

C-V2X 与智能车路协同技术的深度融合

Deep Integration of C-V2X and Intelligent Vehicle-Infrastructure Cooperative Systems

张杰 /ZHANG Jie

(大唐高鸿数据网络技术股份有限公司, 北京 100083)
(Gohigh Data Networks Technology CO., LTD., Beijing 100083, China)



摘要: 智慧交通已经发展到智能车路协同(i-VICS)阶段, 车用无线通信(V2X)是i-VICS的重要支撑技术, 可以支撑车路间的实时信息交互。介绍了蜂窝-V2X(C-V2X)采用的关键技术及其后续演进方向, 描述了通信技术发展如何推动i-VICS架构演进, 展望了i-VICS下一步的演进方向并分析了对通信技术的演进要求, 最后给出了高速、城市、园区等典型场景下的车路协同部署建议。

关键词: C-V2X; i-VICS; 智能网联汽车

Abstract: Intelligent transportation has developed to the stage of intelligent Vehicle-Infrastructure Cooperative Systems (i-VICS). Vehicle to Everything (V2X) is an important supporting technology of i-VICS, which can support real-time information interaction between vehicles and infrastructures. The key technologies adopted by cellular-V2X (C-V2X) and its evolution are introduced in this paper, and how the development of communication technology promotes the evolution of i-VICS is described. Meanwhile the possible evolution of i-VICS is concluded, and the requirements of communication technology are analyzed. Finally, some suggestions on the deployment of i-VICS in the typical scenarios such as highway, city and park are proposed.

Keywords: C-V2X; i-VICS; intelligent connected vehicle

DOI: 10.12142/ZTETJ.202001005

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200213.0812.004.html>

网络出版日期: 2020-02-13

收稿日期: 2019-12-22

1 智能车路协同关键技术

交通是人类经济和社会发展的命脉, 一套高效的出行和货物运输系统将极大地促进一个地区的经济发展。20世纪50年代以来, 人们在不断探索交通的智能化, 希望通过利用检测、计算、通信、控制等一系列先进技术来构建一个实时、准确、高效、与运输需求高度匹配的综合交通运输系统。

智能交通系统发展分为4个阶

段^[1]: 第1个阶段是通过基础设施、公共交通建设提升道路等级和路网容量; 第2个阶段是利用行政管控手段提高效率, 减少拥堵; 第3个阶段是利用新能源技术发展绿色交通; 第4个阶段是利用智能车路协同(i-VICS)技术(简称为车路协同技术), 提高交通容量和出行效率, 构建按需出行系统, 挖掘和预测交通出行系统的时空规律, 优化交通网络及车辆的部署和运行。

车路协同技术将交通系统中的人

(出行者)、车(运载工具)、路(道路基础设施)、云(交通管控中心)有机地结合起来, 保障通行安全, 提升通行效率。在车路协同系统中, 所有的交通要素的状态信息都实施了数字化采集, 同时通过移动通信技术进行快速交换。交通参与者可以根据交互的信息进行协同, 交通管控中心则对收集到的海量信息进行大数据分析提取, 从而进行全局交通管控。车路协同技术还改变了传统的道路运营商的服务模式, 从简单的交通基础设施

提供商向道路出行服务提供商转变,通过基于场景的信息采集和分析,实现服务的个性化、柔性化。

车路协同系统包括4个关键技术:车用无线通信(V2X)技术、路侧全域感知技术、高精度定位技术、分级云控技术。

(1) V2X 技术。

协同的前提是交通要素间快速、准确的信息交换,因此一个超可靠低时延的车路间泛在通信系统是车路协同的基础。车辆的实时状态信息(如工作状态、运行参数、告警信息、行驶意图)要通过车路通信网络传输到路侧,并经过脱敏、抽象等处理后传送给云控中心。同样,道路基础设施的信息(如电子标牌、信号灯状态、地图)、路侧感知到的交通参与者信息、交通事件(如拥堵、遗洒、施工)、交通管理部门的管控指令(如限速、禁行、交通管制)也要通过车路通信网络传输到车侧,供车辆的驾驶行为决策使用。

