

# 智能网联车路云协同系统架构与关键技术研究综述

丁飞<sup>1,2</sup> 张楠<sup>1</sup> 李升波<sup>3</sup> 边有钢<sup>4</sup> 童恩<sup>2</sup> 李克强<sup>3</sup>

**摘要** 随着汽车产业电动化、智能化、网联化、共享化的发展驱动,全球主要强国均将智能网联汽车列为国家战略发展方向。蜂窝车联网、边缘计算网络和高精度定位系统的技术发展,为车车、车路、车人和车云系统的全面融合提供了有效支撑。车辆、道路、云平台与蜂窝车联网 (Cellular vehicle-to-everything, C-V2X) 网络的融合,加速打通车内与车外、路面与路侧、云上与云间的信息互通,为实现车路云一体化的融合感知、群体决策及协同控制提供了重要基础。首先,梳理了智能网联车路云协同系统架构与关键技术,对该领域的演进特征、发展制约因素进行了总体概述;其次,阐述了新型车路云协同系统、智能网联 C-V2X 通信系统、云控系统和车路云协同测试系统的架构设计与工作原理;然后,从 C-V2X 组网、融合定位、测试评价角度,介绍了车路云协同系统融合 V2X 网络、融合定位的技术演进与研究进展,给出了智能网联场景的仿真平台、实车测试及评价指标;最后,对智能网联车路云协同系统的协同组网与控制、互操作、边缘智能服务和安全技术层面的发展趋势进行了展望。

**关键词** 车路云协同系统,蜂窝车联网,智能网联汽车,边缘计算网络,高精度定位

**引用格式** 丁飞,张楠,李升波,边有钢,童恩,李克强.智能网联车路云协同系统架构与关键技术研究综述.自动化学报,2022,48(12):2863-2885

**DOI** 10.16383/j.aas.c211108

## A Survey of Architecture and Key Technologies of Intelligent Connected Vehicle-road-cloud Cooperation System

DING Fei<sup>1,2</sup> ZHANG Nan<sup>1</sup> LI Sheng-Bo<sup>3</sup> BIAN You-Gang<sup>4</sup> TONG En<sup>2</sup> LI Ke-Qiang<sup>3</sup>

**Abstract** With the development of electrification, intelligence, networking, and sharing in the automotive industry, all major countries have laid out the intelligent connected vehicle as a national strategy. The technological development of cellular vehicle-to-everything (C-V2X), edge computing networks, and high-precision positioning systems provide strong support for the comprehensive integration of the vehicle to vehicle, vehicle to the road, vehicle to pedestrian, and vehicle to cloud. Vehicles, roads, and cloud platforms are integrated with the C-V2X network, information exchange between the in-vehicle, road, and cloud with the out-vehicle, roadside, and different clouds will be accelerated, and the vehicle-road-cloud coordinated fusion perception, group decision, and collaborative control will also be established. Firstly, the architecture and key technologies of the intelligent connected vehicle-road-cloud cooperation system are combed, and its evolution characteristics and development constraints are summarized. Then, the architecture design and working principle of the new vehicle-road-cloud cooperation system, intelligent connected C-V2X communication system, the cloud control system, and vehicle-road-cloud cooperation test system are described. Besides, from the three aspects of C-V2X networking, fusion positioning, and test evaluation, the V2X network and fusion positioning-based technical evolution and research progress of vehicle-road-cloud cooperation system are introduced, and the simulation platform, real vehicle test, and evaluation index of intelligent networking scenario are also proposed. Finally, the development trends of the intelligent connected vehicle-road-cloud cooperation system in the aspects of collaborative networking and control, interoperability, edge intelligent service,

收稿日期 2021-11-23 录用日期 2022-04-27

Manuscript received November 23, 2021; accepted April 27, 2022

国家自然科学基金 (61871446, 61872423), 工业和信息化部产业技术基础公共服务平台项目 (2019-00892-3-1), 工业和信息化部通信软科学研究项目 (2019-R-26), 江苏省重点研发计划 (BE2020084-1), 江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助项目 (DZXX-008) 资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61871446, 61872423), Basic Public Service Platform Project of Industrial Technology of the Ministry of Industry and Information Technology (2019-00892-3-1), Communication Soft Science Research Project of the Ministry of Industry and Information Technology (2019-R-26), Key Research & Development Plan of Jiangsu Province (BE2020084-1), and “Six Talent Peaks” High Level Talent Funding Project of Jiangsu Province (DZXX-008)

本文责任编辑 杨涛

Recommended by Associate Editor YANG Tao

1. 南京邮电大学通信与网络技术国家工程研究中心 南京 210003  
2. 中国移动-南京邮电大学 5G 联合创新中心 南京 210003  
3. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室 北京 100084  
4. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室 长沙 410082

1. National Engineering Research Center for Communication and Network Technology, Nanjing University Posts and Telecommunications, Nanjing 210003  
2. 5G Joint Innovation Center of China Mobile & Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003  
3. State Key Laboratory of Automotive Safety & Energy, Tsinghua University, Beijing 100084  
4. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082

and security technology are discussed.

**Key words** Vehicle-road-cloud cooperation system, cellular vehicle-to-everything, intelligent connected vehicle, edge computing network, high precision positioning

**Citation** Ding Fei, Zhang Nan, Li Sheng-Bo, Bian You-Gang, Tong En, Li Ke-Qiang. A survey of architecture and key technologies of intelligent connected vehicle-road-cloud cooperation system. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(12): 2863–2885

汽车工业的快速进步, 信息传输、软件和信息服务业的快速发展, 推动了智能网联汽车 (Intelligent connected vehicle, ICV) 产业的迅猛发展<sup>[1]</sup>. 美国、欧盟和日本等很早就开始布局基于专用短程通信技术 (Dedicated short range communication, DSRC) 标准的车路协同系统建设, 如美国先进交通和高速公路合作伙伴项目<sup>[2]</sup>、车辆基础设施集成项目<sup>[3]</sup>、欧盟的欧洲区域项目<sup>[4]</sup>、C-Roads 项目<sup>[5]</sup>、日本的 Smartway 项目<sup>[6]</sup>等, 其中, 车-车和车-路协同是该类项目发展的重点. 国内对智能网联汽车和车路协同的研究起步相对较晚, 但国家主导了基于公众移动网络的蜂窝车联网 (Cellular Vehicle-to-everything, C-V2X) 技术标准, 相比 DSRC, 该技术在网络架构、技术性能、技术掌控度及后续演进等方面具有优势. 作为 5G 和汽车领域最具潜力的应用之一, 智能网联汽车产业创新与车路协同系统建设在中国已上升到国家战略高度. 根据《新能源汽车产业发展规划 (2021 ~ 2035 年)》, 中国将重点推动智能化道路的升级改造, 加快新型基础设施建设, 鼓励引导车载无线通信终端的装配, 推动数字系统改造和云上平台, 打造智能网联核心竞争力与新型产业生态<sup>[7]</sup>.

传统车路协同系统主要强调车与路侧设备之间的协同, 可以提供车与车、车与路之间的信息交互辅助单车决策和有限车载信息服务, 应用场景与服务能力均受限. 文献 [7] 首先提出车路云一体化融合控制系统的发展思路, 通过人、车、路、云等多维要素之间的融合感知、群体决策与协同控制, 从而提升道路交通系统的安全性、效率和绿色化等综合性能. 伴随着 C-V2X 技术创新, 边缘计算网络 (Edge computing network, ECN) 和高精度定位系统 (High precision positioning system, HPPS) 等的发展与演进<sup>[8]</sup>, 为构建智能网联车路云协同系统 (Intelligent connected Vehicle-road-cloud cooperative system, IC-VRCCS) 提供了核心驱动力, 主要表现在: 1) 在智能网联车路云协同系统的智能化、网联化方面, 传统车路协同系统与 C-V2X 进行融合, 支持直连通信的 PC5 接口可以拓展各类“人-车-路-云”服务场景, 长期演进 (Long term evolution, LTE)/5G Uu 接口可以打通人-车-路-云多模式交互接口, 为智能网联车路云协同系统的建设提供决

定性支撑<sup>[9]</sup>; 加快发展并集成多系统组合的 HPPS, 不仅可以顺利实施自动驾驶和编队控制等服务, 并且能保障智能车辆在全球定位系统 (Global positioning system, GPS) 信号弱或无信号等环境下的全路况连续可用<sup>[10]</sup>; 2) 在智能网联车路云协同系统测试方面, 各类仿真平台的综合运用, 全国测试场、示范道路和示范区的大力发展, 为各子系统与互操作测试、场景定义与场景生成及实车测试评价创造了有利条件<sup>[7]</sup>; 3) 平台的互融协同方面, 由于智能网联自动驾驶系统具有低时延、大并发和高移动性的特点, ECN 推动了网联系统的云平台架构演进, 基础平台与应用平台的分离, 将资源与业务进行解耦, 可实现虚拟云资源的高效利用与业务数据的高效传输以及业务云的统一建设、管理与开放<sup>[11-12]</sup>.

智能时代的汽车控制发展进程是对驾驶员的环境认知感知、决策规划和执行控制等环节的逐步增强和最终替代<sup>[13]</sup>. 智能网联车路云协同系统中人-车-路-云与 C-V2X 网络的全面融合, 将会催生车-车 (Vehicle-to-vehicle, V2V)、车-路 (Vehicle-to-infrastructure, V2I)、车-人 (Vehicle-to-pedestrian, V2P) 和车-云 (Vehicle-to-cloud, V2C) 等各类新型业务模式的发展并综合运用, 但工程实现仍面临着一系列的挑战: 1) 受限于智能车辆的整车设计与产业协同的工作阶段, 如何有效利用现有车辆平台并与 C-V2X 网络进行架构设计以及 HPPS 进行结合, 实现工作框架设计并给出设计要求, 是亟须解决的问题; 2) 更多关联平台与系统的打通以及 ECN 的加入, 如何开展应用平台与基础平台的架构设计以及移动边缘计算 (Mobile edge computing, MEC) 与 C-V2X 的融合网络部署, 还有待进一步梳理并细化; 3) 智能网联车路云协同场景相关设备和场地布设成本较高, 业界对各子系统与互操作以及场景测试研究正在积极展开, 但相关测试方案并未获得全面统一, 需要考虑高效地开展场景测试并推进理论到实际的转化. 为了更好梳理国内外智能网联车路云协同系统架构及其关键技术的发展现状, 本文将从智能网联车路云协同系统的架构技术, 智能网联 V2X 组网、融合定位和测试评价技术等关键技术方面进行详细阐述, 并对智能网联车路云协同系统的发展趋势展开讨论.

# 1 架构技术

在 LTE/5G-V2X 网络支撑下, 智能车辆、道路、路侧设施和平台等与 C-V2X 技术的融合, 将部分感知、计算和服务等功能在车、路、云之间进行分布式部署, 需要探索实现车辆、道路、路侧设施和云端的深度融合与系统重构. 架构技术是智能网联车路云协同系统产业协同创新及落地应用的顶层设计. 基于 C-V2X 技术, 车-路-云协同作业并组建为新型车路云融合系统, 其中智能网联 V2X 通信系统和云控系统分为该系统的网络中心和控制中心. 并且, 针对现阶段车路云协同系统试验场和示范区以及智能网联汽车产品测试的工作进展, 需要给出服务于产业发展需求的车路云协同测试系统的应用架构、测试场景设计与系统构建思路.

## 1.1 新型车路云融合系统

区别于传统车路协同系统, 未来智能车辆、道路、路侧设施和平台与 C-V2X 网络的全面融合使得具有类似如图 1 所示逻辑框架的新型车路云融合系统成为发展趋势, 催生新架构下嵌入 V2X 通信的智能网联车辆、智能网联道路 (Intelligent connected road, ICR)、智能网联路侧设施 (Intelligent connected infrastructure, ICI) 和智能网联云 (In-

telligent connected cloud, ICC), 打通车 (车内/车外/车间/车云)、路 (路面/路侧/路间/路云)、云 (边缘计算平台/区域数据中心云/公安交警监管平台/汽车制造厂商平台/第三方平台), 集成车端、道路、路侧、云端、车辆到电网 (Vehicle to grid, V2G) 及第三方平台等各种数据、服务、用户等各类资源, 实现车路云一体化的感知、决策与控制、地图、安全及应用服务, 这也构成了汽车产业与 C-V2X 技术融合发展的核心内涵.

智能化和网联化是新型车路云融合系统的典型特征, 传统车辆与 C-V2X 技术的融合将为智能网联车辆接入到统一的“新六心”, 具体是: 感应中心、地图中心、决策中心、控制中心、服务中心和安全中心. 感知中心负责对行驶车辆信息采集、状态监测、协同融合感知; 地图中心为车辆提供高精度定位、路径规划和动态交通信息; 决策中心负责单车、多车、局部或全域场景下的协同与群体决策及规划; 控制中心依据 (感知中心) 感知信息、(地图中心) 高精度定位与实时交通信息、(决策中心) 决策与规划策略, 实现车路云协同场景下的智能驾驶与智能交通服务, 提升车辆行驶与交通运行的综合性能, 当车辆出现故障或处于恶劣环境下, 确保安全行驶; 车载可视化平台接入服务中心, 享受个性化自动驾驶与交通信息服务; 安全中心负责管理智能网联汽

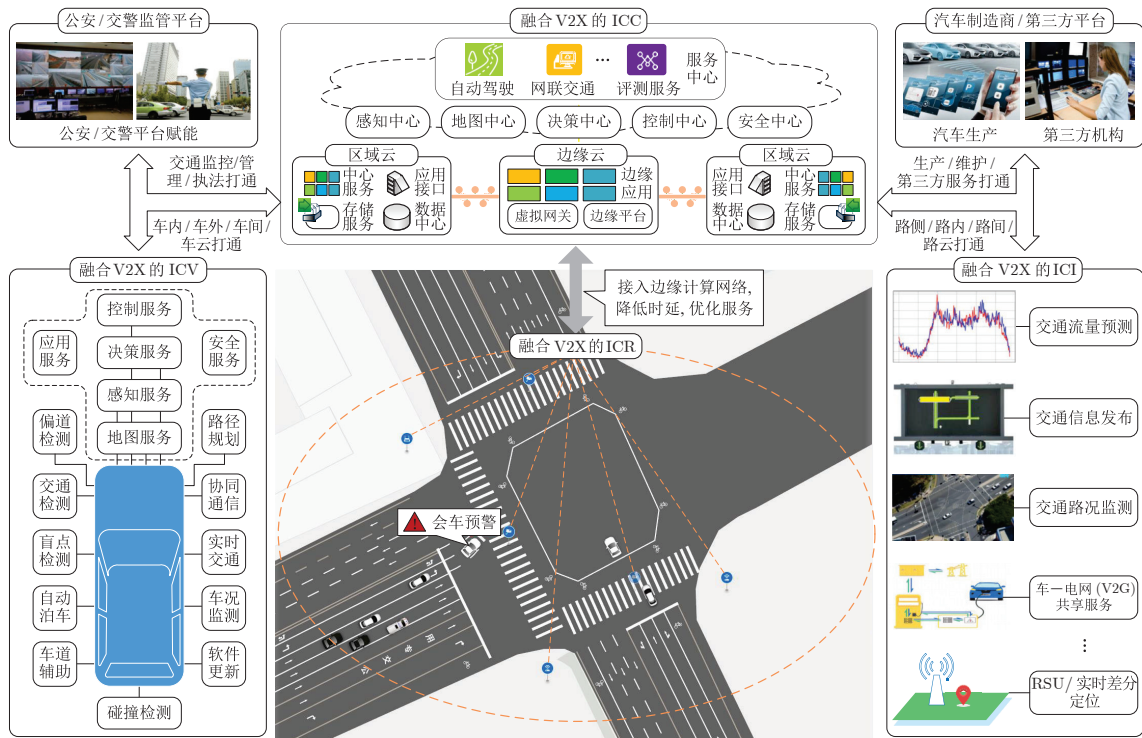


图 1 智能网联车路云协同系统逻辑框架  
Fig.1 Logical framework of the IC-VRCCS

车的终端安全、组网安全、系统安全、数据与接口安全等.

