、安全等相关的标准化工作^[26]。

在 C-V2X 融合应用标准方面，在国家制造强国建设领导小组车联网产业发展专委会指导下，工信部、公安部、交通运输部、国家标准化管理委员会联合组织制定并发布《国家车联网产业标准体系建设指南》（以下简称“建设指南”）及各分册，促进 C-V2X 技术标准在汽车、交通、公安等跨行业领域的应用推广。相应地，汽车、通信、智能运输系统、道路交通管理等相关各领域的标准化技术委员会正在加快开展重要标准制订工作。

3 基于 C-V2X 的车车协同和车路协同在智慧交通和智能驾驶的优势分析及应用

C-V2X 是智慧交通和智能驾驶的关键使能技术。目前，无论是汽车领域的自动驾驶分级^[27]，还是交通领域的道路网联化、智能化，都迫切需要 C-V2X 为其提供基础性的通信和连接支撑能力，以实现各个分级中所需要的信息实时共享与交互、协同感知和协同控制。例如，自动驾驶分级中，根据驾驶操作的控制主体、环境感知主体、应用场景等，分无自动化、辅助驾驶、部分自动驾驶、有条件自动驾驶、高度自动驾驶、完全自动驾驶。在自动驾驶的逐级演进和不同的道路网联化、智能化水平中，C-V2X 所发挥的作用，从车车、车路、车云间的信息实时共享与交互，发展至实现异构多域、多源数据的协同感知，进而实现网联的协同智能控制。

3.1 C-V2X 在智慧交通和智能驾驶中的优势分析

C-V2X 作为智慧交通和智能驾驶的重要使能技术，与移动边缘计算（mobile edge computing, MEC）等其他 5G 关键技术一起，与依赖车载感知与计算设备的单车智能技术相比，能够以更低的成本为智慧交通和智能驾驶提供更广泛、更精确的信息感知，以及更强大的网联智能。

（1）更广泛、更精确的信息感知

仅依赖单车多传感器的感知技术，存在感知范围受限、成本昂贵、在恶劣天气和亮度突变等场景下感知鲁棒性差、时空同步困难等缺陷。C-V2X 提供低时延、高可靠的 V2X 通信能力保障，使得汽车可以在绝大多数条件下，有效、准确地获取红绿灯状态与时长、道路标志标识、路段交通突发事件等实时信息，以及在出入隧道等极端情况下的交通实时信息，以帮助识别和警告人类驾驶员或机器控制可能忽视的其他危险。

此外，将单车感知通过 C-V2X 扩展为多车协作感知，即车车协同，进一步将车车协同扩展为异构多域的车路协同感知，并结合移动边缘计算技术实现更大数据量融合/处理后的、更大范围的信息传播，从而满足非视距盲区感知（如十字路口、出入匝道口等）、有遮挡情况下（如前方货车、车辆编队等）的感知需求。基于 C-V2X 的车车与车路协同感知和单车感知在不同应用场景下的比较见表 1。

（2）更强大的网联智能

在单车智能的自动驾驶技术路线中，主要依赖车载计算设备的智能处理能力，存在算力需求随着自动驾驶级别上升呈指数级增长、成本高昂等明显缺陷。基于 C-V2X 构建网联智能，实现由车载计算设备、路侧边缘计算设备和中心云计算设备构成的分级、网络化智能决策与控制。其中，C-V2X 提供计算任务与数据、决策结果、控制指令的低时延、高可靠传输能力。



表 1 基于 C-V2X 的车车与车路协同感知和单车感知在不同应用场景下的比较

	应用场景	基于 C-V2X 的车车与车路协同感知	雷达、视频等单车感知技术	备注
车车 (协同)	AEB/LDW 等 ADAS 应用	增强	能	雷达、视频可以提供近距离高精度感知信息
	CACC 等部分自动驾驶应用	不需要	能	雷达、视频可以实现一定工况条件下的部分自动驾驶
	车辆编队行驶	支持	不支持	C-V2X 解决了多车协同感知和控制问题
	高优先级车辆通行	支持	不支持	C-V2X 解决了车与车之间的协同优化问题
车车与车路(协同)	AVP 应用	复杂场景需要	需要	C-V2X 解决了遮挡感知问题
	高速公路弯道/出入匝道口	预知更早	困难	C-V2X 解决了单车的非视距盲区感知问题
	恶劣天气条件下的红绿灯感知、高速公路团雾条件下的感知	能	困难	C-V2X 解决了单车在恶劣条件下的感知鲁棒性问题
	出入隧道安全	支持	困难	C-V2X 解决了单车在极端条件下的感知鲁棒性问题
	十字交叉路口	强	困难	C-V2X 解决了单车的非视距盲区感知、交通通行效率问题
	区域或广域范围交通感知	有	无	C-V2X 拓展了感知范围

