

---

# 车路协同 C-V2X 关键技术演进<sup>a</sup>

郭荣斌<sup>1</sup>, 朱永东<sup>1</sup>, 朱凯男<sup>1</sup>, 吴迎笑<sup>1</sup>, 王金鹏<sup>1</sup>, 单杭冠<sup>2</sup>, 赵志峰<sup>1</sup>

(1.之江实验室, 杭州 311121; 2.浙江大学, 杭州 310027)

**摘要:** 车联网 (Vehicle to everything, V2X) 作为新型信息基础设施建设的重要组成部分, 为未来交通的智能化、网联化提供了技术支持。基于蜂窝车联网 (C-V2X) 的车路协同技术具备低时延、高可靠的通信特点, 已成为国际主流的车联网通信标准。随着移动通信技术的发展, 为满足高级自动驾驶应用需求, C-V2X 正在从 LTE-V2X 演进到 NR-V2X。本文从系统架构、资源调度、车联网安全几个角度总结了当前车联网的研究现状, 并针对车联网技术演进, 重点介绍边缘计算、群体智能、内生安全、数字孪生等相关前沿技术, 展望了蜂窝车联网技术和应用的未来发展方向。

**关键词:** 车联网; 资源优化调度; 边缘计算; 内生安全; 群体智能; 数字孪生。

## Key technology evolution of road-car collaboration with C-V2X

Rongbin Guo<sup>1</sup>, Yongdong Zhu<sup>1</sup>, Kainan Zhu<sup>1</sup>, Yingxiao Wu<sup>1</sup>, Jinpeng Wang<sup>1</sup>,  
Hangguan Shan<sup>2</sup> and Zhifeng Zhao<sup>1</sup>

(Zhejiang Laboratory, Hangzhou 311121, China; 2. Zhejiang University of XX, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** As an important part of the construction of new information infrastructure, the vehicle to everything (V2X) network provides technical support for intelligent and networked transportation in the future. Vehicle-road collaboration technology based on cellular V2X (C-V2X) can provide low latency and high reliability communication capability, and has become the international standard. With the Evolution of mobile communication technology, C-V2X is evolving from LTE (Long Term Evolution) -V2X to NR (New Radio) -V2X to realize advanced autonomous driving applications. In this article, we summarize the current research of V2X about system architecture, resource scheduling, vehicle security. In view of the evolution of V2X technology, we introduce edge computing, swarm intelligence, endogenous security and digital twins technologies, and look into the future direction of cellular V2X technology and application.

**Key words:** Vehicle to everything; resource optimal scheduling; edge computing; endogenous security; swarm intelligence; digital twin.

## 1. 引言

随着交通运输业对效率、成本、安全及智能的更高追求以及信息技术的快速发展, 汽车自动驾驶技术已成为信息技术与交通运输交叉研究的重要领域之一。由美国国际自动机工程

---

<sup>a</sup> 本论文由之江实验室科研项目 (编号 2020LC0AC01) 资助。

---

师学会 (SAE International) 所制定的 J3016 自动驾驶分级标准, 将自动驾驶技术划分为辅助驾驶 (L1)、部分自动驾驶 (L2)、条件自动驾驶 (L3)、高度自动驾驶 (L4) 和完全自动驾驶 (L5) 五个阶段。成熟的自动驾驶技术将会降低交通事故的机率, 保证驾驶员和行人的安全, 改善交通拥堵状况。

现有的自动驾驶技术可分为单车智能和车路协同两大技术路线<sup>[1]</sup>。单车智能的环境感知完全依靠车载传感器 (如激光雷达、毫米波雷达和摄像头等) 信息的输入, 然后通过人工智能技术进行环境变化预测及驾驶决策生成, 如美国的 Waymo、特斯拉、Mobileye 等公司都在一定程度上实现了 L2-L4 级的自动驾驶。但是, 在夜晚、雾天、雨雪天等恶劣天气或交叉路口、弯道等复杂交通场景中, 车载传感器的准确度和可靠性难以保证, 从而无法实现自动驾驶。此外, 激光雷达等传感器的价格也较为高昂, 市场接受度相对较低。单车自动驾驶目前仅能把人从繁重枯燥的驾驶活动中解放出来, 难以满足对交通效率和安全的提升要求。