### 1.2 智能网联 V2X 通信系统

智能网联 V2X 通信系统由 LTE 和 5G 网络进行承载, 研究 5G-V2X 应用架构和人、车、路等多要素协同系统内信息融合, 对开展智能网联汽车和交通智能体的系统设计和优化系统性能具有重要意义.

#### 1.2.1 5G-V2X 应用架构

面向车路云一体化控制的 5G-V2X 应用架构如图 2 所示, 5G 系统负责提供 V2X 网络覆盖, 车辆、道路和路侧设施等嵌入 V2X 通信并组成 V2X 通信系统. 5G 系统具备虚拟化资源的动态配置和调度功能, 为支撑 V2X 应用发布与差异化服务需求, 第三代合作伙伴计划 (3rd generation partnership project, 3GPP) TS 23.2875G 对 5G 系统构进行了增强定义<sup>[14]</sup>. 5G-V2X 应用架构主要由 5G 核心网 (5G core, 5GC) 域、路侧单元 (Road side unit, RSU) (含 RSU 平台)、路侧设施和车辆等组成. 其中, 5GC 由多个网络功能构成, 例如访问和移动管理功能 (Access and mobility management function, AMF)、策略控制功能 (Policy control function, PCF)、网络数据分析功能 (Network data analytics function, NWDAF)、网络存储库功能 (Network repository function, NRF)、网络开放功能 (Network exposure function, NEF)、统一数据存储

库、统一数据管理、用户平面功能 (User plane function, UPF) 和会话管理功能 (Session management function, SMF) 等<sup>[15]</sup>. 5GC 控制平面内的网络功能使用基于服务的接口进行交互 (例如 Npcf、Nsmf、Nnef、Nnwdaf 等). 智能网联车辆内置的用户设备 (User equipment, UE) 应用之间采用 V5 接口进行本地数据传递, 并利用 V1 接口与 V2X 应用服务器进行远程数据交互.

在该架构中, 车载通信分为车内通信和车外通信<sup>[16]</sup>两部分, 前者主要包括车内系统 (分为计算平台、控制器域网 (Controller area network, CAN) 网关、传感器阵列、可视化平台和 3D 地图等) 和集成车载单元 (On board unit, OBU) 平台的接口, 后者为 OBU 平台承载的各类 “人-车-路-云” 通信服务, 两者之间通过连接器 (如串口、USB 接口或以太网等) 进行信息交换. 车载 V2X 通信系统的进一步发展, 将是车载计算平台为核心, 全面融合传感器阵列、可视化平台、OBU 平台及定位系统等, 真正实现集成 V2X 网络的感知、组网、决策和控制的一体化设计.

#### 1.2.2 信息融合

在车路云协同架构下, 智能网联车辆通过自感知 (车内/车外) 与协同感知 (车间/车路/车云) 并服务于多种应用 (如跟车、换道和自适应巡航控制等), 从而在 V2X 网络中传输各种消息. 欧洲电信标准化协会为车路云协同场景定义了多种标准化消

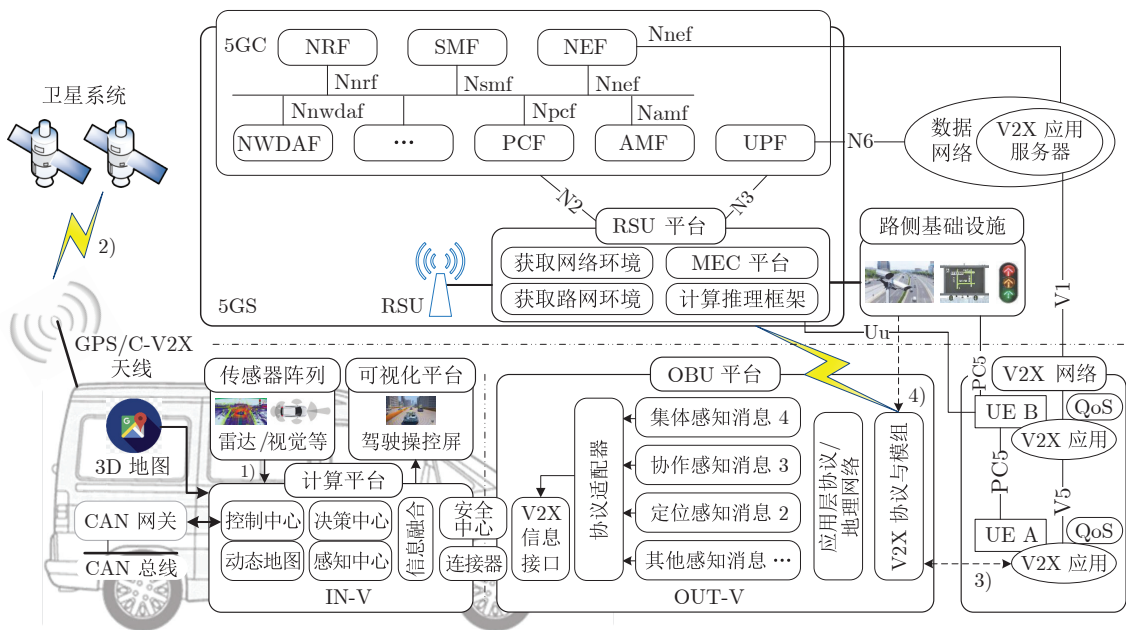


图 2 智能网联车辆 V2X 应用示意架构

Fig. 2 Schematic architecture of V2X application of the ICV

息,包括协作感知消息、集体感知消息、分散式环境通知消息、本地动态地图、机动协调消息以及用于辅助驾驶场景下车道变更警告、道路危险信号、纵向碰撞风险警告等安全消息<sup>[17]</sup>。图 2 中,传感器阵列包括激光雷达、摄像头、雷达、超声波等采集的数据(图 2 中消息 1) 传送给计算平台,定位感知消息 2)、协作感知消息 3)、集体感知消息 4) 和其他感知消息,经协议适配器进行格式转换并封装为 V2X 信息包,再通过连接器送入车载计算平台进行处理或发送到云平台处理后下发给车辆。其中,定位感知消息用于获取位置、速度、航向等信息;协作感知消息为 PC5 侧链探测出的邻车位置、网络拓扑及交互信息;集体感知消息包括车辆与路侧联合感知消息(如 RSU 覆盖区域的实时路况、V2I 链路状态监测等)以及路侧设施的播报消息(如驾驶提醒、交通拥堵等)。

**多源信息融合:**一方面可以优化区域内各车辆、单车各子功能单元以及软硬件交互接口处的冗余数据,从而提升整个系统的工作效能<sup>[18]</sup>。文献[19–20]提出冗余缓解的处理规则;文献[21]引入消息过滤机制,可以在保持感知性能的同时减少冗余数据量;文献[22]利用可选信息和消息包大小之间的权衡来节省网络资源。文献[23]针对高速公路场景,利用 RSU 提前获取上游兴趣区域中无线网络和路面交通状况,进而可以动态调整车辆发送信息的间隔,从而抑制接收信息的冗余度。文献[24]使用深度学习对数据传输进行调度并卸载,可以减轻网络负载并提高系统可靠性。另一方面,多源信息融合能够丰富数据内涵,增强对整个车路云协同系统的控制与管理,其应用涵盖交通控制、交通预警和交通指挥中心等方面。交通控制的应用根据历史检测数据,建立交通道路状况预测模型,可以对未来的交通流量<sup>[25]</sup>、车辆通行时间<sup>[26]</sup>、车辆行驶速度<sup>[27]</sup>等进行预测;交通预警应用则借助信息融合技术对道路的拥堵情况<sup>[28]</sup>与道路通行时间进行确定,同时把信息及时发布于路侧电子显示屏<sup>[29]</sup>;交通指挥中心通过对不同类型系统数据进行分类、处理并预测,可以为交通优化调度、城市交通规划提供智力支持。

### 1.3 云控系统

云控系统典型服务架构如图 3 所示,该架构包括云控应用平台、云控基础平台、路侧基础设施、车辆与其他交通参与者、通信网与相关支撑平台等 6 个主要部分<sup>[30–31]</sup>。车辆及其他交通参与者的信息统一上传至云控基础平台;云控基础平台采用边缘云、区域云和中心云的网络架构,结合地图、交管、气象和定位等平台的相关数据,对汇聚于云控基础平台

的车辆和道路交通动态信息按需进行综合处理后,以标准化分级共享的方式支撑不同时延要求下的云控应用需求;企业、机构及政府相关部门已有交通/智能网联汽车服务平台,通过云控基础平台无需追加基础设施建设,即可便捷地获得更为全面的交通基础数据以提升其服务。

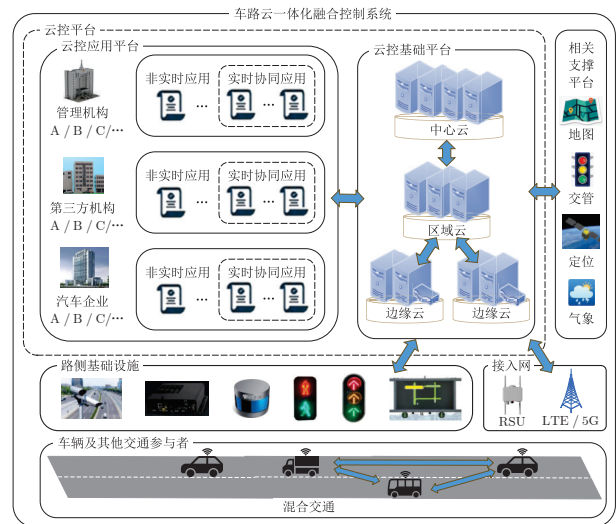


图 3 面向车路云一体化融合的云控系统架构<sup>[30]</sup>

Fig.3 Cloud control system architecture oriented to vehicle-road-cloud integration<sup>[30]</sup>

#### 1.3.1 云控应用平台

云控应用平台的组成与服务架构如图 4 所示,其依托于物理分散、逻辑协同的云控基础平台进行建设,采用标准统一、开放共享的数据交互形态,通过在物理空间和信息空间车辆、交通、环境等要素的相互映射,实现人-车-路-云之间的跨域数据协同。基础平台、网联服务、开放平台的逻辑分离,融入微服务和容器等技术,可实现模块化、高安全性和高度可伸缩的系统平台,有利于分布式云设施与业务策略的垂直化管理、业务的敏捷式开发并能力开放。打造云控应用平台的标准接入、实时数据服务、实时决策与控制服务与管理能力,支持车辆端 OBU、客户端应用以及用户端的共享屏幕应用等适配接入,打通与政府监管平台、车企信息系统和第三方平台等,为政府管理类应用、行业服务类应用以及车企智能化应用提供智力支持,加速智能网联车路云协同系统的应用落地<sup>[8]</sup>。

#### 1.3.2 云控基础平台

云控基础平台采用边缘-区域-中心的三级架构。边缘云靠近路侧部署,通过光纤连接 RSU,实现多级云架构下的数据标准化转换,支撑协同换道规划、盲区与超视距危险预警等实时云控应用。例

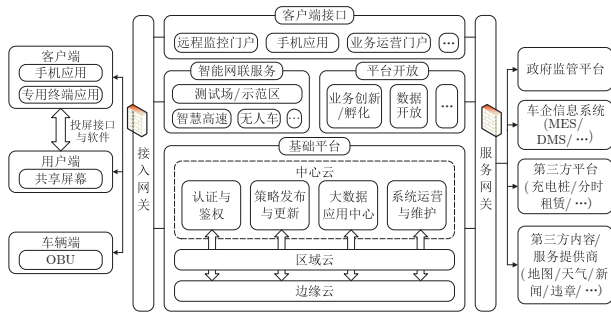


图 4 云控应用平台示意架构

Fig. 4 Schematic architecture of cloud control application platform

如目前主流的协同换道模型包括换道决策模型、换道行为识别和换道轨迹模型，换道决策模型选定驾驶员的行为特征或车辆的行车环境作为特征参数，换道行为识别通过驾驶模拟器采集车辆换道数据并选取能够表征换道行为的参数对识别模型进行训练，换道轨迹模型可以通过高次多项式拟合或相关数理公式进行规划或预测<sup>[31]</sup>。边缘云的部署可以提升信息共享与实时响应能力，从而支持远程驾驶、辅助驾驶和安全预警等云控应用的高效运行。区域云支持车辆编队行驶、道路监控预警、路径引导和路侧设施远程控制等广域范围智能交通类云控应用的运行。基于车辆到达目的地的平均驾驶时间、平均车辆密度、平均行车距离、平均等待时间以及路网行驶车辆数等极限指标，可以对比测试车辆不同路径规划策略的性能差异。华为技术有限公司与重庆交警在渝北区同茂大道联合创建了“全息路网”示范区就是一个具体场景的应用，全息路网从点、线到面，构建从微观个体（车辆）到宏观系统（区域交通）的认知体系。中心云支持道路交通态势感知、道路交通规划设计评估、驾驶行为与交通事故分析、车辆故障分析和车险动态定价分析等全局范围实时与非实时的云控应用的有序运行。中心云面向中国与行业管理部门、车辆设计与生产企业、交通相关企业及科研单位，基于多个区域云数据的汇聚，为其提供多维度宏观交通数据分析的基础数据与增值服务<sup>[8]</sup>。