注：AEB (autonomous emergency braking)：自动紧急制动；LDW (lane departure warning)：车道偏移预警；ADAS (advanced driving assistance system)：高级辅助驾驶系统；AVP (automated valet parking)：自动代客泊车；CACC (cooperative adaptive cruise control)：协同自适应巡航控制

在部分复杂交通规则的场景下（如交替通行），考虑到单车自动驾驶对于规则执行通常出于保守的原则，可能会做出低于人类驾驶员效率的决策（如在车道中持续等待）。若采用网联智能方案，一方面车辆可以更好地理解规则、做出更有效率的决策（如按照交替通行的原则合流）；另一方面车辆可将决策信息通知周围车辆，更好地提醒有关车辆注意让行，特别是应用在高优先路权车辆（救护、消防、公安等紧急车辆）中。

（3）系统边际成本优势

单车智能的车用零部件研发成本随汽车安全完整性等级（automotive safety integration level, ASIL）指数增长。目前高度自动化的自动驾驶测试车主要由高精度毫米波/激光雷达、视频传感、高精度定位系统、车载计算平台、通信及计算芯片和车机本身构成，制造、维护、测试等成本很高，存在单车智能的传感器数量多、精度要求高、计算复杂且算力要求高等问题。若路侧具备智能感知能力，通过车车及车路协同的网联智能，降低对单车智能的能力要求。在此背景下，路侧感

知和 V2X 属于共用基础设施，单一路口和关键路段的路侧设备可以同时服务数十到上百辆车，存在明显成本分摊效应，综合有利于降低单车智能化成本。随着路侧单元（roadside unit, RSU）和路侧感知设备、MEC 设备的规模化覆盖建设，安装 C-V2X 功能的汽车达到一定的渗透率，系统的边际成本将快速下降，经济与社会效益显著。

3.2 基于 C-V2X 的车路协同在智慧交通和智能驾驶的应用

值得注意的是，C-V2X 技术的应用，必将经历不同的发展阶段，从重点提升道路安全和交通效率逐步向自动驾驶应用演进。

（1）智能辅助驾驶提升道路安全和交通效率是当前车联网应用发展重点

从提升道路安全的角度，在有人驾驶下，C-V2X 实现车辆与车辆或者路侧基础设施之间实时通信，实现超视距、低时延、高可靠的道路安全相关信息感知，从而实现十字交叉路口碰撞预警、紧急刹车预警等车辆行驶安全应用。以十字交叉路口为例，美国、加拿大等国的统计数据表

明, 高达近 50% 的交通事故发生在交叉路口或与路口相关^[28-29], 是道路安全中极具挑战性的场景^[30-31]。在十字交叉路口碰撞预警应用中, 车辆广播基本安全消息, 携带自身身份、定位、运行状态、轨迹等信息, 交叉路口其他方向来车通过接收信息进行行驶决策。再如, 山区高速公路弯道较多, 特别是在上、下匝道区域, 由于道路线型、山体遮挡的影响, 车辆无法及时获取前方道路信息, 一旦有停车、行人、遗撒等异常情况发生, 容易发生交通事故。路侧感知设备可以对弯道区域的交通参与者和路面情况进行探测与分析, 并将异常情况通过 RSU 进行广播, 对车辆进行盲区感知补充, 有利于车辆驾驶者进行路径规划、避免交通事故。