在此背景下, 基于车联网 (Vehicle to everything, V2X) 的车路协同技术应运而生。V2X 是将车辆与一切事物相连接的新一代信息通信技术, V 代表车辆, X 代表任何与车交互信息的对象, 例如车辆、行人、路侧基础设施以及通信网络等。车联网包括了车与车之间 (Vehicle to Vehicle, V2V)、车与基础设施之间 (Vehicle to Infrastructure, V2I)、车与人之间 (Vehicle to Pedestrian, V2P)、车与网络之间 (Vehicle to Network, V2N) 的交互<sup>[2]</sup>。车联网将依托信息通信技术, 通过全方位连接和数据交互, 提供综合信息服务, 形成汽车、电子、信息通信、道路交通运输等行业深度融合的新型产业形态<sup>[3]</sup>。V2X 通信技术包括专用短程通信技术 DSRC (Dedicated Short Range Communications) 和蜂窝车联网技术 C-V2X (Cellular-V2X) 两大阵营。DSRC 技术起源于 IEEE 802.11 标准, 能够支持相邻车辆之间的行车安全数据交换。C-V2X 以蜂窝网络作为 V2X 的基础, 利用蜂窝网络连接交通运输生态系统中的所有车辆和道路基础设施。与 DSRC 技术相比, C-V2X 技术具有通信范围广、时延低与可扩展性高等优势, 同时 C-V2X 技术成本更低, 更易于实现商用部署, 有利于打破美国在 DSRC 标准上的技术垄断, 因此中国大力发展 C-V2X 技术<sup>[4]</sup>。

在 C-V2X 技术标准中, 车联网通信的空中接口包括两种, 一种是 Uu 接口, 以蜂窝基站为无线接入中心, 车辆与基础设施、其他车辆之间的数据交互都需要通过基站, 该接口提供大带宽、大覆盖的通信服务; 另一种是 PC5 接口, 用于实现车辆之间的直接数据交换, 满足低时延高可靠的通信需求。车联网需要诸多先进通信网络技术的支撑, 本文将针对 C-V2X 关键技术, 从系统架构、资源调度、车联网安全几个核心角度分析总结当前的研究现状, 并针对车联网技术演进, 重点介绍边缘计算、群体智能、内生安全、数字孪生等前沿

技术方向，以对未来车路协同中的 C-V2X 技术演进进行展望，为国家新型基础信息设施建设提供参考。

## 2. C-V2X 关键技术

### 2.1 C-V2X 系统架构

基于车路协同的 V2X 网络架构总体可分为三个层面<sup>[5]</sup>：感知层、决策层和执行层。感知层主要涉及环境感知技术和车辆定位技术，获取车辆所处位置及周围交通状态；决策层主要涉及环境变化预测技术及驾驶决策技术，即对周围人、车的运动轨迹做出预测，并相应的生成优化的驾驶决策；执行层主要是通过机械控制执行驾驶决策。如图 2.1 所示，在 V2X 网络架构中，包括了云端、边缘侧和车端，每个部分都参与智慧交通的各个环节，包括数据感知、分析仿真以及决策控制。其中云端的实时性最低，边缘侧居中，车端实时性最高。因此，对实时性要求最低的感知、分析和决策都放在云端，如道路数据、路线指标和规划等。在边缘云中进行准实时的数据融合和下发，使无人驾驶车辆获得突破视觉死角或跨越遮挡物的信息获取能力。在车端进行车辆实时控制的相关感知、策略和控制，分析计算则由云边融合控制平台完成。车联网根据应用场景上报车辆信息和交通信息到云边融合控制平台。云边融合控制平台可以跨摄像头进行交通要素轨迹跟踪，并作为系统的核心控制单元，跨域下发联动决策优化交通流运行状态。