云控基础平台支持对基础设施的在线配置和管理<sup>[32]</sup>，通过使用超融合或可组合基础设施等技术，可以将企业内、外部部署的数据中心资源集成到多云系统中，并通过统一仪表盘进行精细化管理<sup>[33]</sup>。为保证各层间的数据采集和分发的可靠性和稳定性，需要对包括车辆基本安全信息、交通运行信息等交互数据划分类别并进行分发处理<sup>[34-35]</sup>，数据类型如表 1 所示。

表 1 云控系统数据流向与数据类型示例

Table 1 Example of data flow direction and interactive data types of cloud control system

数据流向	数据交互对象	数据对象
上行	边缘云→区域云 区域云→中心云	车路融合感知信息
		动态交通事件信息
		交通状态信息
		动态交通管理信息
下行	区域云→边缘云 中心云→区域云	交通状态信息
		地图信息
		动态交通管理信息
		车辆运营信息

#### 1.4 车路云协同测试系统

全国以江苏省无锡市、天津市西青区、湖南省长沙市等为代表的国家级车联网先导区以及全国 20 多个城市的道路联网升级建设，还有各地企业和研究机构自主建设的示范测试区域。试验场的快速建设能够支持智能网联相关技术的设备研发和测试验证，但如何系统化、科学化设计和建设试验场，促进产品与技术之间的兼容性与互操作性，是现阶段试验场需要考虑的重要问题。

##### 1.4.1 车路云协同组网与测试应用架构

根据云管端的架构思路，可以将智能网联车路云协同测试系统划分为 3 层：1) 终端层包括融合 V2X 的 ICV、融合 V2X 的 ICI 和 ICR；2) 网络层拥有“3 张网”，分别为 5G 接入网、定位接入网和以太接入网，5G 接入网提供高可靠、大带宽、低时延的通信网络，定位接入网提供动态车道级定位能力，以太接入网提供高速有线宽带服务；3) 云端由融合 V2X 的 ICC 组成，一方面提供各子系统与互操作测试服务，另一方面用于支持交通场景构建、实现可控可追溯的测试流程和科学的测试评价体系，提高车路云协同相关技术的开发、测试和商用部署效率。

在 LTE/5G-V2X 通信系统的支撑下，智能网联车辆具备增强的环境感知能力，以及与周围车辆、道路设施等信息交互与区域协同的能力，使得在跟车、换道和自主编队等过程中获得更丰富的信息，有助于生成并执行更灵活、更智能的场景策略。支持自动驾驶的汽车预计每年产生超过 300 TB 的数据<sup>[36]</sup>，LTE/5G 网络与 ECN 的融合，通过边缘数据收集与分发、数据分析与融合、业务连续性等关键技术，实现多模式“人-车-路-云”高效率协同工作，降低智能网联车辆的端到端时延，缓解 ICI/ICR 的存储与计算压力以及大量数据回传造成的网络拥塞。

### 1.4.2 车路云协同测试场景

智能网联汽车产品测试评价白皮书<sup>[37]</sup>给出了 Robotaxi、无人自主泊车、高速路自动驾驶等典型自动驾驶车辆的测评方案, 通过对车路云协同系统进行解耦与重构, 如图 5 所示, 首先由语义描述不同数据来源的操作场景用例得到功能场景, 然后通过参数化定义操作场景的状态空间得到逻辑场景, 接着对操作场景的状态空间参数赋值得到具体场景, 最后通过软件建模复现具体场景得到测试用例, 从而实现智能网联车辆测试场景的构建. 同时, 受实际测量设备与工作阶段, 需要对 C-V2X 各子系统与互操作进行测试, 以加速推进 C-V2X 产业的全面部署及商用.

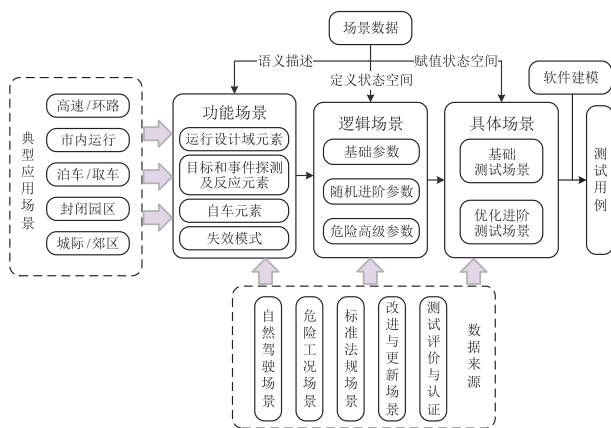


图 5 智能网联汽车测试场景构建示意图

Fig.5 Schematic diagram of ICV test scenario construction

根据不同自动驾驶系统的设计运行范围, 将测试场景分为高速/环路、市内运行、泊车/取车、封闭园区和城际/郊区 5 种连续运行场景. 每种应用场景下, 可在不同抽象程度上基于运行设计域、目标和事件探测及反应、自车行为失效模式等元素, 提取各类型典型场景, 进行场景参数标注及统计分析, 形成逻辑场景, 然后基于逻辑场景的参数分布生成具体场景, 并以通用场景格式存储, 构成数万级测试用例的场景库. 同时, 从运行设计域、目标和事件探测及反应、自车行为和失效模式等维度对功能场景进行量化, 结合逻辑场景的参数化定义, 从而形成分级的基础测试场景和优化进阶测试场景, 进而为智能网联汽车产品准入测试与测评优化提供技术指导.

智能网联自动驾驶测试场景是自定义时间和空间范围内车辆运行设计域元素、目标和事件探测及反应元素、自车元素的综合信息融合<sup>[37]</sup>. 运行设计

域元素主要包括道路信息、环境信息和交通参与者; 目标和事件探测及反应是指相应测试场景下自动驾驶系统需要探测的物体或者事件以及应做出的响应, 作为仿真测试场景的关键考察方面, 其主要包括交通参与者的类型及运动状态等信息; 自车元素主要包括车辆的类型、性能特性和驾驶行为等; 为保证自动驾驶的安全性, 还需对车辆的失效响应性能进行评测, 通过设置注入故障、超出运行设计域、传感器失效, 超限运行设计域参数等一些失效模式来验证车辆的可控性能.

在执行基于场景的评测时, 根据场景数据来源的不同, 将测试场景概括为自然驾驶场景、危险工况场景、标准法规场景、改进与更新场景、测试评价与认证 5 大类. 自然驾驶场景包含智能网联车辆所处的人-车-环境-任务等全方位信息, 能够很好地体现测试的随机性、复杂性及典型性特点; 危险工况场景主要实施智能网联车辆自动驾驶控制策略的场景验证; 标准法规测试场景指通过现有的标准、评价规程等构建测试场景; 改进与更新场景指对功能场景与逻辑场景进一步优化设计, 改进现有的问题场景并补充未知工况的测试场景, 从而覆盖自动驾驶功能测试的盲区; 测试评价与认证则是给出智能网联车辆的测试评价与检测认证报告, 为产品商用部署与管理奠定基础.

## 2 关键技术

智能网联车路云协同系统将蜂窝车联网、边缘计算网络和高精度定位等深度融合并综合运用, 需要对该新型车路云融合系统中的智能网联 V2X 组网和融合定位技术进行研究. 并且, 为加速智能网联车路云协同系统的落地进程, 有必要在车路云协同相关技术投入使用之前, 对其试验场建设给出设计与实施建议, 对于典型智能网联核心技术指标给出限定性要求. 下面将对智能网联 V2X 组网、融合定位、测试与评价等关键技术的原理与研究进展进行阐述.

### 2.1 智能网联 V2X 组网

智能网联 V2X 通信系统支持智能网联车路云协同系统的有效构建, 伴随着智能网联 V2X 应用的大规模接入以及 V2X 混合服务作用的加强, 针对 V2X 应用协议、拥塞控制和 MEC 融合技术等研究, 可以为智能网联车路云协同系统的稳定运行提供重要支撑.

#### 2.1.1 C-V2X 应用协议

LTE/5G-V2X 技术拥有与公众移动接入网和

车载自组网融合组网的架构优势, 第三代合作伙伴计划、欧洲电信标准协会 (European Telecommunications Standards institute, ETSI) 和美国机动车工程师学会 (Society of Automotive Engineers, SAE) 均在组织推进 V2X 协议的制定, 考虑在兼容 DSRC 协议栈中传输层、网络层和应用层基础上, 在物理层和 MAC 层引入 Device to device (D2D) 协议用于支持 PC5 直连通信接口的演进, 并对 V2X 组网过程中的测试技术与性能指标进行更新. C-V2X 协议栈与传输控制如图 6 所示<sup>[38]</sup>. 3GPP C-V2X 与 DSRC、欧洲合作式智能运输系统 (Cooperative intelligent transport system, C-ITS) 技术与标准的对应关系如表 2 所示. D2D 应用协议分为用户平面和控制平面, 用户平面连接应用层和物理层之间的数据链路以实现业务数据的传输, 控制平面用于实现资源调度以及对服务等实体的管理等<sup>[39]</sup>. D2D 通信无需中继转发, 设备之间可以直接进行通信, 节点的局域组网性能更优<sup>[40-42]</sup>. Cheng 等<sup>[43]</sup> 和 Abd-Elrahman 等<sup>[44]</sup> 论证了基于 D2D 的 V2X 低时延通信, 并能优化蜂窝网络的承载性能. 中国 C-V2X 技术发展位于全球领先, 最先将 5.9 GHz 频段 20 MHz 带宽的频率资源分配用于直连通信服务, 同时对台站、设备、干扰资源的管理做出了具体规定.

在 C-V2X 协议互操作方面, 甘秉鸿<sup>[45]</sup> 搭建了 V2X 标准协议一致性测试系统, 该系统包括用于 C-V2X PC5 接口协议的 R&S CMW500 测试仪表和用于全球导航卫星系统卫星同步功能的 R&S SMBV100B 测试仪表等, 以支持 C-V2X 网络层、消息层和安全层协议一致性测试, 用于检验各产品的协议一致性和互通性.

2.1.2 V2X 网络拥塞控制

在智能网联 V2X 通信系统中, 每辆车定期广播其运动和链路状态的消息, 此类流量与道路上的车辆数量成正比, 当流量密度增加时, 信道资源趋于饱和将引发丢包率的增加, 易导致局部区域 V2X 通信的失效<sup>[46]</sup>. 在基于 DSRC 的 V2X 组网环境下, SAE 和 ETSI 分别提出了 SAE J2945/1<sup>[47]</sup> 和 ETSI TS 102687<sup>[48]</sup> 用于分散拥塞控制. 考虑到 LTE-V2X 网络中未定义集中的信道资源协调器, 节点收发时需要通过监控信道活动和限制其信道使用来防止信道拥塞. SAE 正在 SAE J3161/1<sup>[49]</sup> 中为 LTE-V2X 开发拥塞控制机制. ETSI 在 TS 103574 中对 C-V2X 的 PC5 信道的拥塞控制机制进行了规定<sup>[17, 50]</sup>, 该规范允许单独或组合使用发射功率、速率以及调制和信道编码控制. 3GPP TS 38.214 标准<sup>[51]</sup> 根据侧链控制信息中指示的每个数据包优先级字段, 结

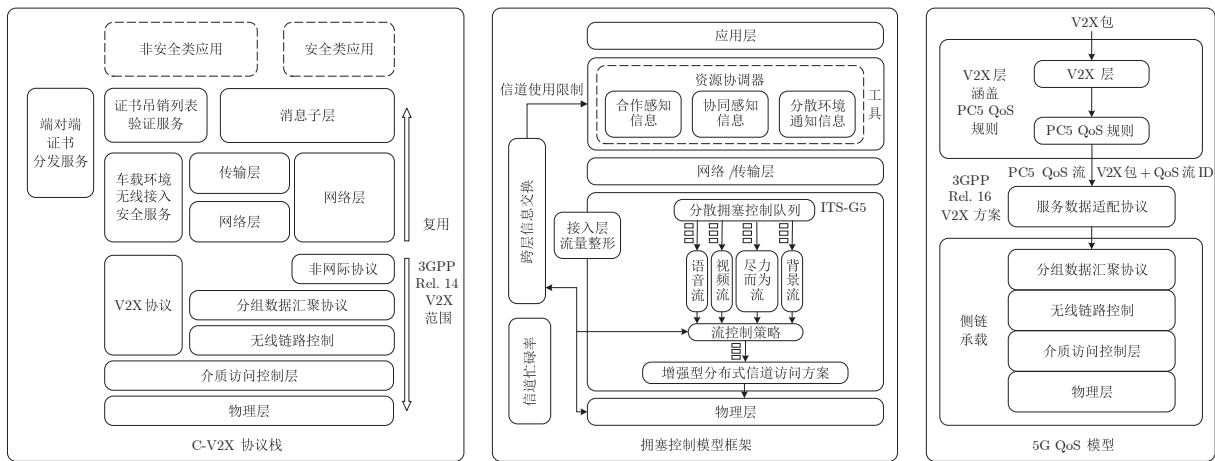


图 6 C-V2X 协议栈与传输控制  
Fig.6 C-V2X protocol stack and transmission control

表 2 车联网技术与标准的对应关系  
Table 2 The relationship between car networking technology and standards

标准	C-V2X			
	DSRC	C-ITS	LTE-V2X	NR-V2X
通信协议	IEEE 802.11p IEEE 1609.2/3/4 SAE J2735 SAE J2945	IEEE 802.11p ETSI specifications (ITS-G5/C-ITS protocol stack)	3GPP R14,15 SAE J3161	3GPP R16 SAE J3161