从提升交通效率的角度, 基于 C-V2X 通信, 经过联网化改造的交通信号灯或电子标志标识等基础设施可将交通管理与指示信息通过 RSU 告知车辆, 实现诱导通行、车速引导等出行效率提升应用。以诱导通行为例, 交通灯信号机可通过 RSU 将灯色状态与配时等信息实时传递给周围的行驶车辆, 为车辆驾驶决策是否通过路口以及对应的通行速度提供相应依据, 并且可以在一定程度上避免闯红灯事故的发生。另外, 车辆可以与交通基础设施互动, 交通信号灯动态支持高优先路权车辆(救护、消防、公安等紧急车辆及满载的公交车辆等)的优先通行。

(2) 支持分阶段演进的自动驾驶是车联网中长期目标

自动驾驶发展需要智能化与网联化协同发展, 单独使用单车智能难以支撑自动驾驶, 特别是应对极端情况(corner case)和成本难题。基于 C-V2X 提供的通信和连接能力实现网联化, 并协同单车的智能控制管理, 支撑自动驾驶中所需要的信息实时共享与交互、协同感知和协同控制。前述用于辅助驾驶阶段的车车和车路协同基本功能在自动驾驶中仍然是必要的。对于自动驾驶阶

段, 基于 C-V2X 的车车和车路协同可产生的直接影响包括且不限于以下情景。

- 自动驾驶的应用场景将由限定区域的复杂路口和复杂路段扩展至全路段、全部路口, 支持协同感知、协同决策与控制, 保障行驶安全、提高交通效率。如有研究表明, 如果所有车辆都使用防撞传感器以及车车(V2V)通信技术, 则高速公路的有效通行能力将提高 273%^[32]。
- 极端危险情况下的远程遥控驾驶: 借助于通信和远程监控, 通过获取车辆的行驶状态和周边交通环境信息, 实时发送指令控制远在几十甚至几百千米之外的车辆, 完成启动、加/减速、转向等真实驾驶操作, 避免极端事故发生^[33], 以及实现自动驾驶发生事故发生后的远程接管和处理。
- 紧急车辆避让: 通过 V2V 通信, 对于识别到的救护、消防、公安等紧急车辆(高优先路权车辆)实现紧急避让, 虽然通过单车智能也可以做到, 但是有若干缺陷, 首先, 只能是相邻车辆; 其次, 无法保证识别的准确率, 识别算法的优劣不同, 可能导致识别速度缓慢, 消息失去时效性。V2V 通信收发的消息本身包含车辆身份信息, 可以对车辆的身份进行识别, 实现具有优先级管理的应用服务, 甚至可以实时让出一个紧急车道。
- 编队行驶: 区别于协同式自适应巡航控制(cooperative adaptive cruise control, CACC), 利用 C-V2X 通信的低时延、高可靠通信能力, 编队车辆通过直通通信实现实时交互。编队成员车辆可以在最短时间内接收到头车/前车的驾驶策略与驾驶状态信息, 进行同步加速、刹车等操作, 从而保持预期的编队构型和编队的稳定性, 可减少编队中成员车辆的空气阻力, 有效降低车辆燃油



消耗。

- “智能路口”-“城市大脑”：借助于 V2X 通信、多级计算平台，可以实现自动驾驶车辆在交叉路口的优化控制，包含路口车车碰撞预警、人车碰撞预警、红绿灯信息获取、车速引导及绿波通行等路口优化应用，有效提升交通效率，进一步降低交通拥堵，提升市民的幸福感受。

可以预期，C-V2X 在自动驾驶中的应用将经历两个发展阶段^[3]：封闭区域或指定道路的中低速无人驾驶、全场景全天候开放道路的无人驾驶。

封闭区域（港口、机场、矿区、工业园区、厂区等）和指定道路中低速无人驾驶需要 LTE-V2X PC5 接口和 5G 蜂窝（Uu）的支持，并与区域部署的 MEC 相结合^[3]。目前产业界已开展一系列商用实践，如神华宝日希勒露天煤矿的网联自动驾驶矿卡、苏州相城区高铁新城的自动驾驶清扫车、天津港的自动驾驶港口集卡、上汽通用五菱工厂的自动驾驶工厂物流等。另外，深圳在“独立立法权”的支持下，即将允许无人环卫车规模化运营；还有指定道路的高级别自动驾驶，如百度在长沙和北京亦庄等开展的 Robotaxi，目前车上配有安全员。

全场景全天候开放道路的无人驾驶需要 NR-V2X PC5 接口和 5G 蜂窝（Uu）支持，与广泛部署的 MEC 融合提供开放道路的广域协同决策和控制能力^[3]，是长远目标，需要政策法规的完善和长期的测试过程。