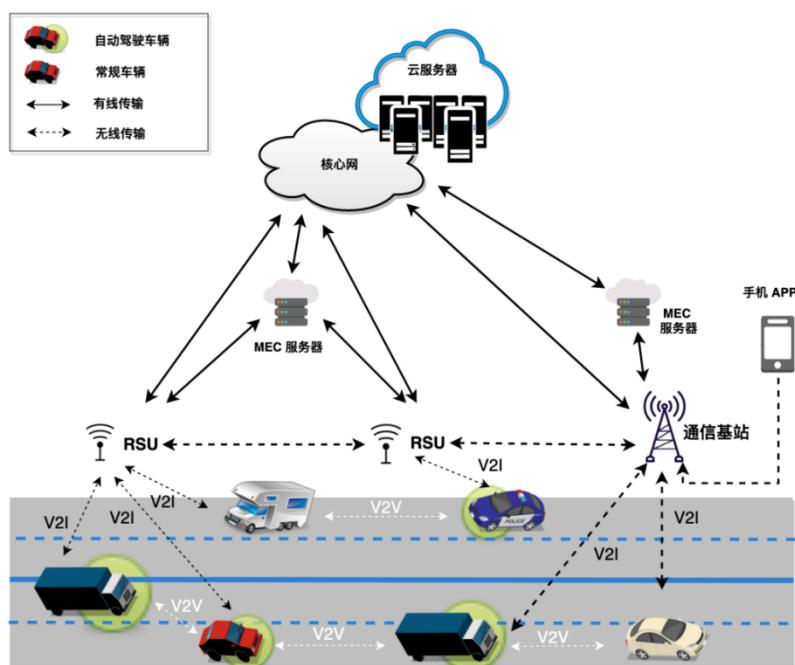


图 2.1 云边端协同 V2X 网络架构示意图

---

## 2.2 资源优化调度技术

车联网无线信道具有快速时变特性,且对网络的时延和可靠性有较高要求,需要设计能够适应快速时变和超高可靠超低时延的无线通信资源管理机制。目前已有较多车路协同中无线通信资源优化调度的研究。文献<sup>[6]</sup>在假设基站可以获取信道的慢衰落信息以及快衰落统计信息的基础上,研究了V2V链路复用V2I上行传输链路的场景。该研究限制每个V2I上行传输子信道至多被一条V2V链路重复利用,在满足V2V链路的可靠性约束的同时,提出了一种最大化V2I链路的遍历容量的资源优化分配算法。在此研究基础上,该作者又假设了精确信道信息能够在一定延迟之后被基站获取<sup>[7]</sup>。通过一阶高斯-马尔可夫模型对该延迟时间内的无线信道快衰弱进行信道建模,作者提出了一种针对最大化最小V2I用户的传输容量的资源分配算法,以满足资源分配结果的用户公平性。文献<sup>[8]</sup>进一步考虑了V2V通信之间的延迟要求以及采用不同的调制和编码的系统模型。文献<sup>[9]</sup>通过有效容量理论对V2V用户的延迟要求进行了数学建模,并在此基础上通过优化建模求解,提出了一种资源分配算法,以最大化整体V2I用户的遍历容量。

最近,学术界展开了将模式选择方法与无线资源管理策略结合的研究。文献<sup>[10]</sup>针对不同网络负载的情况,研究了联合资源分配模式选择和发射功率控制的问题。作者首先针对车联网V2V通信中安全类信息的传输,考虑了集中式与分布式两种资源分配模式。然后,作者引入了近距离通信数据分组优先级(Proximity-based services Per-Packet Priority, PPPP),建立了在最大化信息值(表示为PPPP的值与数据传输速率的乘积)的同时满足行人用户以及车辆用户最小信号干扰噪声比需求以及最大传输功率限制的数学优化模型。最后,针对不同网络负载的情况,作者提出了两种优化算法。文献<sup>[11]</sup>研究了V2V通信中的通信模式选择、功率控制和资源块分配的策略。作者考虑了在严格保证V2V通信的可靠性和时延要求的前提下,最大化V2I链路的总吞吐容量的优化目标。为了应对车联网环境的未知性,作者提出基于迁移学习的分布式强化学习模型来学习优化策略。文献<sup>[12]</sup>研究了蜂窝车联网中针对安全相关类信息传输的V2V通信的联合通信模式选择和资源分配的问题。作者首先将该问题建模成一个马尔可夫随机过程,并基于深度强化学习提出了一种分布式算法,在满足V2V用户时延和可靠性要求的约束下,最大化V2I用户的总吞吐量。然后,针对深度强化学习本地训练模型的缺陷,作者提出了一种建立在两层时间尺度上的联邦深度强化学习算法以得到高鲁棒性的训练模型。

---

随着车联网的发展,为了满足增强型车联网应用中的通信性能需求,还需要结合实际应用场景,比如车辆编队行驶,通过学习手段设计无线通信资源管理策略,进一步提升车联网通信性能。