合信道忙率测量上报(用户体验感知结果和地理位置),每个信道忙率都对应一个信道占用率限制,当用户的信道占用率超过限制,则自动降低信道占用率以缓解信道拥塞。

功率控制可以调节网络覆盖,从而促进无线信道拥塞的改善<sup>[52]</sup>。文献[46]讨论了现有拥塞控制算法在 DSRC 和 C-V2X 信道传输中的适用性和效率,得出现有 DSRC 中的拥塞控制机制需要进一步演进以适应 C-V2X 信道环境的结论。文献[53]在 LTE-V2X sidelink 4 工作模式下,讨论了不同车辆密度对传输子帧功率的影响,通过对车辆信道状态的感知以实现发射功率的动态调节,从而提高数据包接收率;文献[54]结合信道感知与功率调度,提出基于信道忙率的拥塞控制方案,测试结果认为资源分配会导致丢包问题。文献[55]在 C-V2X 协议栈顶层植入 SAE J2945/1 算法,得出 LTE-V2X 网络中传输功率控制在控制数据包接收率方面的作用有限,认为速率控制对网络性能的影响更为显著。文献[56]认为 J2945/1 中传输功率与速率控制的联合优化策略在 C-V2X 环境下会变差。文献[57]将 J2945/1 移植到 C-V2X 通信环境,通过高速公路场景的仿真分析,认为原功率控制、速率控制以及两者的平衡算法均不适用,揭示了 LTE-V2X 的半持久机制将导致连续丢包,指出未来 C-V2X 环境的标准拥塞控制算法需要重新定义。由于需要综合管理 C-V2X 网络中的不同传输模式(单播、组播或广播、周期性或实时触发等),文献提出结合多因素和优先级的拥塞控制模型,如图 6 所示,可用于对 V2X 服务/应用程序进行更细粒度的资源管理。在此基础上,文献[58]在相邻车辆之间设计了异构信道资源分配策略,通过对多车之间的信道资源进行分布式协调处理,相较于标准化分散拥塞控制方法具有更好的性能。因此,已有 DSRC 中的拥塞控制标准无法直接用于 C-V2X 网络,需要重新根据 C-V2X 通信中的信道模型、控制元件的各个输入、信道繁忙率和车辆密度之间形成的新关系进一步研究。

无线网络中的流量控制,可以对各传输环节的流量进行调节并动态更新,有利于缓解 V2X 信道的流量拥塞。文献[59]提出流量整形并结合信道调整参数的查表方法来调节传输速率。文献[60]设计了一种消息速率自适应线性化方法,可以根据目标信道状态调整聚集广播信息的传输速率。文献[61]在 MAC 层之上和竞争转发层之下添加了“关守”,使用关守和 LIMERIC 作为速率自适应算法,此方案提高了混合数据流量在可靠性和延迟方面的性能。现有在对 V2X 通信的分布式拥塞控制研究中,

很少考虑用户服务质量保障需求。文献[62]提出一种服务质量(Quality of service, QoS)感知的流控架构,定义了两种工作模式,利用 J2945/1 算法用于传输功率和速率控制,在确保信道忙率基础上确定工作模式,可以获得 J2945/1 规定的信道忙率降低效果。文献[63]在 NR V2X 网络中,提出基于信道拥塞的重传控制,通过感知信道拥塞状态以决策数据包重传的方案。3GPP Rel.16 为 NR V2X 网络定义了 5G QoS 模型,该模型中的 5G QoS 流是 5GS 中流量转发处理的最细颗粒,颗粒转发策略包括调度策略、队列管理策略、速率整形策略、无线链路层控制配置等<sup>[64]</sup>。5G QoS 模型如图 6 所示,首先将 V2X 应用数据包映射到 V2X 层的 QoS 流,映射策略为 PC5 QoS 规则,不同 QoS 流由 PC5 QoS 流标识进行分区;然后通过 NR Uu 无线资源控制信令提供给用户体验的规则,将 QoS 流映射到侧链进行承载,其中从 QoS 流到无线承载的映射在服务数据适配协议层执行<sup>[15]</sup>。5G NR-V2X 采用了基于 QoS 流的控制模型用于侧链的单播、组播和广播服务,对应无线资源控制连接态和空闲态的 PC5 数据流均定义了标准化业务流程,但对应拥塞控制算法还未确定,下一步还需对 QoS 数据流与传输速率和功率的协同控制及平衡之间建立置换关系及统一表达模型,从而实现 NR-V2X 信道优化及高性能通信服务。

### 2.1.3 C-V2X 与 MEC 融合技术

5GS 与 ECN 的融合部署,有利于降低端到端传输时延,缓解终端或路侧基础设施的计算与存储压力,减少大量数据回传造成的网络负载量<sup>[65]</sup>。文献[66]在德国 A9 高速公路 30 公里沿途部署了 MEC 平台,测试并验证了车辆可以使用 LTE 以低于 20 毫秒的端到端延迟交换信息。欧洲 5GCroCo 项目测试了跨国之间的 5G 网联汽车之间的通信切换,未来将部署合作防撞(Anticipated cooperative collision avoidance, ACCA)等服务,每辆车自动检测路面危险事件并共享 ACCA 服务<sup>[67]</sup>。部署 ACCA 服务的挑战之一是实现来自不同设备制造商的 OBU(集成的 V2X 模组与协议)之间的互操作,5GCroCo 项目联合了沃尔沃、标致雪铁龙、雷诺和爱立信等 20 多个合作伙伴实施了 ACCA 的跨境示范应用,为基于 MEC 的大区域智能网联车辆之间的互操作商用奠定了基础。文献[68]利用 OBU 和 MEC 平台搭建了 ACCA 组件的演示环境,测量了不同 V2X 信息流的端到端延时,验证了不同汽车设备制造商之间 V2X 协议之间互操作的可行性。根据网联车辆与 MEC 交互场景和应用需求,可以将 C-V2X 与 MEC 融合场景分类为表 3 所示。为了

表 3 MEC 与 C-V2X 融合场景示例  
Table 3 Example of MEC and C-V2X integration scenarios

交互场景	应用	交互场景	应用
单车与 MEC 交互	V2X 信息下发	多车与 MEC 协同交互	网联多车协同驾驶
	动态高精度地图		车路云协同感知
	车载信息增强		
单车与 MEC 及路侧智能设施交互	车辆在线诊断	多车与 MEC 及路侧智能设施协同交互	匝道合流辅助
	危险驾驶提醒		路口通行辅助
	网联辅助驾驶		路网协同调度
	网联安全接管		

推动 C-V2X 与 MEC 融合能够更快的发展, IMT-2020 C-V2X 工作组组织了 MEC 与 C-V2X 测试床立项征集工作, 共获批创建 10 个 MEC 与 C-V2X 融合测试床项目, 旨在加速发展基于 MEC 的车路云协同应用场景测试与解决方案。

传统网络由于公用数据网网关集中设置在核心节点, 用户流量需要绕行公用数据网网关造成网络边缘时延较难获得优化, 而 5G 将网元拆分为 5GC 和 UPF, 5G UPF 的下沉部署, 通过 5G 非独立接入 (Non standalone access, NSA) 和独立接入 (Standalone access, SA) 共模基站, 实现网联车辆的就近接入, 业务引流与执行相应的计费策略<sup>[69]</sup>。同时, ECN 通过部署虚拟化的边缘网关设备, 针对车辆装配的 OBU 发起的 C-V2X 接入的业务控制功能下移到边缘网关设备, 避免流量在网络中的绕行。中国移动在苏州建设 MEC 与 C-V2X 融合测试床环境, 其组网架构如图 7 所示。考虑到智能网联车路云协同系统的低时延需求, 将 UPF 下沉至区域汇聚机房, 由边缘计算节点提供 UPF 本地分流服务, 利用承载网络与地市现网系统架构演进网关对接, 从而实现业务分流与计算下沉, 进而降低端到端时延和核心带宽压力。

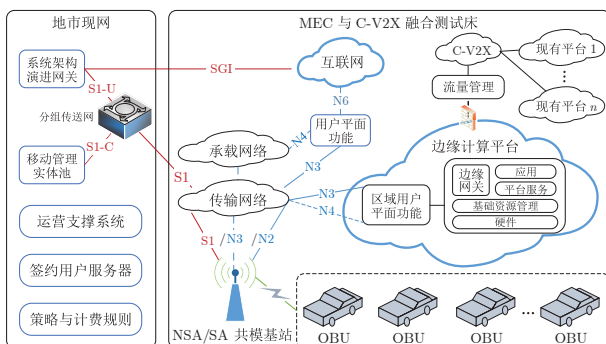


图 7 MEC 与 C-V2X 融合测试床组网架构图  
Fig. 7 Networking architecture of MEC and C-V2X integration testbed

## 2.2 智能网联融合定位

HPPS 为智能网联车路云协同系统提供核心能力支撑, 是支持自动驾驶与精准位置服务中的重要一环<sup>[70]</sup>。现有主流定位技术可分为多卫星组合定位技术、蜂窝定位技术、基于智能传感器的定位技术和局域网定位技术四类。

### 2.2.1 多卫星组合定位

目前, 中国北斗三号卫星系统全球覆盖运行, 卫星单系统的单点定位精度通常可达到米级, 楼宇遮挡和隧道等场景的实际定位结果往往偏离真实位置数米到十几米, 无法满足车道级定位与导航的要求。卫星组合系统通过获得多星座的定位数据, 不仅可以提高单点定位精度, 并且能缩短收敛时间<sup>[71]</sup>。吴有龙等<sup>[72]</sup> 对多个全球导航卫星系统 (Global navigation satellite system, GNSS) 组合全球卫星的定位性能进行评估, 验证了双系统和四系统融合能显著提高系统的可用性。卢望等<sup>[73]</sup> 等从星座操作、信号互操作、时间互操作和坐标互操作等方面开展北斗三号系统与其他 GNSS 系统间的融合设计, 提升了全球北斗定位精度及性能。布金伟等<sup>[74]</sup> 利用多星座实验监测网 (北斗系统/准天顶卫星系统及其组合系统) 的观测数据, 通过对组合系统数据进行解证, 可以明显改善信号易遮挡的复杂环境 (如城市、建筑物密集区、山区、树林等) 下的精密单点定位性能。

### 2.2.2 蜂窝定位

蜂窝网络定位通过移动通信的基站信号差异来计算手机所在位置, 基站下行发送定位参考信号, 终端计算不同小区间定位参考信号的到达时间差, 通过定位算法得到定位结果<sup>[75]</sup>。由于受移动通信信道噪声和多径传播干扰等影响, 蜂窝网络定位精度取决于待定位区域的基站数及分布<sup>[76]</sup>。2G 到 4G 的演进中, 由于空口可用、可控制的资源不断扩展, 促进了定位增强技术的发展及定位精度的提升<sup>[77]</sup>。5G 技术的广泛应用使得大量新技术涌现, 5G 蜂窝网

络的超密集组网可以提高小区覆盖能力, 优化其覆盖质量及定位精度<sup>[78]</sup>; 大规模阵列天线技术使 5G 基站具有测距和测角的双重功能; 低时延、高可靠的特性可以保证位置服务过程中的实时性和稳定性、毫米波通信和智能波束赋形使信号具有更佳的指向性, 可以减轻到达时间、到达时间差测量受多径信号的干扰程度<sup>[79]</sup>. 5G-V2X 通信系统中, 利用 PC5 接口的 V2V 通信与协同定位, 可以降低定位网络的部署成本, 而且有利于实现室内外一体化定位及场景适应性<sup>[80]</sup>.

### 2.2.3 基于智能传感器的定位

基于智能传感器的定位方案有利于网联车辆定位在全路况场景的连续可用, 如惯性测量单元 (Inertial measurement unit, IMU) 中的加速度计, 通过测量线性加速度并进行积分运算, 可以得到运动体的运动速度和位置信息<sup>[81]</sup>. 惯性导航定位属于自主式且无需要外界信息参与, 但其定位误差会逐渐累加, 需要在导航过程不断进行状态修正以保障定位精度<sup>[82]</sup>. 此外, 惯性定位需要结合高性能的传感器器件, 在行业终端中集成应用的成本高<sup>[83]</sup>. 多传感器的融合应用可以克服复杂环境下的无法定位或定位精度不足的问题, 充分利用组合传感器信息并对惯导系统相关参数进行误差校正和反馈, 对于自主导航领域多种应用需求具有重要意义<sup>[84-85]</sup>. 在一般的交通场景下, 智能传感器在数据采集过程中通过滤波方式即可获得较高的定位精度. 然而, 要实现全场景的高精度定位, 例如城市密集区域和极端天气等复杂环境, 建立一个稳定的数据融合框架尤为重要.

### 2.2.4 局域网定位

局域网定位通过测量待定位节点与锚节点之间的无线电波信号强度特征, 根据接收信号到达时间、到达时间差和接收信号强度等方法, 可以推算待定位节点的位置<sup>[86]</sup>. 基于 V2X 的局域网定位技术充分利用车载自组网和易于与现有 GNSS、基站等定位方案进行整合的优势, 通过协作定位方式提升网联车辆定位的精度及连续性. 如 Li 等<sup>[87]</sup> 基于多车系统的分布式随机极值搜索控制器, 通过获得每辆车本地目标函数数据以及与相邻车辆的相对位置数据, 从而实现多辆网络化车辆的融合定位技术. 孙宁等<sup>[88]</sup> 在传统 GPS 和毫米波雷达获取车辆定位信息的基础上, 设计基于雷达集成的多车协同定位方法, 依据 GPS 定位信息对本车位置进行估计, 再通过车车通信接收周围车辆发来的根据其 GPS 测定的位置及其与该车相对位置而估计的该车位置信息, 从而对信息进行融合并获得更为精确的位置信

息. 谯小康等<sup>[89]</sup> 在 GPS 卫星导航和车辆自身航位推算基础上, 利用车辆之间的到达时间观测和车辆到车辆的实时通信以实现协同定位. Chu 等<sup>[90]</sup> 利用多个相邻车辆周围反射器之间的相关性, 提出了一种反射器选择和估计算法, 可以实现多车辆并发建图与定位. Song 等<sup>[91]</sup> 提出基于主链和侧链融合的车载区块链架构的多车协同定位校正框架, 以提高系统安全性、可靠性和车辆定位精度. Xiao 等<sup>[92]</sup> 融合来自车载传感器和车辆 V2X 技术的多源异构信息, 定义了一种车辆自定位和多目标相对定位的统一框架, 将城区的协同定位精度提升到 0.2 m 以内. Liu 等<sup>[93]</sup> 提出在车辆超密集网络中的 V2X 集成定位方法, 将 V2I、V2V 与惯性测量传感器进行数据融合, 结合基于几何的 K 均值聚类算法进行锚点优选, 仿真结果显示可以实现 18.7% 精度性能提升. 然而在多径和非视距环境下, 多径信号叠加会导致接收信号强度值显著波动、到达时间测量受非视距时延扩展影响误差较大等问题<sup>[94]</sup>. 此外, 国内外研究者在融合定位的实证方面进行了研究, 从而为引入 V2X 的融合定位系统设计提供参考. 如 Schwarzbach 等<sup>[95]</sup> 在德国 Dresden 测试区域, 采用 V2X 协作组网以增强 GNSS 位置估计进行了实证, 同时评估了协作定位在非视距和多径场景下的不同性能影响. Du 等<sup>[96]</sup> 搭建了支持 V2V 通信的 OBU 测试平台, 实时记录网联车辆的 V2V 通信、位置、速度、加速度和方向角数据, 通过对多源数据的融合, 可以准确表达车辆换道行为的过程.