V2X 是将车辆与一切事物相连接的新一代信息通信技术。V2X 技术可以保障 100 ms 以内的传输时延,不依赖基站覆盖进行直连通信,提供高效的广播机制,是一种非常适合车路间通信的技术。

在 V2X 通信技术的支持下,车辆可以快速获得周边车辆和道路的状态信息,从而支持车辆行驶路径的动态规划,达到避免碰撞、快速通行的目的,实现交通的局部协同。云控中心则可以实时获得全时空动态交通信息,进而支持交通的全局管控。

目前,国际上主流的 V2X 技术有电气和电子工程师协会标准(IEEE 802.11p)和蜂窝车用无线通信(C-V2X)2条技术路线。和 IEEE 802.11p 相比,C-V2X 有2方面的优势^[2]:用户间干扰小,支持并发用户

数更多;有效通信距离大,可以给驾驶员提供更长的刹车反应时间。

(2) 路侧全域感知技术。

随着传感技术的发展,传统的交通系统检测方法和手段也得到了很大提升。除了可以继续利用图像处理技术进行交通事件识别,利用气象传感技术进行气象事件识别,利用线圈、雷达技术进行交通流量统计外,还可以利用激光雷达、雷视一体机等先进的感知手段进行交通参与者的目标识别与跟踪。

在 V2X 技术的支持下,浮动车技术将成为路侧传感的有效补充。公共车辆(如公交车、出租车、交警车辆、道路养护车辆)上可加装感知设备,对交通状态信息进行采集,并通过 V2X 技术实时汇聚到路侧,与路侧直接感知到的信息进行融合。此外,随着 V2X 车载设备渗透率的不断提高,已安装车载设备车辆的状态信息也可以通过 V2X 准确获得,与传感器采集的信息相互印证。

随着多种感知设备的使用,不同设备感知结果之间的同步和去重成为新的研究课题,这催生了基于边缘计算的全域感知融合技术,最终将实现交通物理系统的数字孪生,并为局部交通协同和全局交通管控提供支撑。

(3) 高精度定位技术。

高精度定位技术是实现车路协同的基础,在获取车辆准确位置的基础上,才能提供各种安全预警应用和个性化的交通信息服务。为了获得全时空连续的高精度定位,往往需要对多种定位技术进行组合,如开阔地带使用基于差分信息增强的全球导航卫星系统(GNSS)定位,GNSS 短暂丢失时使用惯性导航定位,道路标志标线条件较好时使用即时定位与地图构建(SLAM)定位,隧道和地下空间内使用基于无线通信的定位等。

对于交通的局部协同,高精度定位可以更精准地描述周边交通参与者和道路的具体位置,帮助车辆规划行驶路径。对于交通的全局控制,高精度定位可以更精细地刻画交通流特性,实现交通的实时监控和车流的实时诱导。

除了对车辆的高精度定位外,我们还可以对道路基础设施进行高精度定位监测控制,以预测重点基础设施的形变、移动,及时采取养护措施,保证道路的通行能力。

(4) 分级云控技术。

车路协同的目标是实现局部交通的快速协同和全局交通的综合管控,这就要求部分信息在本地快速处理,并快速通知到周边车辆,也就是边缘云控;部分信息要汇聚到云控中心进行全局数据分析和全局的交通流管控,也就是中心云控。

边缘云控利用移动边缘计算(MEC)技术将计算、决策能力向网络边缘进行迁移,实现局部交通协同的分布式、本地化部署,进而可以通过 V2X 技术为区域内行驶的车辆提供低时延车路协同服务。采用 MEC 技术,可以将敏感数据或隐私信息控制在区域内部,同时降低回传网络的负载压力。通过边缘计算和 V2X 技术的联合部署,可以实现安全预警、车速引导、信号协同、动态高精度地图制作与播发、车辆感知能力补充、危险驾驶行为提醒、多车行驶路径协同等边缘云控应用。

中心云控则对 V2X 网络收集汇总得到的交通数据进行大数据分析,通过云控平台强大的计算和存储能力,洞察交通数据间的潜在因果关系,为交通管控决策和流程优化提供数据支撑。同时,利用大数据技术的加工能力,挖掘车辆在具体交通场景下的个性化信息需求,结合 V2X 的快速通信能力为车辆实现场景化的增值服务。通过