### 2.3 车联网安全技术

车路协同中自动驾驶车辆通过无线通信技术与周围环境进行信息交互,因此实现安全可靠的通信方式对保障车联网的安全性有重大的意义。近年来,车联网安全这一研究领域得到了广泛关注。文献<sup>[13]</sup>提出了一种基于公钥架构和边缘计算的车联网通信安全保障方案。作者将车辆以及 RSU 的位置信息作为密钥对分发的参考依据,从而可以根据对车辆位置的预测进行密钥预分发。为了预测车辆的位置,作者进一步提出了一种基于循环神经网络的车辆路径、位置预测方案。然而,基于公钥架构的安全保障方案需要在通信过程中进行证书的传递与验证,大大增加了网络的负载。文献<sup>[14]</sup>针对车联网中安全隐私保护的问题,提出了一种高效的匿名、批量身份认证方案,从而降低车辆和 RSU 的消息丢失率。通过引入一种消息分类算法,并允许接收者根据分类结果对消息进行身份验证,从而优先级高的消息将得到优先验证。此外,作者还提出了一种协作式身份验证机制,其中 RSU 和车辆共享经过身份验证的消息,以减少网络饱和时 RSU 的工作量。针对大多数 V2X 安全协议在车辆通信中不能完全满足轻量级和快速处理的要求这一情况,文献<sup>[15]</sup>提出了一种轻量级的隐私保护和身份认证协议。该协议采用了生物识别设备和防篡改设备,分别用以验证驱动程序和安全地保存密钥。此外,还通过本地生成伪身份和私钥来分布式执行车联网中隐私保护和身份验证的任务。

文献<sup>[16]</sup>介绍了针对车联网的 QoS 降级 (DeQoS) 攻击。通过 DeQoS,攻击者可以中继路边单元 (RSU) 与远方车辆之间的身份验证交换以建立连接,浪费了 RSU 有限的连接资源。如果虚拟连接数量足够多,RSU 的资源可能会耗尽,从而无法再为合法车辆提供服务。针对车联网中的拒绝服务攻击问题,文献<sup>[17]</sup>提出了一种基于拼图的身份验证方案。作者通过设计哈希拼图以缓解针对匿名身份验证过程的 DoS 攻击。文献<sup>[18]</sup>提出了车联网中一种采用区块链技术的基于信任的位置隐私保护方案。作者通过分析匿名隐形区域构建过程中请求载体和协作载体的不同需求,设计了基于 Dirichlet 分布的信任管理方法。此外,通过使用区块链,还提出了一种数据结构,在公共可用的区块上及时记录车辆的可信性,以便任何车辆在必要时都可以访问交易对手的历史信任信息。最后给出了匿名隐身区域的构建过程。

---

由于车联网中通信环境的复杂性,安全攻击手段多种多样。单一的安全攻击检测与抗安全攻击策略不能有效地保障车联网中安全可靠的通信方式。因此,在未来融合强化学习、元学习、联邦学习等机器学习和人工智能方法,高效甄别攻击类型,建立安全传输通道是值得研究的方向。

### 3 C-V2X 技术演进

在未来,自动驾驶服务对多维综合信息的需求日益提高,任何单一维度上的网络信息服务已经无法满足全方位的需求。智慧交通需要实现未来一体化车联网通信的超低时延(边缘计算)、超高可靠性(内生安全)、协同控制(群体智能)。车联网技术在未来智慧交通领域的应用十分值得期待。随着 C-V2X 技术的发展,在未来车联网中,通信网络、计算网络和交通网络有机融合,使得数字孪生成为可能。每个交通要素同时也是通信基本单元,通信、计算和交通要素融合在一起,组成了复杂灵活多元异构的智慧交通网络,结合无处不在的云-边-端计算能力,为交通信息化、网络化、智能化提供动能。

#### 2.1 边缘计算技术

如前所述,由于单一车辆的感知范围严重受限,传统的以车辆为中心的自动驾驶技术存在很大的局限性,基于边缘计算的车路协同技术应运而生。车辆通过同其他车辆、行人或路边单元进行实时信息交互,能够扩大感知范围,避免视野盲区,提高自动驾驶的性能。例如,当遇到障碍物遮挡时,传感器无法感知前方的路况,而通过 V2V 通信和 V2I 通信,车辆可以从其他车辆或边缘侧获知前方的信息,从而做出正确的决策。另一方面,车端平台需要消耗车辆大量的计算与存储能力,这对车辆本身资源与能耗带来不小的挑战。边缘侧计算单元的存在,允许车辆将一些计算任务卸载至路侧单元甚至云端完成,从而降低了自身资源需求与能耗。边缘服务器可以通过汇聚大量车辆的数据做出局部统筹决策,在满足单车自动驾驶任务需求的同时,还能提高道路整体的车辆通行效率。综上所述,边缘计算为车联网实时性架构、资源管理等问题提供了更灵活有效的解决思路。