由上述定位研究可以看出, 以融合定位为代表的高精度定位逐步成为车路云协同系统的定位技术研究的主导方法<sup>[10]</sup>, 部分典型融合定位技术方案的技术对比见表 4.

### 2.2.5 高精度融合定位演进

中国正在规划并发展以北斗卫星导航系统 (Beidou navigation satellite system, BDS)、5G 为代表的智能化、综合性的数字交通基础设施. 空间卫星数量的增加 (包含中高轨导航多系统<sup>[105-106]</sup> 和低轨导航增强卫星<sup>[107]</sup> 等)、网联汽车自组网<sup>[95]</sup>、车辆配备传感器的不断拓展<sup>[108]</sup> 以及边缘云网络的部署等, 基于多卫星系统组合、多传感器融合、分布式和分阶段解算的融合定位方案呈现越来越明显的发展趋势<sup>[109-110]</sup>. 国内外精密定位服务龙头企业已推出车规级高精度定位产品及方案, 表 5 是车载定位模块的供应商 u-blox 推出的高精度产品的性能指标示例, 包括 GPS、格洛纳斯 (Glonass, GLO)、伽利略 (Galileo, GAL) 和 BDS.

今后, 智能网联车路云协同系统需要充分利用

表 4 现有典型融合定位方案的技术对比  
Table 4 Technical comparison of existing typical fusion positioning solutions

定位技术方案	传感器	精度	优势	缺点
GPS 与 IMU 融合定位 <sup>[97]</sup>	GPS & IMU	7.2 m (RMSE)	低成本	低精度、信号可用性差
带有道路标记检测与视觉融合的定位 <sup>[98]</sup>	GPS & IMU & 摄像头	经度: 1.43 m 纬度: 0.58 m	低成本	易受光照和观察角度的影响
基于短距雷达的即时定位与地图构建 <sup>[99]</sup>	GPS & IMU & 雷达	经度: 0.38 m 纬度: 0.07 m	低功耗、低成本、高精度	对动态环境的鲁棒性低
基于激光雷达的即时定位与地图构建 <sup>[100]</sup>	GPS & IMU & 激光雷达	经度: 0.017 m 纬度: 0.033 m	高精度、对环境变化具有鲁棒性	高成本、高功耗和处理能力需求、对天气状况敏感
基于 5G 的定位 <sup>[101]</sup>	5G 通信设备	水平方向: 0.3 m ~ 10 m 垂直方向: 2 m ~ 3 m	高精度	需要依托 5G 基站
V2V 和板载传感器定位 <sup>[102]</sup>	GPS & V2V 通信 & 测距传感器	0.6 m	不依赖于所有车辆能够通信	需要安装板载的测距传感器
基于车距和信噪比的加权定位 <sup>[103]</sup>	GPS & V2V 通信	0.25 m ~ 0.85 m (结合网络大小配置)	提高鲁棒性和准确性	依赖车辆之间的通信链路
基于 RTK 测量与惯性辅助的 GPS 定位 <sup>[104]</sup>	GPS & IMU & RTK 接收器	0.05 m ~ 0.08 m	提高定位的鲁棒性, 且可用于 GPS 无覆盖区域的定位性	需要部署 RTK 基站功能

表 5 不同 GNSS 模式下的定位精度  
Table 5 Positioning accuracy in different GNSS modes

GNSS	GPS + GLO + GAL + BDS	GPS + GLO + GAL	GPS + GAL	GPS + GLO	GPS + BDS	GPS
位置速度时间	1.5 m CEP	1.5 m CEP	1.5 m CEP	1.5 m CEP	1.5 m CEP	1.5 m CEP
水平位置精度	星基增强系统	1.0 m CEP	1.0 m CEP	1.0 m CEP	1.0 m CEP	1.0 m CEP
	RTK	0.01 m + 1 ppm CEP	0.01m + 1ppm CEP	0.01m + 1 ppm CEP	0.01m + 1 ppm CEP	0.01m + 1 ppm CEP
高程位置精度	RTK	0.01 m + 1 ppm R50	0.01 m + 1 ppm R50	0.01 m + 1 ppm R50	0.01 m + 1 ppm R50	0.01 m + 1 ppm R50

多种定位设施及数据源, 将各定位子系统 (GNSS 和实时动态 (Real-time kinematic, RTK)、公众移动网、无线局域网、惯性测量单元和车载探测装置等)、路网场景 (道路类型、路口、出入口和停车场等) 和定位模式 (一级融合和二级融合, 局部或全域高精地图选择, 以及不同行驶场景、不同阶段选择对应的融合策略等) 进行深度耦合并研究相应的自适应滤波容错、误差修正及场景匹配机制等, 结合全域或局部高精度地图引擎, 构建车路云协同的多源信息融合高精度定位系统。

### 2.3 智能网联测试与评价

面向智能网联车路云协同试验场的建设内容通常包括仿真测试、封闭场地测试、半开放道路和开放道路测试, 首先开展基础性联网信息服务类的测试, 逐步拓展到高速公路和城市道路复杂场景下“人-车-路-云”系统的协同服务测试。虚拟仿真测试一般覆盖可预测的全部场景, 封闭场地测试通常覆盖自动驾驶系统正常状态下的典型功能和极限场景, 半开放道路和开放道路测试主要覆盖典型场景组合的道路、随机场景及随机要素组合的道路, 以验证自动驾驶功能应对有限场景和随机场景的能力。

从车路云协同测试系统的架构可以看出, 车路云协同测试场景库是场景的载体平台, 通过场景数

据采集、分析挖掘、测试验证等步骤, 实现内容闭环。在车路云协同场景测试可以采用主动测量和被动测量两种方案, 前者通过车载传感器获取行车周围环境信息, 或向网络、服务器、应用中发送探测数据包, 通过对数据包所受影响而发生的变化进行分析, 测得网络性能<sup>[111]</sup>; 被动测量常用于监测类场景, 通过设定的规则条件接收相应的监测数据, 如在网络中布置测量装置来捕获数据包, 监测网络通信状况并进行分析从而测得网络性能<sup>[112]</sup>。目前, 网联场景测试将集成上述的两类的测试。

#### 2.3.1 仿真平台

目前, 用于网联场景的虚拟仿真平台主要包括两类, 分别是道路交通仿真软件和网络仿真软件<sup>[113]</sup>。为了同步评估网联场景下的各单车的组网性能及交通流的通行效率之间的相互作用, 网联场景的仿真通常将两类仿真软件进行深度耦合<sup>[114]</sup>。其中道路交通软件负责模拟车辆 (或车队) 的协同控制特性并常被作为网络仿真的输入, 网络仿真软件则负责模拟网联车辆的通信与组网特性, 针对网联车辆的数据传输、接收以及仿真场景下的负载、路由、链路和信道进行报文级仿真<sup>[115]</sup>。在网络仿真领域, 典型的开源仿真软件包括 OMNeT++<sup>[116]</sup>、NS-2<sup>[117]</sup>、NS-3<sup>[118]</sup> 等<sup>[119]</sup>, 商业化网络仿真软件主要有 OPNET<sup>[120]</sup>、

OMNEST<sup>[121]</sup>、QualNet<sup>[122]</sup> 等。较为成熟的交通仿真器包括 SUMO<sup>[123]</sup>、VISSIM<sup>[124]</sup>、PARAMICS<sup>[125]</sup>、TransModeler<sup>[126]</sup>、TRANSIM<sup>[127]</sup>、CORSIM<sup>[128]</sup> 和 PanoSim<sup>[129]</sup> 等。Veins 开发环境集成了多种仿真界面, 不同模拟器之间通过 TCP socket 进行通信, 可用于网联场景下的网络仿真与地图可视化仿真<sup>[130]</sup>; 根据合作式智能运输系统车用通信系统应用层及数据交互标准 (第 2 阶段) 中定义的协作式变道场景<sup>[131]</sup>, 基于仿真环境构建并测试验证, 仿真实验可以支撑智能网联车路云场景设计与功能调整, 从而可以缩短实车测试的周期。

仿真测试通过对传感器、车辆、控制器、交通环境等要素进行定义并进行场景测试及有效性验证, 根据实际工作场景需要及验证目标对象的不同, 可以分为: 模型在环测试、软件在环测试、硬件在环测试、驾驶员在环测试和实车在环测试等。模型在环测试指在开发环境下对模型进行仿真; 软件在环测试指在系统功能开发阶段建立软件环境进行模拟并测试; 硬件在环测试通过用真实组件部分替换原始模型来建立真实的测试环境; 驾驶员在环测试则利用动态驾驶员模拟器、环境视听模拟设备及相关人车检测设备重现“人-车-环境”的真实场景; 实车在环测试将高级驾驶辅助系统集成到真实车辆中, 并通过实时仿真机及仿真软件模拟道路、交通场景以及传感器信号, 从而构成完整测试系统方法, 可实现高级驾驶辅助系统功能验证、各场景仿真测试、与整车相关电控系统的匹配及集成测试<sup>[132]</sup>。与传统的软/硬件在环测试相比, 实车在环测试由于引入了实际车辆, 从而提高了被测控制器性能的精确度, 并且仿真测试可以快速的建立测试场景和工况配置, 使得如高级驾驶辅助系统算法等类似功能迭代开发变得容易, 并为实际部署奠定技术基础<sup>[133]</sup>。如李骁驰等<sup>[134]</sup> 开发智能网联汽车室内测试台架, 能够模拟试验场的交通场景构建、测试场景复现和单一要素分析, 支持智能网联交通的柔性场景测试, 从而有效提高网联场景下结合实车开发和测试的效率。

### 2.3.2 实车测试

智能网联车路云协同系统通过封闭场地、半开放道路和开放道路的真实场景测试, 推动虚拟仿真转向落地应用。国内外针对实车测试的初期大多选择六大应用场景: 高速/环路、市内运行、城际/郊区、泊车/取车、封闭园区和室内/室外, 要求测试设备能够实时准确全面地记录测试过程中各项参数, 以加速探索和优化技术成熟度尚未达到推广应用要求的网联车辆在运行过程中出现的各种技术问题<sup>[135]</sup>; 后者侧重被测系统在开放道路环境下的稳定性、可

靠性, 要求试验后能完全还原系统误报、漏报等问题事件, 为开发人员提供问题优化、系统升级的数据支撑<sup>[136]</sup>。例如, 美国密歇根大学建立名为 MCity 智能驾驶测试基地, 设置城市各类道路场景, 验证不同场景下网联车辆执行智能驾驶任务的有效性和可靠性<sup>[137]</sup>。同济大学研究团队在江苏省太仓市以及河北省廊坊市的实际道路上构建智能驾驶的实验系统, 验证智能驾驶与主动交通控制系统之间的协同工作及可行性<sup>[138]</sup>。

智能网联车路云协同系统的商用需要大规模的实车测试, 将具备智能驾驶和车路云协同功能的单车、多车及系统置于实际交通场景中, 通过道路环境和交通参与者等元素随机组合的场景输入, 以实现智能网联车辆与道路、设施及其他交通参与者的相互适应与协调, 验证并不断完善车辆面对真实复杂道路场景的安全行驶能力。

### 2.3.3 智能网联性能评价指标

LTE/5G-V2X 网络为智能网联车路云协同系统的运行提供了核心支撑, 分析智能网联应用技术与车路云协同产品的研究现状, 梳理出智能网联核心测试指标与典型场景的限定性技术要求, 将有利于推动产业协同创新、系统研发并加速落地应用。Fan 等<sup>[139]</sup> 在开放道路的实测过程中, 以被测车辆的车速和车间距进行联合建模, 获得 V2V 和 V2I、静态和动态、视距和非视距等不同场景下的系统通信性能与对应指标。Kong 等<sup>[140]</sup> 设计了基于 LTE-V、航位推算和 RTK 定位的车载单元, 并以动态和静态两种实地测试场景对车载单元的延迟、数据包丢失率、定位精度性能进行测试。Avcil 等<sup>[141]</sup> 构建了由 OMNET++、Veins 和 SUMO 集成的仿真环境, 通过对 V2X 网络的性能进行实验分析, 认为车辆密度和数据需求增加会对网络时延和可靠性带来不利影响, 需要进一步对网络资源进行合理分配以确保服务质量。Hofer 等<sup>[142]</sup> 首次将实时基于几何的随机信道模型参数用于实车在环中进行 V2X 通信系统测试, 收集试验场和实车在环测试场景中的信号强度和包误差率数据, 验证了两个场景中的性能指标的一致性, 这为结合实时更新基于几何的随机信道模型参数的实车在环测试系统用于实测分析奠定理论依据。Ahmad 等<sup>[143]</sup> 选取马来西亚班吉大学校园内的区域和工程建筑环境学院室内 2 个区域场景, 提取了 LTE 信号强度、端到端时延和吞吐量性能指标。Wang 等<sup>[144]</sup> 在高速公路场景, 获得了 5.9 GHz 频段的直道和弯道、静态和动态场景的 V2V 和 V2I 链路的覆盖范围、丢包率及时延等性能指标。表 6 为已有文献设定的智能网联测试性能指标, 勾选项

表 6 网联测试主要性能指标

Table 6 Key performance indicators of connectivity test

文献编号	时延	丢包率 (可靠性)	吞吐量	通信范围	数据包 投递率	信号强度
[139-140, 145]	√	√	—	—	—	—
[146]	√	√	√	—	—	—
[101]	√	—	√	—	—	√
[147]	—	—	—	√	√	√
[148]	√	—	—	—	√	—
[144, 149]	√	√	—	√	—	—
[150]	√	√	—	—	√	—

为对应文献涉及到的性能指标. 总之, 网联场景的测试场景可分为静态和动态测试、视距和非视距、短包和长包测试、V2V 和 V2I (拓展到 V2X 的各种模式)、直道和交叉路口和弯道等.