中心计算和 V2X 技术的联合部署,可以实现交通事故的分析与预测、交通流量的动态预测、出行需求的预测与运力匹配、道路管理策略的远程配置、个性化信息服务等中心云控应用。

2 C-V2X 关键技术及后续演进

C-V2X 技术最早被称为长期演进 (LTE)-V2X 技术,由第三代合作伙伴计划 (3GPP) 制订,在蜂窝技术基础上优化而来,后续将演进到新空口 (NR)-V2X 技术。业界将 LTE-V2X 和 NR-V2X 统称为 C-V2X。C-V2X 提供了 2 种通信接口,分别称为 Uu (基站与终端间的通信) 接口和 PC5 (直连通信) 接口,2 种接口相互结合,彼此支撑,共同用于 V2X 业务传输。无论是否有基站覆盖,2 种接口都可提供相应的通信服务。

(1) R14: LTE-V2X。

在 R14 的标准中,PC5 接口的设计以 LTE-设备到设备 (D2D) 技术为基础。在物理层设计上,C-V2X 采用了增加导频密度的方法来增强信道估计性能,以应对车辆高速移动带来的多普勒频移和 5.9 GHz 频率带来的频偏;改进了控制信息和数据信息传输方式来提升半双工模式下的系统容量。在媒体接入控制 (MAC) 层设计上,C-V2X 提供了 2 种选择:基于基站调度的模式 3 和终端自主感知分配资源的模式 4。由于 V2X 消息具有周期性发送的特点,基站调度时可以使用半静态调度 (SPS) 的方式来节省调度开销,周边车辆还可以根据调度信息来预测未来资源的使用状况,从而更加准确地选取传输资源。此外,针对事件触发消息,基站还支持动态资源调度,以提供快速资源分配。车辆很可能在没有基站覆盖的地方行驶,因此不依赖基站的增强用户感知资源分配方法也是必不可少的一项技术。

该技术通过测量估计信道使用状况;通过读取资源调度信息,利用 SPS 特性对未来的资源使用做出预测并进行避让;结合不同数据的优先级,保证优先级较高的数据优先发送。在后续的演进中,C-V2X 还将引入单播通信机制,支持更多的频谱资源,采用反馈机制增加传输可靠性,采用高阶调制、多输入多输出 (MIMO)、polar 码等技术获得更好的物理层性能。

Uu 接口的设计在现有 LTE 技术上进行了功能增强。上行传输支持基于业务特性的多路 SPS,在保证业务传输高可靠性的前提下大幅缩减上行调度时延。下行传输针对 V2X 的广播机制支持低时延的单小区点到多点传输和多播/组播单频网络。C-V2X 还引入了核心网元本地化部署、多接入边缘计算技术,以缩短端到端网络时延。

(2) R15: LTE-eV2X。

C-V2X 的 R15 版本是个小版本,引入了 2 项关键技术,64 正交振幅调制 (QAM) 和载波聚合 (CA),其设计目标都是提升传输速率。

64 QAM 要求比较理想的空口传输环境,在实际应用中的使用情况较少。此外,64 QAM 特性的引入对速率匹配进行了修改,无法保持对 R14 的后向兼容。

在中国,目前工业和信息化部为 LTE-V2X 分配了 20 MHz 频段,因此无法支持 CA 的实施。

综上所述,LTE-eV2X 在中国没有使用场景,目前该版本并未被商业化落地。

(3) R16—R17: NR-V2X。

C-V2X 将演进至 NR V2X,以支持更先进的 V2X 应用,提供更严格的服务质量 (QoS) 保障。LTE-V2X 可以提供面向车辆主动安全的短消息广播服务,NR-V2X 则是通过单播、组播机制和新的无线通信技术的引入来

支持更丰富的车路协同应用。此外,NR V2X 还将使用更高的通信频点,以提供更大的通信带宽,进而支持大吞吐量的数据交换。NR V2X 和 LTE-V2X 将彼此配合,共同支撑面向完全自动驾驶的车路协同。