在车辆边缘计算(vehicle edge computing, VEC)系统中,一些具有多余计算资源的车辆可以为其他车辆或行人提供卸载任务的机会。然而车载网络具有快速变化的信道状态和计算负荷。这些动态因素很难建模或预测,但是它们对任务分流的服务质量(QoS)产生重大影响,包括延迟性能和服务可靠性。为了提高系统的 QoS 并充分利用车辆的大量空余计算资源,文献<sup>[19]</sup>借助强化学习中的组合多臂老虎机(CMAB)理论,提出了一种基于学习的任务复制算法(LTRA),来使得系统平均卸载延迟最小化。LTRA 使多辆车可以同时处理同

---

一任务的副本，需要计算服务的车辆可以在卸载任务时了解其他车的延迟性能。文献<sup>[20]</sup>在充分利用车辆移动信息的基础上，研究分析了车联网中的联合缓存分配和内容放置问题，来最大化全局内容的成功下载概率。文献<sup>[21]</sup>首先回顾了 VEC 中任务分流的技术现状，指出移动性不仅仅是 VEC 中计算的障碍，还可以改善延迟性能。随后，该文献将机器学习和编码计算确定为解决和利用 VEC 移动性的关键技术，并提供具体案例来说明如何调整学习算法以适应 VEC 中的动态环境。

边缘计算技术可以构建面向车联网应用与典型场景业务需求的架构，实现高效合理地管理车云资源，为车辆用户提供低时延高可靠的服务，因此是 C-V2X 中必不可少的技术。

## 2.2 内生安全技术

车联网业务的多样化、差异化、情境化对通信网络的承载能力带来了新的挑战，为突破先前通信系统的局限性，将基于软件定义的网络切片与边缘计算，利用人工智能与大数据挖掘的技术融合革新来支持更多样化的应用场景与更高目标的性能需求，但这也导致一些网络安全问题。网络功能边缘化、软件虚拟化导致网络安全边界逐渐模糊，网络架构所引发的安全缺陷越来越凸显；边缘计算、人工智能与大数据挖掘的深度泛在融合，也使得边缘网络数据安全问题面临着前所未有的新挑战，传统的独立网络安全防护机制难以对抗潜在的泛在攻击与不确定的安全隐患。以拟态防御技术为基础，2018 年 3 月，邬江兴院士首次提出内生安全的概念<sup>[22]</sup>。内生就是靠自身构造而不是外部因素得到的内源性效应，内生安全是利用系统的架构、算法、机制、场景等内在因素获得的安全属性。文献<sup>[23]</sup>提出以“内聚而治”、“自主以生”的思想构建 6G 网络内生安全体系，从用户、基站和边缘网络三个层面，设计 6G 内生安全网络协议和组网机制，达到身份真实、控制安全、通信可靠、数据可信四个安全目标。

车联网是 5G/6G 网络最主要的应用场景之一，其网络安全问题涉及到各个层面，包括感知层、网络层和应用层的安全。现有的主要防护手段主要依托既有的防御技术，包括入侵检测、防火墙、数据隔离、数据加密、身份管理、访问控制、通信加密<sup>[24]</sup>等，这些附加型或外挂式软硬件防护设施的安全性，难以有效应对车联网软硬件发展所带来的未知安全威胁。而内生安全能有效抵御利用未知软硬件漏洞后门、系统内部已知信息等实施的安全威胁。通过内生安全自适应可以根据业务的不同安全需求，建设自主安全能力；而当系统升级换代时，安全能力能够自成长实现动态提升，从而能保证车联网提供“高可靠、高可信、高可用”的服务功能。