目前，单车智能化的成本较高。通过网联智能化的推进，可以有效降低单车智能成本。此外，随着越来越多的智能网联汽车、智能化道路基础设施间实现互联，将衍生出更多的应用服务类应用，例如实时的交通诱导、实时的道路事故/工程提醒、实时的路段天气播报（如高速公路团雾等）、出行即服务（mobility as a service, MaaS）等，有助于推行商业模式创新和可持续的行业生态体

系，以及通过车联网支撑汽车行业和交通行业的转型升级，提供低碳汽车产品及降低交通事故和提升交通效率等应用，从而支撑我国“碳达峰”与“碳中和”战略目标的有效达成。

4 我国基于 C-V2X 的车路云协同发展模式和展望

我国政府长期坚持智能化与网联化协同发展路径，充分发挥我国信息通信产业优势，带动汽车、交通传统产业转型升级，推进智能网联汽车产业发展，并促进形成新的产业集聚，已积极影响到国际社会的技术路径选择。

4.1 部委协同，明确车联网与车路协同发展路径

我国已将车联网提升到国家战略高度，国务院及相关部门对车联网产业升级和业务创新进行了顶层设计、战略布局和发展规划，并形成系统的组织保障和工作体系，中国与车联网相关的重要政策见表 2。

进入 2021 年以来，我国在车联网产业顶层规划、部际协调以及跨行业试点示范方面取得良好进展。2021 年 3 月 11 日，十三届全国人大四次会议表决通过了关于国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要的决议。规划中明确指出，要统筹推进传统基础设施和新型基础设施建设，积极稳妥发展车联网。2021 年 4 月，国家制造强国建设领导小组车联网产业发展专委会第四次全体会议在京召开，强调要加快车联网部署应用。2021 年 9 月 8 日，工信部启动了车联网身份认证和安全信任试点项目，包括新能源和智能网联汽车车联网身份认证、安全信任体系建设等 61 个试点项目，有逾 300 家单位参与试点项目建设中，涵盖了汽车、通信、密码、互联网等跨领域企业以及地方车联网建设运营主体等。2021 年 11 月，工信部发布了《“十四五”信息通信行业发展规划》，在规划中有 24 处提到车联网，并明确推动 C-V2X 与 5G 网络、智慧交通、智慧

表 2 中国与车联网相关的重要政策

发布时间	发文机关	政策	主要内容
2018 年 11 月	工信部	《车联网（智能网联汽车）直连通信使用 5 905~5 925 MHz 频段管理规定（暂行）》 ^[34]	规划 5 905~5 925 MHz 频段作为基于 LTE-V2X 技术的车联网（智能网联汽车）直连通信的工作频段
2018 年 12 月	工信部	《车联网（智能网联汽车）产业发展行动计划》 ^[35]	明确形成深度融合、创新活跃、安全可信、竞争力强的车联网产业新生态
2019 年 9 月	中共中央、国务院	《交通强国建设纲要》 ^[36]	加强智能网联汽车（智能汽车、自动驾驶、车路协同）研发，形成自主可控完整的产业链
2020 年 2 月	国家发展和改革委员会、工信部、科技部等 11 个部委	《智能汽车创新发展战略》 ^[37]	提出到 2025 年智能交通系统和智慧城市相关设施建设取得积极进展，车用无线通信网络（LTE-V2X 等）实现区域覆盖，新一代车用无线通信网络（5G-V2X）在部分城市、高速公路逐步开展应用
2020 年 3 月	工信部	《关于推动 5G 加快发展的通知》 ^[38]	提出促进“5G+车联网”协同发展
2020 年 8 月	交通运输部	《关于推动交通运输领域新型基础设施的指导意见》 ^[39]	提出打造融合高效的智慧交通基础设施，完善行业创新基础设施，重点提到了助力 5G 等信息基础设施建设
2020 年 10 月	国务院办公厅	《新能源汽车产业发展规划（2021—2035 年）》 ^[40]	明确将推动新能源汽车与能源、交通、信息通信全面深度融合，以及协调推动智能路网设施建设，包括建设支持车路协同的无线通信网络及推进智能化道路基础设施建设
2021 年 11 月	工信部	《“十四五”信息通信行业发展规划》 ^[41]	推动 C-V2X 网络建设、在主要城市道路的规模化部署、在部分高速公路路段试点应用，加速车联网终端用户渗透