在未来相当长时间内, 中国将基于 5G/LTE-V2X 网络支撑车路云协同系统的建设与发展<sup>[151]</sup>. 3GPP 针对不同承载方式均提出对应场景需求指标, 随着 5G-LTE NSA 网络架构部署及后续演进, 未来将需要完成服务场景与技术指标的统一. 3GPP 针对 LTE-V2X 定义了 27 个车路协同应用场景, 并给出 7 种典型场景性能要求, V2X 需支持的通用业务性能要求如表 7 所示<sup>[152]</sup>. 针对 5G NR-V2X, 3GPP 定义了未来更高等级的自动驾驶需求, 定义了 25 个用例并归纳成编队行驶、先进驾驶、传感器扩展、远程驾驶和基本需求五类场景, 场景需求指标如表 8 所示<sup>[153]</sup>. 综合以上分析, 可总结出智能网

联车路云协同系统中典型测试场景可依据道路类别、自动驾驶业务场景、测试数据和通信对象等分类, 主要的测试性能评价指标包括时延、丢包率/可靠性 (单次传输和累积传输可靠性)、吞吐量、通信范围、数据包投递率、接收信号强度、数据速率 (绝对速率和相对速率) 等.

### 3 发展趋势

智能网联车路云协同系统将向协同组网与控制方向发展, 业界需加紧互操作性测试与合作, 大规模接入需要部署边缘智能服务, 新型融合系统亟待应用安全建设等. 为此, 提出以下 4 个方面的挑战、机遇和前进方向.

1) 协同组网与控制技术. 未来智能网联车路云协同场景可分为车辆队列组网与控制、空地网联组网与控制两个层面, 如图 8 所示. 前者可分为车内控制、车队结构和车间通信三个模块, 车内控制指为保持安全编队的车辆纵向控制动力学建模, 车队结构是指队列中车辆之间关联结构与队列稳定性控制, 车间通信为能够适应高速移动、动态拓扑的环境感知和车路云协同网络. Li 等<sup>[154]</sup> 基于多智能体系统理论设计了车辆队列分布式控制的四元素架构, 为基于一致性的车辆队列控制系统建模与分析提供了统一框架, 欧洲 HORIZON 2020 计划也将其作为编队项目 ENSEMBLE 的控制框架<sup>[155]</sup>. 后者受益于北斗地基增强、RTK 和高精地图<sup>[156]</sup> 的建设, 推动空地网联的协同组网研究与发展. 文献 [157-158] 在智能网联系统中部署了具有缓存功能的 UAV 基

表 7 LTE-V2X 典型场景通信性能要求<sup>[152]</sup>Table 7 LTE-V2X communication performance requirements in typical scenarios<sup>[152]</sup>

典型场景	有效范围 (m)	绝对移动速度 (km/h)	终端相对速度 (km/h)	最大时延 (ms)	单次传输可靠性 (%)	累积传输可靠性 (%)
主干道	200	50	100	100	90	99
限速高速公路	320	160	280	100	80	96
不限速高速公路	320	280	280	100	80	96
非视距/城市	150	50	100	100	90	99
城市交叉路口	50	50	100	100	95	—
校园/商业区	50	30	30	100	90	99
碰撞前	20	80	160	20	95	—

表 8 NR-V2X 典型应用场景需求指标<sup>[153]</sup>Table 8 Scenario diagram of cooperative networking and control<sup>[153]</sup>

业务场景	通信时延 (ms)	数据速率 (Mbit/s)	通信距离 (m)	通信可靠性 (%)
编队行驶	10 ~ 25	0.012 ~ 65	80 ~ 350	99.990
先进驾驶	3 ~ 100	10 ~ 53	360 ~ 700	99.999
传感器扩展	3 ~ 100	10 ~ 1000	50 ~ 1000	99.999
远程驾驶	5	上行 25; 下行 1	无限制	99.999

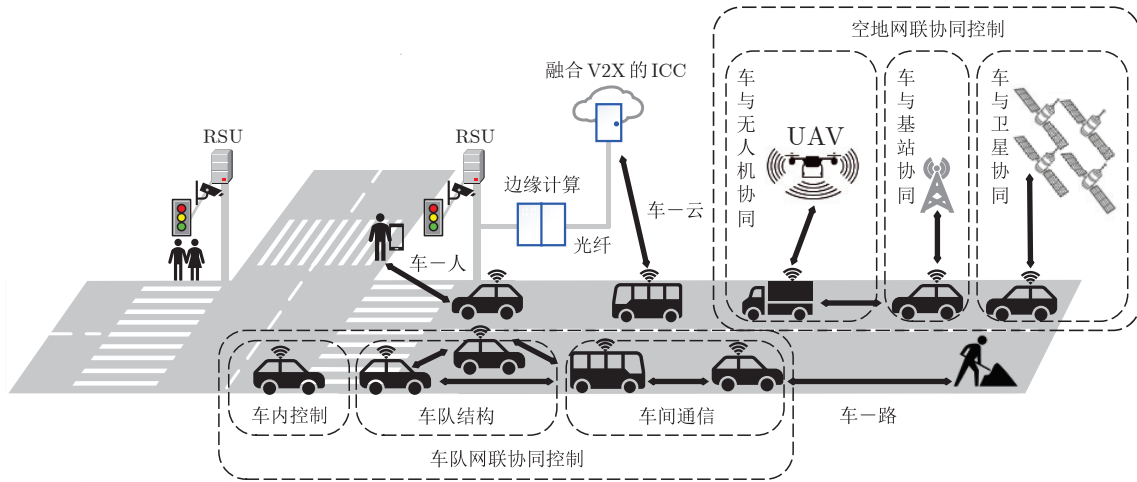


图 8 协同组网与控制场景

Fig.8 NR-V2X typical application scenario demand index

站, 可以充分发挥空地资源共享的优势; 文献 [159] 采用 UAV 的分层部署方案, 高层 UAV 负责网联车辆的通信和总体监视工作, 低层 UAV 执行热点区域的覆盖任务, 从而最大程度地保障 V2X 网络的吞吐性能. Abbasi 等<sup>[160]</sup> 将 UAV 视作空中通信中继站, 通过对车载轨迹的感知以实现 V2X 节点之间的中继转发服务. Demir 等<sup>[161]</sup> 考虑车辆用户的等待时间和回程链路的容量限制, 以 UAV 作为飞行部署的 RSU, 建模并求解该 UAV 的最优悬停时长和系统功耗. 为此, 智能网联车路云协同新架构下人-车-路-云多元共融, 网络拓扑时空动态多变, 以及大量同频、异频终端接入<sup>[162]</sup>, 需要研究混合交通场景下多元分布式协同机制<sup>[163-168]</sup>、融合 QoS 感知的车联网组网数据播发<sup>[165]</sup> 以及面向分层智能决策的自主任务分配与跨层协同控制方法等. 此外, 文献 [166-188] 的基于智能网联的生态驾驶在车辆队列和交叉路口<sup>[172-188]</sup> 等场景下的应用, 也已成为研究热点, 这也是该技术走向实际应用所迫切需要解决的现实问题.

2) 互操作技术. 智能网联车路云协同系统内 V2V、V2I、V2P 和 V2C 等服务模式共存, 业界需要在“三跨”、“四跨”和“新四跨”基础上, 进一步完成标准体系建设与不断升级<sup>[173-174]</sup>. 同时, 需加速推进新一代车载 V2X 融合终端和云控系统、路侧基础设施、智慧交通系统与智慧城市等的标准化研发与发展, 综合 ECN 与 HPPS 等的部署和技术演进, 推进产业链全面联动并融合发展<sup>[175]</sup>.

3) 边缘智能服务. 未来相当长时间内智能网联车路云协同系统将采用分阶段、分区域的建设方案, 各阶段、各区域建设的系统本身也存在通信、存储和计算方面的资源约束, 采用云网协同、算网融合

的发展思路有利于系统的有序落地并应用<sup>[176-177]</sup>. 文献 [178-179] 在车路云协同架构中, 利用 MEC 平台进行边缘计算与存储协同, 优化了智能网联车辆的接入服务性能. Feng 等<sup>[180]</sup> 为 5G-V2X 与边缘融合系统设计了多车与多缓存资源单元的通信资源分配机制、车辆任务与多 MEC 服务器的计算卸载策略, 在保证网络稳定性的同时优化了功耗、缓存溢出概率和请求响应时延. Li 等<sup>[181]</sup> 引入了无人机辅助多用户、多服务器的 MEC 环境中的卸载决策和资源分配方案, 优化了系统的延迟和能耗. 上述研究大多处于仿真与实验验证阶段. 未来随着入网车辆数目的规模增加, 边缘网络资源调度与优化服务方面仍有很多问题需要解决, 如复杂交通场景下的动态资源管理<sup>[182]</sup>、集中式车辆检测模型与高效计算服务<sup>[183]</sup> 等. 并且, 5G UPF 下沉到承载网且分布式部署, 将导致对应的业务端口的下移, 5G 现网需要梳理新场景下的端边云协同以及移动承载网与固定承载网双平面之间的网络架构与互操作需求.

4) 安全技术. ICV 网络拓扑动态变化, 通信过程中节点高速切换时, 任何伪造节点与恶意攻击都可能导致单车系统故障以及区域交通瘫痪, 因此智能车辆安全互信认证技术需要面对大范围移动、拓扑变化快和高频接入/解除等问题<sup>[184]</sup>. 吴武飞等<sup>[185]</sup> 在对智能网联车辆架构下的车载网络进行剖分基础上, 给出了网络安全设计的约束分析, 并对车载网入侵检测技术进行了重点阐述. 同时, 融入区块链的分布式架构可以提高大规模车辆分布式访问控制的安全性, 结合车路云协同场景下多实体、多角色的数据共享需求, 构造基于多属性的层级访问策略框架, 相比集中式架构更为有效<sup>[186]</sup>. Jabbar 等<sup>[187]</sup> 提出一种去中心化安全解决方案, 用于实现车辆与交

通系统中其他参与者之间的安全保密通信. Khan 等<sup>[188]</sup>为云雾网络架构下的 V2X 通信系统引入微区块链技术, 相比公共区块链方法可减少签名和合法验证的时间, 且可优化系统开销. 因此, 智能网联车路云协同系统需要重新进行安全架构设计以及系统成本、可用性、一致性、稳定性和保密性等, 根据敏感业务需求对符合条件的各通路及资源进行优化调度, 做到保证安全且节约系统整体开销.

## 4 结束语

B5G/6G、新能源和人工智能的发展, 引发了全球汽车产业格局与产业生态的重新构建, 为汽车产业变革与升级带来战略机遇. 面向智能网联车路云协同系统的发展现状与加速产业化需要, 本文介绍了新型车路云融合系统、智能网联 V2X 通信系统、云控系统和车路云协同测试系统等总体架构设计. 当前全国智能网联车路云协同试验场正在全面建设的背景下, 从智能网联 V2X 组网、融合定位和测试评价三个关键技术方面进行了分析, 重点在协同组网与控制、互操作、差异化服务和安全等相关技术进行了现状分析与前沿展望, 旨在加速推进智能网联车路云协同系统从理论研究到实际应用的转换, 为实现未来人-车-路-云一体化协同作业下自动驾驶和下一代智慧交通系统的创新与变革提供技术参考与发展思路.

## References

- Li Ke-Qiang, Dai Yi-Fan, Li Sheng-Bo, Bian Ming-Yuan. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2017, **8**(1): 1-14  
(李克强, 戴一凡, 李升波, 边明远. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状与趋势. *汽车安全与节能学报*, 2017, **8**(1): 1-14)
- Yin Y F, Miller M A, Ceder A. Framework for deployment planning of bus rapid transit systems. *Transportation Research Record*, 2005, **1903**(1): 11-19
- Wright J L. Aashto's vehicle infrastructure integration activities(VII). In: Proceedings of the 12th World Congress on Intelligent Transport Systems. San Francisco, USA: IEEE, 2009. 299-305
- Mallejacq P, Boussuge J. The serti euroregional project: Achievements and perspective. In: Proceedings of the 2009 Intelligent Transportation Society of America-12th World Congress on Intelligent Transport Systems. San Francisco, USA: IEEE, 2009. 5851-5856
- Degrande T, Van den Eynde S, Vannieuwenborg F, Colle D, Verbrugge S. C-ITS road-side unit deployment on highways with ITS road-side systems: A techno-economic approach. *IET Intelligent Transport Systems*, 2021, **15**(7): 863-874
- Fujimoto A, Kanoshima H, Sakai K, Ogawa M. Nationwide on: Road trials of smartway in Japan. In: Proceeding of the 16th ITS World Congress. Stockholm, Sweden, 2009. 1-3
- Li Ke-Qiang, Li Jia-Wen, Chang Xue-Yang, Gao Bo-Lin, Xu Qing, Li Sheng-Bo. Principles and typical applications of cloud control system for intelligent and connected vehicles. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2020, **11**(3): 261-275  
(李克强, 李家文, 常雪阳, 高博麟, 许庆, 李升波. 智能网联汽车云控系统原理及其典型应用. *汽车安全与节能学报*, 2020, **11**(3): 261-275)
- Cai K, Tian Y, Liu X, Fatikow S, Wang F, Cui L, et al. Modeling and controller design of a 6-DOF precision positioning system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, **104**: 536-555
- Siegel J E, Erb D C, Sarma S E. A survey of the connected vehicle landscape-architectures, enabling technologies, applications, and development areas. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, **19**(8): 2391-2406
- Kuutti S, Fallah S, Katsaros K, Dianati M, McCullough F, Mouzakitis A. A survey of the state-of-the-art localization techniques and their potentials for autonomous vehicle applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, **5**(2): 829-846
- Avino G, Bande P, Frangoudis P A, Vitale C, Casetti C, Chiasserini C F. A MEC-based extended virtual sensing for automotive services. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2019, **16**(4): 1450-1463
- Giannone F, Frangoudis P A, Ksentini A, Valcarengi L. Orchestrating heterogeneous MEC-based applications for connected vehicles. *Computer Networks*, 2020, **180**: 1-14
- Chen Hong, Guo Lu-Lu, Gong Xun, Gao Bing-Zhao, Zhang Lin. Automotive control in intelligent era. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(7): 1313-1332  
(陈虹, 郭露露, 宫洵, 高炳钊, 张琳. 智能时代的汽车控制. *自动化学报*, 2020, **46**(7): 1313-1332)
- 3GPP TS 23.287 V16.5.0: Architecture enhancements for 5G system (5GS) to support vehicle-to-everything (V2X) services (Release 16) [Online], available: <https://portal.3gpp.org/ChangeRequests.aspx?q=1&specnumber=23.287>, September 1, 2022
- Garcia M H C, Molina-Galan A, Boban M, Gozalvez J, Coll-Perales B, Sahin T, et al. A tutorial on 5G NR V2X communications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, **23**(3): 1972-2026
- Kato M, Fujii M. A study on time efficiency of CSMA/CA in inter-vehicle communication systems. In: Proceeding of the 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics. Osaka, Japan: 2019. 60-63
- ETSI TS 103 574 V1.1.1: Congestion control mechanisms for the C-V2X PC5 interface access layer part [Online], available: [https://portal.etsi.org/webapp/workprogram/Report\\_WorkItem.asp?WKI\\_ID=53970](https://portal.etsi.org/webapp/workprogram/Report_WorkItem.asp?WKI_ID=53970), September 1, 2022
- Tsukada M, Oi T, Kitazawa M, Esaki H. Networked roadside perception units for autonomous driving. *Sensors*, 2020, **20**(18): 5320
- Garlichs K, Gunther H J, Wolf L C. Generation rules for the collective perception service. In: Proceedings of the 2019 IEEE Vehicular Networking Conference. Los Angeles, USA: 2019. 1-8
- Thandavarayan G, Sepulere M, Gozalvez J. Redundancy mitigation in cooperative perception for connected and automated vehicles. In: Proceedings of the 2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference. Antwerp, Belgium: 2020. 1-5
- Delooz Q, Festag A. Network load adaptation for collective perception in V2X communications. In: Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Connected Vehicles and Expo. Graz, Austria: 2019. 1-6
- Allig C, Wanielik G. Dynamic dissemination method for collective perception. In: Proceedings of the 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Auckland, New Zealand: 2019. 3756-3762
- Tian Bin, Zhao Xiang-Mo, Xu Zhi-Gang, Wang Miao, Zhang