---

## 2.3 群体智能技术

来受到自然界中生物群体行为的启发,研究者提出了群体智能(Swarm Intelligence, SI)的概念<sup>[25]</sup>。自然界中大量个体聚集时往往能够形成协调、有序的运动场景。生物界中,水中成群游动的鱼和陆地上的羊群,都会聚集成巨大的群落,有序而整齐划一的行进或者觅食,而当遇到危险的时候,鱼群和羊群散开再聚集,展现出严密的分工和协作。这些群体现象具有协调、分布、稳定、自组织、智能涌现等特点。群体智能的系统通常由若干相互作用的简单智能体组成。虽然单个智能体的行为没有集中的智能来控制,且在局部一定程度上也是随机的,但智能体之间相互作用时会导致智能的全局行为,与单个智能体的智能涌现完全不同。相比于单体智能,群体智能系统具有更好的鲁棒性,并且往往能够以更小的代价完成更复杂的任务。

将群体智能算法应用到多车网联协同决策与控制中,通过协同驾驶控制技术,可以充分发挥系统内在优势,快速、灵活地响应任务及环境的变化,从而高效、可靠地完成驾驶任务<sup>[26-28]</sup>。群体智能理论下研究网联协同决策与控制的核心目标是通过个体层面简单规则的运动来获得系统层面的高度复杂行为。针对复杂多变的交通环境下无人驾驶车辆编队问题,文献<sup>[29]</sup>引入群体智能算法,基于鱼群效应设计了无人驾驶车辆编队控制方法。作者考虑了车辆行驶具体的行为特征,将无人驾驶车辆编队控制与鱼群行为进行类比,对编队行驶的车辆进行数学建模,并对车辆行驶轨迹、车辆速度等进行仿真验证,与传统的领航者-跟随者模式进行了对比,结果展示出了群体智能算法的优势。

## 2.4 数字孪生技术

信息技术的发展改变了人们认知世界的方式。随着对世界探索和改造的规模、尺度以及层次的不拓展,人们对越来越复杂的事物进行更加精准地观测、预测和控制。这孕育了崭新的数字孪生理论和方法。数字孪生的本质是将现实空间中的人、物、关系、过程等对象全时空一致地复现为信息空间中的数字模型(称为数字孪生体),并通过观测、分析、推演和操作数字孪生体来实现对现实对象的研究和控制<sup>[30-32]</sup>。

在基于数字孪生的车联网系统中,智能传感技术将实现物理空间中交通系统全要素在赛博空间中的完整映射<sup>[33]</sup>。智能网络技术将满足物理空间中交通系统全要素的高可靠、低时延、广连接、大带宽的通信需求,智能计算技术将实现赛博空间对物理空间中各要素的数字建模与仿真预测,智能系统技术将实现物理空间中各要素的群体协同智能控制,同时实现通

---

信网和交通网的深度融合。车辆运行、交通管理、道路养护等各个环节都将受益于数字孪生而完成智慧化升级，并最终实现“零事故、零拥堵、零排放”的智慧交通发展目标。

#### 4. V2X 标准演进

4G 通信时代已经涌现出针对车联网技术的大量研究。国际标准组织 3GPP 已在其 R14 标准版本中明确了 C-V2X 的基本概念、网络基本架构、应用场景和通信技术。在 R14 中提出车联网实现所需要的核心技术包括车用无线通信技术、高精度定位技术、高精度地图生成与更新技术、基于车路协同的自动驾驶技术、安全隐私技术、人车交互技术、交通状况全面感知技术、交通信号优化技术等。

在当前的 5G 通信时代中，C-V2X 技术持续演进，在 3GPP R15 标准<sup>[34]</sup>中，提出了增强的 5G-eV2X 标准，定义了四大类面向 5G 的车联网场景，包括高级驾驶、编队行驶、扩展传感器应用和远程驾驶。车联网将向着协同化和智能化发展，以能够满足这些应用对更低时延、更高可靠的需求。在 5G 时代，C-V2X 致力于提升交通效率和道路安全，以带来更加安全高效便捷的自动驾驶驾乘体验<sup>[35]</sup>。

目前 3GPP R16 标准即将冻结，相比于 R14/R15，R16 在车联网通信方式、侧行链路物理层增强、HARQ 重传机制、同步、资源分配、QoS 管理等方面均有提升<sup>[36]</sup>。R16 中引入侧行链路单播、组播以及相应的反馈机制，提高了物理层传输的可靠性和资源利用率。在侧行链路物理层增强方面，R16 引入信道状态信息参考信号（Channel State Information Reference Signal, CSI-RS）可以支持侧行链路 CSI 测量和反馈，进一步提升传输可靠性和频谱效率。在 HARQ 方面，C-V2X 引入侧行 HARQ 机制，可以提升侧行单播和组播传输的可靠性，并且支持将侧行 HARQ 信息反馈给基站，从而辅助基站优化侧行资源分配和可靠调度。相比 LTE-V2X 侧行同步，C-V2X 主要在同步信号块的结构和序列方面做了改进，采用了 NR Uu 的参数集（numerology），较大的 SCS 可以更好地支持低时延、高频段以及高速场景下的同步。相比 LTE-V2X 侧行资源分配，C-V2X 进行了一些改进和增强，例如引入部分带宽（Bandwidth Part, BWP）来支持不同的参数集，从而更好地支持不同类型的业务。Rel-16 NR-V2X 支持 QoS 管理，在优化资源分配、拥塞控制、设备间共存以及功率控制等流程方面具有重要的作用<sup>[37]</sup>。