R16 主要包括以下关键技术^[3]:

- Sidelink 增强。NR V2X 提出了更高的时延和可靠性指标,特定场景下,时延不超过 3 ms,可靠性达到 99.999%。为了满足这些要求,NR V2X 采用了一系列新的物理层设计,包括更大的子载波间隔、更短的传输时间间隔 (TTI),支持扩展循环前缀 (CP) 正交频分复用 (OFDM)、新的物理 Sidelink 控制信道 (PSCCH) 和物理 Sidelink 共享信道 (PSSCH) 映射关系、新的反馈信道等。此外,为了支持更高的传输速率,NR V2X 还采用了毫米波、LDPC 编码、64 QAM 等技术。

- 支持单播、组播。车路协同下一步将演进至车车行驶意图协同、传感器共享、编队行驶、路侧驾驶决策等应用,因此需要设计单播、组播的通信机制,以获得相对广播的更高传输效率。

R17 则计划从以下几个方面开展研究^[4]:

- 为降低终端功耗,定义新的资源分配方式。

- 通过定义终端间的协作机制提升模式 2 的可靠性,降低时延。

- 为广播、组播和单播定义非连续接收 (DRX) 模式,进一步降低终端功耗。

- 支持新的频谱。

3 通信技术发展推动车路协同架构演进

3.1 车路协同 1.0

车路协同 1.0 时代,道路数字化

程度很低，车和路之间的信息交互很少。少数重点管控的车辆会通过 2G/3G/4G 技术向管控平台上报自身的位置和状态以便接受监管。由于缺少信息通知手段，道路信息只能通过可变情报板或运营商短信的方式向车辆告知，只能提供准静态信息。图 1 为车路协同 1.0 架构图。

在这一阶段，车路协同系统只能进行低精度感知和初级预测，数据之间缺乏融合，信息采集、处理和传输的时延明显。

3.2 车路协同 2.0

随着感知、计算、通信技术的发展，车路协同已经进入 2.0 时代。随着摄像头、雷达、线圈等传感器的大范围部署和图像识别、交通流量统计技术的发展，越来越多的交通事件可以在路侧实时感知。而 C-V2X 技术为车辆和路侧基础设施提供了一种信息交互的快速通道，其通信时延可以控制在几十毫秒以内，道路状态通知的实时性大大增加，因此可以用来指导车辆的短时决策。随着 C-V2X 技术的引入，道路信息对于车辆的价值逐渐增加。图 2 为车路协同 2.0 架构图。

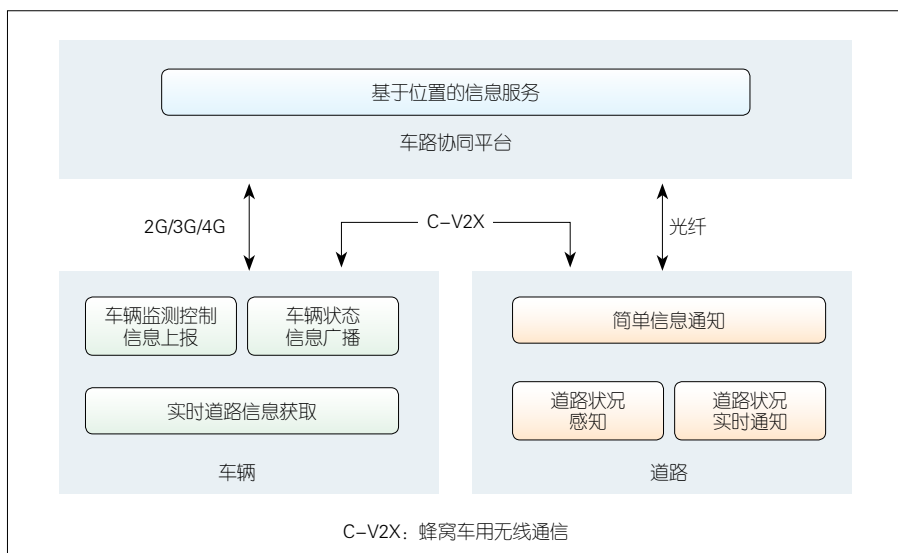
在这一阶段，车路协同系统具备复杂传感和深度预测功能，通过与车辆系统之间的双向数据实时共享，可以支持较高时间和空间解析度的驾驶辅助和交通管理功能。