- Yu-Qin. NRT-V2X: Adaptive data dissemination protocol for traffic efficient of connected and automated highways. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, **32**(6): 293–307 (田彬, 赵祥模, 徐志刚, 王淼, 张宇琴. 车路协同条件下智能网联高速公路通行效率信息自适应分发协议: NRT-V2X. 中国公路学报, 2019, **32**(6): 293–307)
- 24 Aoki S, Higuchi T, Altintas O. Cooperative perception with deep reinforcement learning for connected vehicles. In: Proceedings of the 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Las Vegas, USA: IEEE, 2020: 328–334
- 25 Zheng J, Huang M. Traffic flow forecast through time series analysis based on deep learning. *IEEE Access*, 2020, **8**: 82562–82570
- 26 Wang P, Zhang J, Deng H, Zhang M. Real-time urban regional route planning model for connected vehicles based on V2X communication. *Journal of Transport and Land Use*, 2020, **13**(1): 517–538
- 27 Ozkan M F, Ma Y. A predictive control design with speed previewing information for vehicle fuel efficiency improvement. In: Proceedings of the 2020 American Control Conference. Denver, USA: IEEE, 2020: 2312–2317
- 28 Yan L, Shen H. Top: Optimizing vehicle driving speed with vehicle trajectories for travel time minimization and road congestion avoidance. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 2019, **4**(2): 1–25
- 29 Cao L, Wei S L, Misao A. Early warning method for traffic safety based on information entropy model of accident data. *Advances in Transportation Studies*, 2020: 71–82
- 30 中国智能网联汽车产业创新联盟. 智能网联汽车技术路线图 2.0[Online], available: <http://www.caicv.org.cn/>, April 1, 2022
- 31 Li Sheng-Bo, Guan Yang, Hou Lian, Gao Hong-Bo, Duan Jing-Liang, Liang Shuang, et al. Key technique of deep neural network and its applications in autonomous driving. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2019, **10**(2): 119–145 (李升波, 关阳, 侯廉, 高洪波, 段京良, 梁爽, 等. 深度神经网络的关键技术及其在自动驾驶领域的应用. 汽车安全与节能学报, 2019, **10**(2): 119–145)
- 32 Zhong N, Zhang F, Zhang J, Peng L. Edge-enabled C-V2X infrastructure deployment for promoting advanced driving assistant systems in large-scale environment. *SAE Technical Paper*, 2020: 1–5
- 33 Praise J J, Raj R J S, Benifa J V B. Development of reinforcement learning and pattern matching based firewall for secured cloud infrastructure. *Wireless Personal Communications*, 2020, **115**(2): 993–1018
- 34 Brahim M B, Menouar H. Optimizing V2X data collection and storage for a better cost and quality trade-off. In: Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT). Bali, Indonesia: IEEE, 2017: 7–12
- 35 Desai V, Dinesha H A. A hybrid approach to data pre-processing methods. In: Proceedings of the 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology. Bangluru, India: IEEE, 2020: 1–4
- 36 Autonomous cars generate more than 300 tb of data per year [Online], available: <https://www.tuxera.com/blog/autonomous-cars-300-tb-of-data-per-year>, May 12, 2022
- 37 中国智能网联汽车产业创新联盟. 智能网联汽车产品测试评价白皮书[Online], available: <http://www.caicv.org.cn>, April 1, 2022
- 38 Khan M I, Sesia S, Harri J. In vehicle resource orchestration for multi-V2X services. In: Proceedings of the 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference. Honolulu, Hawaii, USA: IEEE, 2019: 1–5
- 39 Kühlmorgen S, Schmagel P, Festag A, Fettweis G. Simulation-based evaluation of ETSI ITS-G5 and cellular-VCS in a real-world road traffic scenario. In: Proceedings of the 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference. Chicago, Illinois, USA: IEEE, 2018: 1–6
- 40 Pandi S, Arranz R T, Nguyen G T, Fitzek F H. Massive video multi-casting in cellular networks using network coded cooperative communication. In: Proceedings of the 15th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference. Vegas, Nevada, USA: IEEE, 2018: 1–2
- 41 Shao Wen-Juan, Shen Qing-Guo. Survey of software defined D2D and V2X communication. *Journal on Communications*, 2019, **40**(4): 179–194 (邵雯娟, 沈庆国. 软件定义的D2D和V2X通信研究综述. 通信学报, 2019, **40**(4): 179–194)
- 42 Jayakumar S. A review on resource allocation techniques in D2D communication for 5G and B5G technology. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 2021, **14**(1): 243–269
- 43 Cheng X, Yang L, Shen X. D2D for intelligent transportation systems: A feasibility study. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, **16**(4): 1784–1793
- 44 Abd-Elrahman E, Said A M, Toukabri T, Afifi H, Marot M. Assisting V2V failure recovery using device-to-device communications. In: Proceedings of the Wireless Days. Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2015: 1–3
- 45 Gan Bing-Hong. Internet of vehicles C-V2X technology principle and test solution. *Information and Communications Technology and Policy*, 2019, (6): 84–89 (甘秉鸿. 车联网C-V2X技术原理及测试解决方案. 信息通信技术与政策, 2019, (6): 84–89)
- 46 Bazzi A. Congestion control mechanisms in IEEE 802.11p and sidelink C-V2X. In: Proceedings of the 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers. Pacific Grove, California, USA: IEEE, 2019: 1125–1130
- 47 SAE J2945/1: On-board system requirements for V2V safety communications [Online], available: [https://www.sae.org/standards/content/j2945/1\\_201603/](https://www.sae.org/standards/content/j2945/1_201603/), September 1, 2022
- 48 ETSI TS 103 175: Cross layer DCC management entity for operation in the ITS G5A and ITS G5B medium [Online], available: [https://portal.etsi.org/webapp/workprogram/Report\\_WorkItem.asp?WKI\\_ID=39345](https://portal.etsi.org/webapp/workprogram/Report_WorkItem.asp?WKI_ID=39345), September 1, 2022
- 49 On-board system requirements for LTE-V2X V2V Safety Communications [Online], available: <https://www.sae.org/standards/content/j3161/1/>, May 12, 2022
- 50 ETSI TS 102 687 V1.2.1: Decentralized Congestion Control Mechanisms for Intelligent Transport Systems Operating in the 5 GHz Range Access Layer Part [Online], available: [https://portal.etsi.org/webapp/workprogram/Report\\_WorkItem.asp?WKI\\_ID=41973](https://portal.etsi.org/webapp/workprogram/Report_WorkItem.asp?WKI_ID=41973), September 1, 2022
- 51 3GPP TS 38.214 V16.6.0: Technical specification group radio access network, physical layer procedures for data (Release 16) [Online], available: <https://portal.3gpp.org/ChangeRequests.aspx?q=1&specnumber=38.214>, September 1, 2022
- 52 Kloiber B, Harri J, Strang T. Dice the TX power-improving awareness quality in VANETs by random transmit power selection. In: Proceedings of the 2012 IEEE Vehicular Networking Conference. Seoul, South Korea: IEEE, 2012: 56–63
- 53 Kang B, Jung S, Bahk S. Sensing-based power adaptation for cellular V2X mode 4. In: Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks. Seoul, South Korea: IEEE, 2018: 1–4
- 54 Mansouri A, Martinez V, Harri J. A first investigation of congestion control for LTE-V2X mode 4. In: Proceedings of the 15th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services. Wengen, Switzerland: IEEE, 2019: 56–63
- 55 Toghi B, Saifuddin M, Fallah Y P, Mughal M O. Analysis of

- distributed congestion control in cellular vehicle-to-everything networks. In: Proceedings of the 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference. Honolulu, USA: IEEE, 2019. 1–7
- 56 Yoon Y, Kim H. Balancing power and rate control for improved congestion control in cellular V2X communication environments. *IEEE Access*, 2020, **8**: 105071–105081
- 57 Shimizu T, Cheng B, Lu H, Kenney J. Comparative analysis of DSRC and LTE-V2X PC5 mode 4 with SAE congestion control. In: Proceedings of the 2020 IEEE Vehicular Networking Conference. New York, USA: 2020. 1–8
- 58 Khan M I, Sepulcre M, Harri J. Cooperative wireless congestion control for multi-service V2X communication. In: Proceedings of the 2020 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Las Vegas, Nevada, USA: 2020. 1357–1363
- 59 Vesco A, Scopigno R, Casetti C, Chiasserini C F. Investigating the effectiveness of decentralized congestion control in vehicular networks. In: Proceedings of the 2013 IEEE Globecom Workshops. Atlanta, Georgia, USA: 2013. 1314–1319
- 60 Bansal G, Kenney J B, Rohrs C E. LIMERIC: A linear adaptive message rate algorithm for DSRC congestion control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, **62**(9): 4182–4197
- 61 Kühlmorgen S, Lu H, Festag A, Kenney J. Evaluation of congestion-enabled forwarding with mixed data traffic in vehicular communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, **21**(1): 233–247
- 62 Choi J, Kim H. A QoS-aware congestion control scheme for C-V2X safety communications. In: Proceedings of the 2020 IEEE Vehicular Networking Conference. New York, USA: 2020. 1–4
- 63 Naik G, Park J M J, Ashdown J. C<sup>2</sup> RC: Channel congestion-based re-transmission control for 3GPP-based V2X technologies. In: Proceedings of the 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Seoul, South Korea: 2020. 1–6
- 64 3GPP TS 23.501 V16.4.0: System Architecture for the 5G System (5GS) Stage 2 (Release 16) [Online], available: <https://portal.3gpp.org/ChangeRequests.aspx?q=1&specnumber=23.501>, September 1, 2022
- 65 Qiu H, Qiu M, Lu R. Secure V2X communication network based on intelligent pki and edge computing. *IEEE Network*, 2019, **34**(2): 172–178
- 66 NOKIA. Car2MEC Project [Online], available: <https://www.nokia.com/about-us/news/releases/2019/03/21/continental-deutsche-telekom-fraunhofer-esk-mhp-and-nokia-successfully-conclude-tests-of-connected-driving-technology-on-the-a9-digital-test-track>, May 12, 2022
- 67 Kousaridas A, Schimpe A, Euler S, Vilajosana X, Fallgren M, Landi G, et al. 5G cross-border operation for connected and automated mobility: Challenges and solutions. *Future Internet*, 2019, **12**(1): 5
- 68 Sedar R, Vazquez-Gallego F, Casellas R, Vilalta R, Munoz R, Silva R, et al. Standards-compliant multi-protocol on-board unit for the evaluation of connected and automated mobility services in multi-vendor environments. *Sensors*, 2021, **21**(6): 2090
- 69 边缘计算产业联盟(ECC), 网络5.0产业和技术创新联盟(N5A). 运营商边缘计算网络技术白皮书 [Online], available: <http://www.eccconsortium.org/Lists/show/id/376.html>, April 1, 2022
- 70 Michler A, Schwarzbach P, Ubler H, Tauscher P, Michler O. A V2X based data dissemination scheme for 3D map aided GNSS positioning in urban environments. In: Proceedings of the 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems. Rhodes, Greece: IEEE, 2020. 1–6
- 71 Wei Er-Hu, Liu Xue-Xi, Wang Ling-Xuan, Liu Jing-Nan. Analysis and evaluation of precision single point positioning accuracy of BDS/GPS combination. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, **43**(11): 1654–1660 (魏二虎, 刘学习, 王凌轩, 刘经南. BDS/GPS组合精密单点定位精度分析与评价. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, **43**(11): 1654–1660)
- 72 Wu You-Long, Yang Zhong, Chen Wei-Na, Yao Wen-Jin, Chen Chuang, Chen Shuai. Satellite availability evaluation on a global scale for BDS stand-alone system and multi-GNSS system. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2021, **41**(1): 18–23 (吴有龙, 杨忠, 陈维娜, 姚文进, 陈闯, 陈帅. 北斗单系统及多GNSS系统组合全球卫星可用性分析. 弹箭与制导学报, 2021, **41**(1): 18–23)
- 73 Lu Yun, Su Chen-Geng, Hu Min, Tang Zu-Ping, Yuan Hai-Bo, Xu Jun-Yi, et al. Interoperability implementation and performance analysis of beidou-3 system. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2021, **51**(1): 26–39 (卢隰, 宿晨庚, 胡敏, 唐祖平, 袁海波, 徐君毅, 等. 北斗三号系统互操作实现与性能分析. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2021, **51**(1): 26–39)
- 74 Bu Jin-Wei, Zuo Xiao-Qing, Jin Li-Xin, Chang Jun. Localization performance evaluation of BDS/QZSS and its combined systems in China, Japan and surrounding areas. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, **45**(4): 574–585 (布金伟, 左小清, 金立新, 常军. BDS/QZSS及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, **45**(4): 574–585)
- 75 Forghani M, Karimipour F, Claramunt C. From cellular positioning data to trajectories: Steps towards a more accurate mobility exploration. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, **117**: 102666
- 76 Abdelbar M, Buehrer R M. Improving cellular positioning indoors through trajectory matching. In: Proceedings of the 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Savannah, Georgia, USA: 2016. 219–224
- 77 Campos R S. Evolution of positioning techniques in cellular networks, from 2G to 4G. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017, **2017**: 1–17
- 78 Reyna-Orta A, Andrade A G. Dimensionality reduction to solve resource allocation problem in 5G UDN using genetic algorithm. *Soft Computing*, 2021, **25**(6): 4629–4642
- 79 Lin Z, Lv T, Zhang J A, Liu R P. Tensor-based high-accuracy position estimation for 5G mmwave massive MIMO systems. In: Proceedings of the ICC IEEE International Conference on Communications. Dublin, Ireland: IEEE, 2020. 1–6
- 80 Duan Xu-Ting, Tian Da-Xin, Wang Yun-Peng. Vehicle cooperative positioning enhancement method based on V2X communication networks. *Automotive Engineering*, 2018, **40**(8): 947–951, 959 (段续庭, 田大新, 王云鹏. 基于V2X通信网络的车辆协同定位增强方法. 汽车工程, 2018, **40**(8): 947–951, 959)
- 81 Li K, Li W. Uniform nonlinear error model based on gibbs parameter for the INS. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**(6): 7725–7735
- 82 Shangguan Wei, Xie Chao-Xi, Jiang Wei. Optimization method for integrated train positioning accuracy based on IMU calibration compensation. *Journal of the China Railway Society*, 2020, **42**(2): 57–64 (上官伟, 谢朝曦, 姜维. 基于IMU标定补偿的列车组合定位优化方法. 铁道学报, 2020, **42**(2): 57–64)
- 83 Nezhadshahbodaghi M, Mosavi M R, Hajialinajar M T. Fusing denoised stereo visual odometry, INS and GPS measurements for autonomous navigation in a tightly coupled approach. *GPS Solutions*, 2021, **25**(2): 1–18