#### 5 结语

本文从蜂窝车联网（C-V2X）的需求和挑战出发，针对车路协同 C-V2X 关键技术和标准，从系统架构、资源调度、车联网安全几个核心角度总结了当前的研究现状，并针对车联

---

网技术演进,重点介绍边缘计算、群体智能、内生安全、数字孪生等前沿技术方向,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、决策和控制的关键技术,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、智慧城市、智能交通等领域的技术变革和发展模式创新。

## 参考文献

- [1] LTE-V2X 车联网技术、标准与应用[J]. 陈山枝,胡金玲,时岩,赵丽.电信科学. 2018(04)
- [2] IMT-2020(5G)推进组. C-V2X 业务演进白皮书. 2019.10.
- [3] 国家车联网产业标准体系建设指南(总体要求)[J].机械工业标准化与质量,2018(08):16-21.
- [4] 蜂窝车联网(C-V2X)综述[J]. 陈山枝,时岩,胡金玲.中国科学基金,2020,34(02):179-185.
- [5] S. Chen et al., Vehicle-to-Everything (v2x) Services Supported by LTE-Based Systems and 5G,[J] IEEE Communications Standards Magazine, vol. 1, no. 2, pp. 70-76, 2017.
- [6] L. Liang, G. Y. Li and W. Xu, Resource Allocation for D2D-Enabled Vehicular Communications[J], IEEE Transactions on Communications, vol. 65, no. 7, pp. 3186-3197, July 2017.
- [7] L. Liang, J. Kim, S. C. Jha, K. Sivanesan and G. Y. Li, Spectrum and Power Allocation for Vehicular Communications With Delayed CSI Feedback[J], IEEE Wireless Communications Letters, vol. 6, no. 4, pp. 458-461, Aug. 2017.
- [8] J. Mei, K. Zheng, L. Zhao, Y. Teng and X. Wang, A Latency and Reliability Guaranteed Resource Allocation Scheme for LTE V2V Communication Systems[J], IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 17, no. 6, pp. 3850-3860, June 2018.
- [9] C. Guo, L. Liang and G. Y. Li, Resource Allocation for Low-Latency Vehicular Communications: An Effective Capacity Perspective[J], IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 37, no. 4, pp. 905-917, April 2019.
- [10] X. Li, L. Ma, R. Shankaran, Y. Xu and M. A. Orgun, Joint Power Control and Resource Allocation Mode Selection for Safety-Related V2X Communication[J], IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 8, pp. 7970-7986, Aug. 2019.