城市等统筹建设，加快在主要城市道路的规模化部署，探索在部分高速公路路段试点应用；协同汽车、交通等行业，加速车联网终端用户渗透。

4.2 行业组织积极推进车联网互联互通测试及产业成熟

IMT-2020 (5G) 推进组 C-V2X 工作组等行业组织，近几年持续组织 C-V2X 互联互通应用实践活动，加快验证中国 C-V2X 全协议栈标准的有效性，促进 C-V2X 产业各环节协同研发和测试，为推动国内 C-V2X 大规模应用部署和产业生态体系构建奠定基础。2018 年起连续举办的“三跨”“四跨”等 C-V2X 互联互通应用实践活动见表 3。

4.3 先导性应用助力探索技术成熟和模式创新

工信部、公安部、交通运输部等协同推动跨部门合作与部省合作，支持车联网示范区、先导区建设，在城市、高速等不同场景规模化部署车联网基础设施，推广车联网应用落地。目前工信部已批复支持江苏（无锡）、天津（西青）、湖南

（长沙）、重庆（两江新区）创建国家级车联网先导区，结合创建城市自身的特点，将在高速公路、城市道路等不同道路环境规模部署 C-V2X 网络，并结合 5G 和智慧城市建设，完成重点区域交通设施车联网功能改造和核心系统能力提升，丰富车联网应用场景，带动全网规模部署，建立健康可持续的建设和运营模式，构建开放融合、创新发展的产业生态。国内其他城市，如广东广州、广西柳州、四川成都、安徽合肥、浙江德清等地，也在积极地筹备建设过程当中。截至 2021 年 7 月，全国共开放 3 500 多千米测试道路，道路测试总里程超过 700 万千米。

国内的企业也积极探索 C-V2X 的技术落地与模式创新，开展了一系列商用实践活动。从出行服务到货物运输、干线物流、无人配送、矿山重载等，应用规模逐渐扩大。例如，中国信息通信科技集团有限公司的大唐高鸿公司与中国交通建设股份有限公司联合在 G5021 石渝高速进行了全



表3 C-V2X 互联互通应用实践活动

时间	活动	测试内容	参与单位
2018 年	“三跨”	世界首例“跨通信模组（芯片）、跨终端提供商、跨整车厂商”的互联互通应用示范	3 家通信模组厂商、8 家 LTE-V2X 终端提供商、11 家中外整车企业共同参与
2019 年	“四跨”	“跨芯片模组、跨终端、跨整车、跨安全平台”的 C-V2X 应用展示	26 家整车企业、28 家终端设备和协议栈厂商、10 家芯片模组厂商、6 家安全解决方案提供商、2 家 CA 提供商平台共同参与
2020 年	“新四跨”暨大规模先导应用示范活动	规模应用环境下的性能和应用功能测试，并增加了高精度地图和高精度定位等新元素	40 余家国内外整车企业、40 余家终端提供商、10 余家芯片模组厂商、20 余家信息安全企业、5 家图商及 5 家定位服务提供商等共同参与
2021 年	C-V2X 先导应用实践活动（沪苏锡、武汉、柳州）	依托长三角地区、武汉地区、柳州地区已建成的智能化基础设施和车路云协同平台环境，验证面向商业化应用的行车安全预警、信号灯信息提示等连续场景，验证路侧感知赋能智能驾驶（协作式变道、协作式匝道汇入）等应用场景	沪苏锡活动有 20 余家国内外整车企业、近 30 家终端提供商、近 10 家芯片模组厂商、近 10 家信息安全企业、10 余家自动驾驶企业等参与；武汉、柳州活动预计共有将近百家企业参与