3.3 车路协同 3.0

未来，随着路侧融合感知、边缘计算、C-V2X 技术的进一步发展，车路协同将进入 3.0 时代。随着 C-V2X 引入更大的传输带宽，车辆和路侧设施之间可以进行感知协同。车辆可以把自车传感器的原始数据发送到路侧，利用边缘计算能力进行更为精准的计算。随着 C-V2X 引入单播传输机制，



▲图 1 车路协同 1.0 架构图



▲图 2 车路协同 2.0 架构图

路侧设备可以向车辆提供有针对性的道路全息感知结果，甚至可以利用强大的边缘计算能力为车辆直接规划行驶路径。

在 C-V2X 通信技术的支持下，感知能力和计算能力可以在车辆和道路之间进行动态分配，实现综合成本、效率的优化；在边缘计算技术的帮助下，各微观交通节点可以实现局部通行效率的优化。图 3 为车路协同 3.0 架构图。

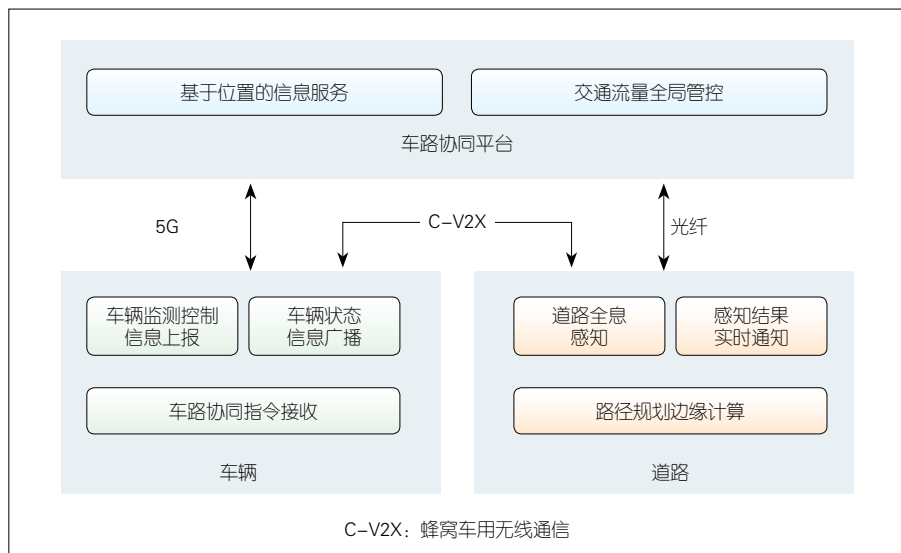
在这一阶段，车路协同系统可以为自动驾驶车辆提供全场景下的感知、预测、决策、控制、通信服务，并优化整个交通基础设施网络及车辆的部

署和运行。

4 车路协同下一步演进方向及对通信技术的要求

(1) 路侧感知时延与 V2X 通信时延需要同步优化。

目前车路协同正处于 2.0 向 3.0 过渡的阶段，路侧已经部署了一定的传感器，可以进行一定的事件分析和流量分析，进而可以为司机提供驾驶建议，为交通管控提供参考数据。但是现有传感器在处理时延和检测精度上还有较大提升空间，主要用于有人驾驶车辆的驾驶辅助，对车路间通信技术的时延也就没有那么敏感。



▲图3 车路协同 3.0 架构图

随着基于车路协同的自动驾驶技术成为热点，研究人员开始研发低时延摄像机、77 GHz 毫米波雷达、雷视一体机、激光雷达等处理时延更低、检测精度更高、分类能力更强的传感器。这些传感器的处理时延可以达到几十毫秒量级，检测精度可以达到分米级。为了保证信息的有效性，车路间通信技术的时延要求相应升高，保证从目标出现到通知到车内的综合时延在 100 ms 以内，与目前自动驾驶车辆自身传感器的检测时延相当。目前 LTE-V2X 的平均时延在几十毫秒，刚刚可以满足要求。考虑到错过已分配的 SPS 资源以及信道质量较差导致需要重传等极端情况，综合时延可能超过 100 ms；因此还需要研究可进一步降低 V2X 通信时延的技术，例如 R16 的短传输时间间隔（TTI）技术、R17 的终端协作技术等。