- 
- [11] H. Yang, X. Xie and M. Kadoch, Intelligent Resource Management Based on Reinforcement Learning for Ultra-Reliable and Low-Latency IoV Communication Networks[J], IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 5, pp. 4157-4169, May 2019.
- [12] X. Zhang, M. Peng, S. Yan and Y. Sun, Deep Reinforcement Learning Based Mode Selection and Resource Allocation for Cellular V2X Communications[J], IEEE Internet of Things Journal (Early Access).
- [13] H. Qiu, M. Qiu and R. Lu, Secure V2X Communication Network based on Intelligent PKI and Edge Computing[J], IEEE Network, vol. 34, no. 2, pp. 172-178, March/April 2020.
- [14] J. Tao, Y. Pei, B. Zhang, C. Hu, Y. Huo, H. Li, and Y. Lu. An efficient anonymous batch authentication scheme based on priority and cooperation for VANETs[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, no. 1, 2018.
- [15] S. A. Abdel Hakeem, M. A. Abd El-Gawad and H. Kim, A Decentralized Lightweight Authentication and Privacy Protocol for Vehicular Networks[J], IEEE Access, vol. 7, pp. 119689-119705, 2019.
- [16] A. Yang, J. Weng, N. Cheng, J. Ni, X. Lin and X. Shen, DeQoS Attack: Degrading Quality of Service in VANETs and Its Mitigation[J], IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 5, pp. 4834-4845, May 2019.
- [17] P. Liu, B. Liu, Y. Sun, B. Zhao and I. You, Mitigating DoS Attacks Against Pseudonymous Authentication Through Puzzle-Based Co-Authentication in 5G-VANET[J], IEEE Access, vol. 6, pp. 20795-20806, 2018.
- [18] B. Luo, X. Li, J. Weng, J. Guo and J. Ma, Blockchain Enabled Trust-Based Location Privacy Protection Scheme in VANET[J], IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 2, pp. 2034-2048, Feb. 2020.
- [19] Y. Sun, J. Song, S. Zhou, X. Guo and Z. Niu, Task Replication for Vehicular Edge Computing: A Combinatorial Multi-Armed Bandit Based Approach[C], 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-7.
- [20] T. Liu, S. Zhou and Z. Niu, Joint Optimization of Cache Allocation and Content Placement in Urban Vehicular Networks[C], 2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-6.

- 
- [21] S. Zhou, Y. Sun, Z. Jiang and Z. Niu, Exploiting Moving Intelligence: Delay-Optimized Computation Offloading in Vehicular Fog Networks[J], IEEE Communications Magazine, vol. 57, no. 5, pp. 49-55, May 2019.
- [22] 邬江兴. 鲁棒控制与内生安全[J]. 网信军民融合, 2018, 10(3):23-27.
- [23] 刘杨, 彭木根. 6G 内生安全:体系结构与关键技术[J].电信科学, 2020(1):11-20.
- [24] Amrita Ghosal, Mauro Conti. Security Issues and Challenges in V2X: A Survey, Computer Networks[J], Volume 169, March 2020.
- [25] R. Li, Z. Zhao, X. Xu, F. Ni and H. Zhang, The Collective Advantage for Advancing Communications and Intelligence[J], IEEE Wireless Communications. (Early Access)
- [26] H. Ma, S. Li, E. Zhang, Z. Lv, J. Hu and X. Wei, Cooperative Autonomous Driving Oriented MEC-Aided 5G-V2X: Prototype System Design, Field Tests and AI-Based Optimization Tools[J], IEEE Access, vol. 8, pp. 54288-54302, 2020.
- [27] S. Feki, A. Masmoudi, A. Belghith, F. Zarai, and M. Obaidat. Swarm intelligence - based radio resource management for V2V - based D2D communication[J]. International Journal of Communication Systems 32, no. 17 (2019): e3817.
- [28] B. Senapati, and P. Khilar. Optimization of Performance Parameter for Vehicular Ad-hoc NETWORK (VANET) Using Swarm Intelligence[J]. Nature Inspired Computing for Data Science, pp. 83-107. Springer, Cham, 2020.
- [29] 田大新, 康璐. 基于鱼群效应的无人驾驶车辆编队算法研究[J]. 无人系统技术, 2018, 1(04):62-67.
- [30] W. Ji, R. Guo, Z. Zhao, J. Zhang and Y. Zheng, Bridging the Physical, the Digital, and the Social[J], IEEE Internet of Things Magazine, vol. 2, no. 3, pp. 4-6, September 2019.
- [31] A. Fuller, Z. Fan, C. Day and C. Barlow, Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research[J], IEEE Access, vol. 8, pp. 108952-108971, 2020.
- [32] 杨林瑶, 陈思远, 王晓,等. 数字孪生与平行系统:发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11).
- [33] X. Chen, E. Kang, S. Shiraishi, V. M. Preciado, and Z. Jiang, Digital behavioral twins for safe connected cars[C], in Proc. 21th ACM/IEEE Int. Conf. Model Driven Eng. Lang. Syst. MODELS, 2018, pp. 144–153.

- 
- [34] 3GPP 22.185 Service requirements for V2X services; Stage 1, V15.0.0, 2018.6.
- [35] 3GPP 22.886 Study on enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services V16.2.0, 2018.12.
- [36] 3GPP 23.285 Architecture enhancements for V2X services, V16.0.0, 2019.3.
- [37] 3GPP 23.287 Architecture enhancements for 5G System (5GS) to support Vehicle to Everything (V2X) services, V1.1.0, 2019.7.