路网的车路协同示范改造，成为全球首条已建成并实际运营的 C-V2X 复杂高速公路。基于 C-V2X 的车路协同实现了多维的交通运行数字感知应用、行车主动安全应用、路运一体化协同应用、车路协同高精度定位应用和应急指挥调度应用，为提升道路行车安全、通行效率提供了有力支撑。再如，中国信息通信科技集团有限公司的大唐移动和厦门市交通运输局、厦门市公交公司联合建设了厦门快速公交系统（bus rapid transit, BRT）智能网联车路协同系统。厦门 BRT 是国内第一条面向商用的车路协同智慧公交，利用 C-V2X 与 5G 技术，提供了超视距防碰撞、精准停靠、最优车速行驶、路口盲区检测等多项特色应用，能够有效降低油耗 15% 左右，提高车辆行驶安全及交通效率。

4.4 地方政府积极出台车联网发展利好政策

在国家政策指导下，各地结合自身发展需求和产业条件出台了积极推进车联网发展的政策。例如，江苏省编制形成江苏省车联网产业发展重点任务分解表（2020—2021 年），明确了推动车联网产业发展的行动指南；天津市发布车联网（智能网联汽车）产业发展行动计划，提出加快 LTE 网络升级改造和 5G 规模化部署，提升 LTE-V2X 网络覆盖水平，建设基于 LTE-V2X 无线通信关键技术车联网服务平台。北京市发布《北京市智能网联汽车创新发展行动方案（2019 年—2022 年）》，

提出部署智能路网试点改造工程，规划建设卫星地面增强站、LTE-V2X、NR-V2X 路侧单元。另外，长沙市发布智能汽车产业“火炬计划”和“头羊计划”、广州市发布广州市加快推进数字新基建发展三年行动计划、四川省发布《关于推进智能网联汽车产业发展的通知》，河北、上海、湖北武汉、浙江德清、广东深圳等其他省市地区也发布了与车联网相关的推进政策。

4.5 “5G+车联网”的新基建，探索“聪明的车”“智慧的路”“协同的云”发展模式

在路侧，截至 2021 年 10 月底，江苏（无锡）、天津（西青）、湖南（长沙）、重庆（两江新区）4 个车联网国家级先导区在 700 余千米的高速和城市道路上，再加上其他城市，共计部署了 4 000 余台 RSU，在全国其他城市也有不同程度的部署。同时，中国信息通信研究院正在积极建设车联网基础设施状态统计平台，汇聚国内各车联网示范区、先导区及高速公路沿线中已经建设运营的车联网 C-V2X 基础设施的统计数据，周期性汇总形成报表，支撑国家级车联网先导区创建相关工作的开展。

在车端，新车前装 C-V2X 在 2020 年开始提速。到 2021 年上半年，已有十多家车企宣布 C-V2X 量产车型计划，包括一汽红旗、上汽通用、上汽奥迪、福特汽车、长城汽车、广汽、北汽、吉利、蔚来等。业界预测，2025 年，C-V2X 的新

车搭载率将达到 50%^[42]。

建设“5G+C-V2X”新型基础设施,将助力解决车联网车载终端渗透率低、路侧基础设施建设和运营模式不清晰等一系列问题,为中国发展智能驾驶和智慧交通,探索出一条具有中国特色的“聪明的车”“智慧的路”“协同的云”的发展模式。

5 结束语

本文以分析车联网的通信需求与挑战为基础,介绍了 C-V2X 系统架构与核心关键技术,以及国际、国内技术标准演进。针对基于 C-V2X 的车车协同和车路协同在智慧交通和智能驾驶领域的应用,分析其在信息感知、网联智能和成本方面的优势,以及从重点提升道路安全和交通效率逐步向自动驾驶应用演进的发展趋势。最后,介绍了国家及地方政策、先导应用与示范验证,并展望中国发展智慧交通和智能驾驶之路:将积极推进“5G+车联网”新型基础设施建设,探索基于车联网的“聪明的车”“智慧的路”“协同的云”的车路云协同发展模式。

鸣谢:

本文作者特别感谢大唐高鸿赵锐博士、中国信息通信研究院林琳博士对本文提出的宝贵建议。

参考文献:

- [1] 3GPP. Service requirements for V2X services: TS 22.185, v14.4.0[S]. 2018.
- [2] CHEN S Z, HU J L, SHI Y, et al. LTE-V: a TD-LTE-based V2X solution for future vehicular network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(6): 997-1005.
- [3] CHEN S Z, HU J L, SHI Y, et al. A vision of C-V2X: technologies, field testing, and challenges with Chinese development[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(5): 3872-3881.
- [4] 陈山枝, 胡金玲, 时岩, 等. LTE-V2X 车联网技术、标准与应用[J]. 电信科学, 2018, 34(4): 1-11.
CHEN S Z, HU J L, SHI Y, et al. Technologies, standards and applications of LTE-V2X for vehicular networks Chinese Full Text[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(4): 1-11.
- [5] 陈山枝, 时岩, 胡金玲. 蜂窝车联网(C-V2X)综述[J]. 中国科学基金, 2020, 34(2): 179-185.
- CHEN S Z, SHI Y, HU J L. Cellular vehicle to everything (C-V2X): a Review Chinese full text[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(2): 179-185.
- [6] 中国汽车工程学会. 合作式智能运输系统车用通信系统应用层及应用数据交互标准: China SAE T/China SAE 53-2017[S]. 2017.
China Society of Automotive Engineers. Application layer and application data interaction standard of vehicle communication system in cooperative intelligent transportation system: China SAE T/China SAE 53-2017[S]. 2017.
- [7] 3GPP. Enhancement of 3GPP support for V2X scenarios: TS 22.186, v16.2.0[S]. 2019.
- [8] 3GPP. Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services: TR 22.886, v16.2.0[S]. 2018.
- [9] 陈山枝, 胡金玲, 赵丽, 等. 蜂窝车联网(C-V2X)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2020.
CHEN S Z, HU J L, ZHAO L, et al. Cellular vehicle-to-everything (C-V2X)[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2020.
- [10] 大唐电信副总裁陈山枝: 未来积极推动 LTE-V 标准[EB]. 2013.
Datang Telecom vice president Chen Shanzhi: actively promote LTE-V standard in the future[EB]. 2013.
- [11] FCC modernizes 5.9 GHz band to improve Wi-Fi and automotive safety, FCC[EB]. 2020.
- [12] 3GPP. New SI proposal: feasibility study on LTE-based V2X services: RP-150778[Z]. 2015.
- [13] 3GPP. New WID on 3GPP V2X phase 2: RP-170798[Z]. 2017.
- [14] 3GPP. New SID: study on NR V2X: RP-181429[Z]. 2018.
- [15] 3GPP. Architecture enhancements for V2X services: TS 23.285, v14.9.0[S]. 2015.
- [16] 3GPP. Architecture enhancements for 5G system (5GS) to support vehicle-to-everything (V2X) services: TS 23.287, v16.2.0[S]. 2020.
- [17] 3GPP. Physical channels and modulation: TS 36.211, v15.3.0[S]. 2018.
- [18] 3GPP. Physical layer procedures: TS 36.213, v14.6.0[S]. 2018.
- [19] 3GPP. Medium access control (MAC): TS 36.321, v14.4.0[S]. 2018.
- [20] 3GPP. Overall description of radio access network (RAN) aspects for vehicle-to-everything (V2X) based on LTE and NR: TR 37.985, v1.3.0[S]. 2020.
- [21] 3GPP. Physical layer procedures for control: TS 38.213, v16.1.0[S]. 2020.
- [22] 3GPP. Physical layer procedures for data: TS 38.214, v16.1.0[S]. 2020.
- [23] 3GPP. Medium access control (MAC): TS 38.321, v16.0.0[S]. 2020.
- [24] 3GPP. Radio resource control (RRC): TS 36.331, v14.6.0[S]. 2018.
- [25] 3GPP. Radio resource control (RRC): TS 38.331, v16.0.0[S]. 2020.
- [26] 林琳, 李璐, 葛雨明. 车联网通信标准化与产业发展分析[J]. 电信科学, 2020, 36(4): 15-26.
LIN L, LI L, GE Y M. Analysis of the communication standardization and industry development of Internet of vehicles Chinese Full Text[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(4): 15-26.
- [27] SAE J3016. Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles [S]. 2021.