从另一个维度看，面向自动驾驶的车路协同部署不能采用传统交通摄像头和雷达，否则即使采用 5G 的极限时延 1 ms 的通信技术也无法满足自动驾驶要求。

（2）目标跟踪范围、路径规划

算法、V2X 通信技术、算力分布需要联合优化。

交叉口俯视感知是公认的车路协同重点应用。城市大型交叉口人流、车流密集，需要跟踪的运动目标众多，对 V2X 承载能力和车侧的路径规划算力带来巨大挑战。

一种解决思路是路侧感知从全部跟踪目标中圈定特定车辆周边限定区域内的物体。这就要求路侧边缘计算能够对目标车辆的运动轨迹进行预测，进而筛选出前进方向上的感知结果。这一方案还要求路侧单元（RSU）具有 R16 将引入的单播能力。

还有一种解决思路是将交叉口的车辆路径规划全部汇集到路侧边缘计算处理，这就要求车辆能够将感知到的近场环境数据上传到边缘计算设备；因此要求 V2X 的上行传输速率大大提升，同时也要求边缘计算设备具有较高的算力。

（3）交通优化需要车云信息快速交换和云控快速仿真推演作为支撑。

交通优化需要交通起止点（OD）调查信息。过去的 OD 调查往往需要结合问卷调查、公交线网乘客分布统

计、运营商数据、导航软件数据获得，数据获取周期长，无法体现动态信息和局部微观信息。随着 C-V2X 的推广，云端获取每台车辆的动态信息成为可能。有了全局的动态数据，再辅以云控平台的强大计算能力，可以实现交通调度的全局决策，并可以通过仿真推演的方法对决策方案进行快速验证。

随着导航软件的普及，越来越多的司机会遵循导航软件的路径规划建议；但是导航软件对道路的动态信息掌握的很不充分，而且在做路径规划建议时并没有充分考虑到大量车辆按建议出行对未来交通状况的影响。这就导致当使用导航软件的司机数量变多时，交通状况会恶化^[5]。采用 C-V2X 技术后，云端可以统筹进行全局性的最优策略决策，并直接为每个交通个体分配路径规划，从而避免交通无政府状态的出现。

5 不同场景下 C-V2X 车路协同的部署建议

不同交通场景下车路协同需要解决的问题不同，因此采用的设备配置和部署方案也有差异。目前车路协同研究主要集中在高速公路、城市街道和自动驾驶园区 3 大场景。

（1）高速公路。

对于高速公路场景，车辆行驶速度较高，紧急情况下要求的反应时间较长；因此对车辆的异常行为监测控制、对紧急事件的远程通知都有较高要求。

C-V2X 车载设备（OBU）可以实时获取车辆的运行状态、驾驶意图，从而很好地发现车辆故障、异常减速/停车/变道、不按限速行驶、占用应急车道等多种异常行为。在异常行为发生时，需要对司机进行驾驶行为纠正，因故未能实施纠正的，要及时通知高速公路交通管理部门采取相应处置措

施,达到事故主动预防的目的。为了支持这一应用, OBU 需要和车身总线进行连接, 需要有提示司机的人机接口(HMI)或者直接对车辆进行控制的接口, 需要能够通过 Uu 口与交管平台进行通信。

一旦危险状况已经发生, 如道路遗洒、事故、异常停车、路面积水/结冰/团雾等, 则需要对上游车辆进行及时预警, 必要时甚至要启动交通疏导机制。这就要求 RSU 之间有快速信息交换机制, 而且针对具体事件有相应的消息推送方案。

(2) 城市街道。

城市街道场景车速相对较低, 但是交通环境异常复杂, 要充分考虑控制信号复杂、人车混行、机非混行、道路连接关系复杂等影响。车路协同重点解决控制信号车内通知、非视距碰撞风险预警的问题。