- [28] WISCH M, HELLMANN A, LERNER M, et al. Car-to-car accidents at intersections in Europe and identification of use cases for the test and assessment of respective active vehicle safety systems[C]//Proceedings of the 26th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). [S.l.:s.n.], 2019: 1-27.
- [29] National Highway Traffic Safety Administration. Traffic safety facts annual report tables[R]. 2018.
- [30] ABUELSAMID S. C-V2X is finally gaining momentum in the U.S.[EB]. 2021.
- [31] WANG X S, QIN D M, CAFISO S, et al. Operational design domain of autonomous vehicles at skewed intersection[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021(159): 106241.
- [32] TIENTRAKOOL P, HO Y C, MAXEMCHUK N F. Highway capacity benefits from using vehicle-to-vehicle communication and sensors for collision avoidance[C]//Proceedings of 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [33] 王志勤. 车联网支持实现无人驾驶的思考[J]. 人民论坛·学术前沿, 2021(4): 49-55.
WANG Z Q. Thinking on the realization of driverless driving through the Internet of Vehicles Chinese full text[J]. Frontiers, 2021(4): 49-55.
- [34] 工业和信息化部关于印发《车联网（智能网联汽车）直连通信使用 5905-5925 MHz 频段管理规定（暂行）》的通知[EB]. 2018. Ministry of Industry and Information Technology on the issuance of “Telematics (intelligent network-connected vehicles) directly connected communications using 5905-5925 MHz frequency band management regulations (provisional)”[EB]. 2018.
- [35] 工业和信息化部印发《车联网（智能网联汽车）产业发展行动计划》[EB]. 2018. Ministry of Industry and Information Technology on the issuance of “Action plan for the development of telematics (intelligent networked vehicles) industry”[EB]. 2018.
- [36] 中共中央国务院印发《交通强国建设纲要》[EB]. 2019. CPC Central Committee and State Council on the issuance of “The outline of the construction of a strong transportation country”[EB]. 2019.
- [37] 智能汽车创新发展战略[EB]. 2020. Smart car innovation development strategy[EB]. 2020.
- [38] 工业和信息化部关于推动 5G 加快发展的通知[EB]. 2020. Notice of the Ministry of Industry and Information Technology on promoting the accelerated development of 5G[EB]. 2020.
- [39] 交通运输部关于推动交通运输领域新型基础设施建设的指导意见[EB]. 2020. Guidance from the Ministry of Transport on promoting new infrastructure construction in the transport sector[EB]. 2020.
- [40] 国务院办公厅关于印发新能源汽车产业发展规划（2021—2035 年）的通知[EB]. 2020. Notice of the General Office of the State Council on the issuance of the new energy vehicle industry development plan (2021-2035)[EB]. 2020.

- [41] 工业和信息化部关于印发“十四五”信息通信行业发展规划的通知[EB]. 2021.

Notice of the Ministry of Industry and Information Technology on the issuance of the “14th five-year plan” for the development of the information and communication industry[EB]. 2021.

- [42] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 2.0[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.

China Society of Automotive Engineers. Energy saving and new energy vehicle technology roadmap 2.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2021.

[作者简介]



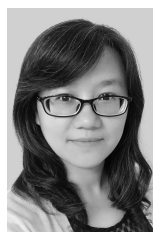
陈山枝（1969—），男，博士，中国信息通信科技集团有限公司（CICT）副总裁、专家委员会主任，无线移动通信国家重点实验室主任，教授级高级工程师、博士生导师，国家杰出青年科学基金获得者，IEEE Fellow，中国电子学会会士，中国通信学会会士。负责 5G 移动通信、C-V2X 车联网技术与标准

研究及产业化工作。曾获得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。主要研究方向为 B5G 和 6G、车联网、卫星移动通信等。



葛雨明（1985—），男，博士，中国信息通信研究院车联网与智慧交通研究部主任，中国信息通信研究院车联网创新中心（成都）有限公司总经理，工业和信息化部“车联网技术创新与测试评价”重点实验室副主任，高级工程师，中央和国家机关青年联合会第一届委员会委员，IMT-2020（5G）推进组

C-V2X 工作组组长、中国通信标准化协会车联网子组组长、全国汽车标准化技术委员会智能网联汽车分技术委员会委员、中国公路学会自动驾驶工作委员会常务委员、UN/WP.29 GRVA 专家等。曾获中国通信标准化协会科学技术奖二等奖、三等奖。主要研究方向为车联网、智慧交通领域的相关政策、产业、标准和前沿技术。



时岩（1975—），女，博士，北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室副教授、博士生导师，主要研究方向为车联网、移动边缘计算关键技术及车路协同应用。