城市场景的 RSU 部署要和信控装置充分结合, 实现信控装置的网联化。一方面, 可以将信控信息及时通知给周边车辆, 另一方面, 也可以通过 C-V2X 汇集周边交通流数据, 反哺信控装置的控制决策。

此外, 在重点区域, 例如道路交叉口, 可以部署多角度的感知设备, 通过多源传感器的感知融合解决感知精度的问题, 通过多角度传感器的感知融合解决感知盲区的问题。C-V2X 设备一方面可以作为多源传感器的时钟同步源, 另一方面也可以将感知结果快速通知到区域内车辆。

(3) 自动驾驶园区。

自动驾驶将率先在物流园区、港口、办公区域等相对封闭的场地、相

对固定的路线内实施。在园区内建设完善的数字化基础设施, 为园区内的自动驾驶车辆提供感知、计算服务, 可以极大地降低这些车辆的成本和功耗, 同时使得这些车辆的轻量化、小型化成为可能。

园区可以在自动驾驶车辆行驶路线上部署完备的传感器, 对所有交通参与者的状态进行上帝视角的感知, 这将极大降低单车传感器的投入。同时, 园区还可以在道路边缘设置计算单元, 利用边缘计算技术对于区域内自动驾驶车辆的行驶路径进行协同规划, 一方面降低单车计算成本, 另一方面可以实现有效协同, 解决“驾驶相遇”的联合决策问题。此外, 当自动驾驶车辆进入交叉口等复杂交通场景时, 还可以使用 5G 技术进行远程人工接管。

从另一个角度看, 在自动驾驶运营早期, 园区需要对所有自动驾驶车辆和园区内的道路基础设施进行全程全时监管。C-V2X 技术可以构造园区的数字神经网络, 不仅能快速感知园区内所有交通事件, 而且能为园区的应急处置、远程动态控制提供可能。

6 结束语

智慧交通已发展到基于车路协同的第 4 阶段。在车路协同技术的帮助下, 人、车、路、云将有机结合, 保障通行安全, 提升通行效率。作为车路协同 4 大关键技术之一, V2X 通信技术将伴随车路协同技术不断发展。

在通信技术发展的推动下, 车路协同技术已经从 1.0 进入 2.0, 并正在向 3.0 演进。接下来, 路侧感知方案

将进一步向低时延、高精度方向演进, 交叉口俯视感知将能同时处理更大范围的运动目标, 交通优化将向精细化发展, 这些都要要求通信技术同步演进。

不同交通场景下车路协同需要解决的问题不同, 因此采用的部署方案也有差异。本文中, 我们给出了高速公路、城市街道、自动驾驶园区 3 种典型场景下 C-V2X 车路协同方案的部署建议, 为车路协同的落地实施提供了建设性的参考方案。

参考文献

- [1] 郭戈, 许阳光, 徐涛, 等. 网联共享车路协同智能交通系统综述[J]. 控制与决策, 2019, 34(11): 2375-2389
- [2] 李俨, 曹一卿, 陈书平, 等. 5G 与车联网——基于移动通信的车联网技术与智能网联汽车[IM]. 北京: 电子工业出版社, 2019
- [3] 黄陈横. V2X 无线接入技术演进及组网方案研究[C]//2019 广东通信青年论坛. 广东: 广东通信协会, 2019: 8
- [4] LG Electronics. New WID on NR Sidelink Enhancement: RP-193231[S]. 3GPP, 2019
- [5] CABANNES T, FIGHIERA V, SUNDT A, et al. The Impact of GPS-Enabled Shortest Path Routing on Mobility: A Game Theoretic Approach[C]//Transportation Research Board 97th Annual Meeting. USA, 2018: 1

作者简介



张杰, 大唐高鸿数据网络技术股份有限公司车联网事业部总监; 拥有 17 年的移动通信领域从业经验, 先后从事 3G/4G/5G/C-V2X 的算法设计、标准制订、产品研发等工作, 目前主要负责 C-V2X 相关技术、产品和解决方案的规划工作; 参与了全球通信标准的制订, 先后参与和负责多项国家重大专项课题; 获得几十项发明专利授权。