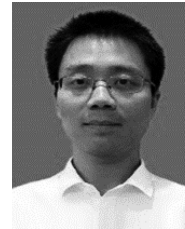
- 84 Min H, Wu X, Cheng C, Zhao X M. Kinematic and dynamic vehicle model-assisted global positioning method for autonomous vehicles with low-cost GPS/camera/in-vehicle sensors. *Sensors*, 2019, **19**(24): 5430
- 85 Chang L, Niu X J, Liu T Y, Tang J, Qian C. GNSS/INS/LiDAR-SLAM integrated navigation system based on graph optimization. *Remote Sensing*, 2019, **11**(9): 1009
- 86 Hu L, Li Z, Yang X, Wei C. WLAN indoor positioning method based on gradient boosting and particle filtering. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 2019, **14**(6): 535–545
- 87 Li Z, You K, Song S. Cooperative source seeking via networked multi-vehicle systems. *Automatica*, 2020, **115**: 108853
- 88 Sun Ning, Yan Meng-Ru, Ni Jie, Ge Ru-Hai, Qin Hong-Mao, Tang Yi-Ming, et al. A study on multi-vehicle cooperative positioning based on GRI. *Automotive Engineering*, 2018, **40**(4): 488–493, 499  
(孙宁, 闫梦如, 倪捷, 葛如海, 秦洪懋, 唐翊铭, 等. 基于GRI的多车协同定位研究. *汽车工程*, 2018, **40**(4): 488–493, 499)
- 89 Qiao Xiao-Kang, Qu Xiao-Mei. Vehicle to vehicle-based distributed cooperative sensing positioning for internet of vehicles. *Control Theory & Applications*, 2021, **38**(7): 988–996  
(谁小康, 屈小媚. 基于车辆与车辆的车联网分布式协同感知定位. *控制理论与应用*, 2021, **38**(7): 988–996)
- 90 Chu X H, Lu Z M, Gesbert D, Wang L H, Wen X M. Vehicle localization via cooperative channel mapping. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, **70**(6): 5719–5733
- 91 Song Y X, Yu R, Fu Y C, Zhou L, Boukerche A. Multi-vehicle cooperative positioning correction framework based on vehicular blockchain. In: Proceedings of the 9th ACM Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications. Miami Beach, USA: 2019. 23–29
- 92 Xiao Z, Yang D, Wen F, Jiang K. A unified multiple-target positioning framework for intelligent connected vehicles. *Sensors*, 2019, **19**(9): 1967
- 93 Liu Q, Liu R, Wang Z, Han L, Thompson J S. A V2X integrated positioning methodology in ultra-dense networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, **8**(23): 17014–17028
- 94 Wang K, Yu X, Xiong Q Y, Zhu Q W, Lu W, Huang Y, et al. Learning to improve WLAN indoor positioning accuracy based on DBSCAN-KRF algorithm from RSS fingerprint data. *IEEE Access*, 2019, **7**: 72308–72315
- 95 Schwarzbach P, Michler A, Tauscher P, Michler O. An empirical study on V2X enhanced low-cost GNSS cooperative positioning in urban environments. *Sensors*, 2019, **19**(23): 5201
- 96 Du L, Chen W, Pei Z, Ji J, Tong B, Zheng H. Design of data acquisition system with high precision for lane-change behavior detection applied in intelligent and connected vehicles. In: Proceedings of the 11th International Conference on Information Science and Technology. Chengdu, China: 2021. 697–701
- 97 Zhang F, Stahle H, Chen G, Simon C C C, Buckl C, Knoll A. A sensor fusion approach for localization with cumulative error elimination. In: Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems. Hamburg, Germany: 2012. 1–6
- 98 Suhr J K, Jang J, Min D, Jun H G. Sensor fusion-based low-cost vehicle localization system for complex urban environments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2016, **18**(5): 1078–1086
- 99 Ward E, Folkesson J. Vehicle localization with low cost radar sensors. In: Proceedings of the 2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Gothenburg, Sweden: 2016. 864–870
- 100 Castorena J, Agarwal S. Ground-edge-based LIDAR localization without a reflectivity calibration for autonomous driving. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, **3**(1): 344–351
- 101 Hong Xue-Min, Xu Xue-Ting, Peng Ao, Sun Tian, Tang Gui-Min, Yang Qi, et al. Key technologies and system architecture evolution of fusion position based on 5G mobile communication systems. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2021, **60**(3): 571–585  
(洪学敏, 许雪婷, 彭敖, 孙甜, 汤贵敏, 杨琦, 等. 基于5G移动通信系统融合定位的关键技术与系统架构演进. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2021, **60**(3): 571–585)
- 102 Fujii S, Fujita A, Umedu T, Kaneda S, Yamaguchi H, Higashino T, et al. Cooperative vehicle positioning via V2V communications and onboard sensors. In: Proceedings of the 2011 IEEE Vehicular Technology Conference. San Francisco, USA: 2011. 1–5
- 103 Altoaimy L, Mahgoub I. Fuzzy logic based localization for vehicular ad hoc networks. In: Proceedings of the 2014 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Vehicles and Transportation Systems. Orlando, Florida, USA: 2014. 121–128
- 104 Lai C, Guo R. Extend the RTK survey to GNSS-Denied areas using a low-cost inertial-aided positioning pole. In: Proceedings of the 34th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. St. Louis, Missouri: 2021. 3212–3226
- 105 Wang D, Lv H, An X, Wu J. A High-accuracy constrained SINS/CNS tight integrated navigation for high-orbit autonomous transfer vehicles. *Acta Astronautica*, 2018, **151**: 614–625
- 106 Huang Ling-Yong, Liu Yu-Xi, Xin Guo-Dong, Zhu Lei-Ming, Li Wu, Zhang Huan. Performance analysis of different system precise point positioning. *Journal of National University of Defense Technology*, 2017, **39**(3): 30–35  
(黄令勇, 刘宇玺, 辛国栋, 朱雷鸣, 李五, 张欢. 不同系统组合的精密单点定位性能分析. *国防科技大学学报*, 2017, **39**(3): 30–35)
- 107 Zhang Xiao-Hong, Ma Fu-Jian. Review of the development of LEO navigation-augmented GNSS. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, **48**(9): 1073–1087  
(张小红, 马福建. 低轨导航增强GNSS发展综述. *测绘学报*, 2019, **48**(9): 1073–1087)
- 108 Li Q Q, Chen L, Li M, Shaw S L, Nuchter A. A sensor-fusion drivable-region and lane-detection system for autonomous vehicle navigation in challenging road scenarios. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, **63**(2): 540–555
- 109 Wang B, Sun D, Zu H, Wu C, Zhang D S, Chen X H. Fusion positioning system based on IMU and roadside LiDAR in tunnel for C-V2X use. In: Proceedings of the 2020 SAE 3rd International Forum on Connected Automated Vehicle Highway System through the China Highway and Transportation Society. Jinan, China: 2020. 1–6
- 110 Chu Xing-He, Lu Zhao-Ming, Wang Lu-Han, Wu Mu-Qing, Wen Xiang-Ming. Multi-path assisted cooperative radio-based localization for connected vehicles. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2021, **44**(2): 116–123  
(初星河, 路兆铭, 王鲁晗, 武穆清, 温向明. 多径信号辅助的网联车辆无线协作定位. *北京邮电大学学报*, 2021, **44**(2): 116–123)
- 111 Zhang Jia-Bo, Li Zhe, Wang Chao-Fan. Performance test and analysis of LTE network for car network. *Computer Engineering*, 2018, **44**(7): 303–307, 315  
(张家波, 李哲, 王超凡. 面向车联网的LTE网络性能测试与分析. *计算机工程*, 2018, **44**(7): 303–307, 315)
- 112 Kutila M, Kauvo K, Aalto P, Martinez V G, Niemi M, Zheng Y. 5G Network performance experiments for automated car functions. In: Proceedings of the 2020 IEEE 3rd 5G World Forum. Bangalore, India: 2020. 366–371
- 113 Azlan N N N, Rohani M M. Overview of application of traffic simulation model. In: Proceedings of the 2018 MATEC Web of Conferences. Penang, Malaysia: 2018. 1–6

- 114 Ma Jian, Sun Shou-Zeng, Rui Hai-Tian, Ma Yong, Wang Lei, Liu Hui, et al. A summary of academic research on China's traffic engineering. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, **6**: 1-161  
(马建, 孙守增, 芮海田, 马勇, 王磊, 刘辉, 等. 中国交通工程学术研究综述. 中国公路学报, 2016, **6**: 1-161)
- 115 Wang Run-Min, Deng Xiao-Feng, Xu Zhi-Gang, Zhao Xiang-Mo. Survey on simulation testing and evaluation of Internet of vehicles. *Application Research of Computers*, 2019, **36**(7): 1921-1926, 1939  
(王润民, 邓晓峰, 徐志刚, 赵祥模. 车联网仿真测试评价技术研究综述. 计算机应用研究, 2019, **36**(7): 1921-1926, 1939)
- 116 Nardini G, Sabella D, Stea G, Thakkar P, Virdis A. Simu5G-an OMNeT++ library for end-to-end performance evaluation of 5G networks. *IEEE Access*, 2020, **8**: 181176-181191
- 117 Li T. Research on TCP/IP congestion control based on NS-2 network congestion control based on NS-2 network simulation platform. *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, **78**(19): 1737-1745
- 118 Rudenkova M. A methodology of modeling the IEEE 802.11 wireless LAN using NS-3. In: Proceedings of the 2020 International Conference on Information Technologies in Engineering Education. Moscow, Russia: 2020. 1-4
- 119 Ghimire A, Badi A. Underwater acoustic channel propagation module for simulation of large-scale sub-aquatic internet of things (IoT) networks in jist/swans. In: Proceedings of the 2018 SoutheastCon. St. Petersburg, Florida, USA: 2018: 1-4
- 120 Yun W, Wei L H, Hui H Z. Study of VANET in intelligent transportation system based on OPNET. *International Journal of Control and Automation*, 2016, **9**(5): 199-206
- 121 Meyer H, Odyurt U, Polstra S, Paradas E, Alonso I G, Pimentel A D. On the effectiveness of communication-centric modeling of complex embedded systems. In: Proceedings of the 2018 IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Ubiquitous Computing & Communications, Big Data & Cloud Computing, Social Computing & Networking, Sustainable Computing & Communications. Melbourne, Australia: 2018. 979-986
- 122 Aireen G, Mohan C E, Pooja C H, Pooja F T, Raghuram K M. Wireless network simulation and analysis using qualnet. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems. Coimbatore, India: 2017. 251-255
- 123 Leite B, Azevedo P, Leixo R, Rossetti R J F. Simulating a three-lane roundabout using SUMO. In: Proceedings of the 2019 International Conference on Intelligent Transport Systems. Cham, Switzerland: 2019. 18-31
- 124 Maduranga K L D, Yasamali R G N, Sathyaprasad I M S, Weerakoon H U. Selection of optimum junction operation strategy for gatambe intersection using VISSIM simulation. In: Proceedings of the 2018 International Conference on Sustainable Built Environment. Singapore, Singapore: 2018. 22-35
- 125 Reza I, Ratroun N T, Rahman S M. Calibration protocol for paramics microscopic traffic simulation model: Application of neuro-fuzzy approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2016, **43**(4): 361-368
- 126 Song Z, Wang H, Sun J, Tian Y. Experimental findings with VISSIM and TransModeler for evaluating environmental and safety impacts using micro-simulations. *Transportation research record*, 2020, **2674**(8): 566-580
- 127 Kim T, Hobeika A G, Jung H. Evaluation of the performance of vehicle-to-vehicle applications in an urban network. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2018, **22**(3): 218-228
- 128 Cobos C, Erazo C, Luna J, Mendoza M, Gaviria C, Arteaga C, et al. Multi-objective memetic algorithm based on NSGA-II and simulated annealing for calibrating CORSIM micro-simulation models of vehicular traffic flow. In: Proceedings of the 2016 Conference of the Spanish Association for Artificial Intelligence. Cham, Switzerland: 2016. 468-476
- 129 Lu Z, Du Z, Zhu X. Research on automatic generation method of scenario based on panosim. In: Proceedings of the 4th International Conference on Compute and Data Analysis, ACM International Conference Proceeding Series. Silicon Valley, San Jose, USA: 2020. 159-163
- 130 Sommer C, German R, Dressler F. Bidirectionally coupled network and road traffic simulation for improved IVC analysis. *IEEE Transactions on mobile computing*, 2010, **10**(1): 3-15
- 131 Application Layer and Data Interaction Standard of Vehicle Communication System for Cooperative Intelligent Transportation System (The second stage), T/CSAE 157-2020, 2020  
(合作式智能运输系统车用通信系统应用层及数据交互标准(第二阶段), T/CSAE 157-2020, 2020)
- 132 Fayazi S A, Vahidi A, Luckow A. A Vehicle-in-the-loop (VIL) verification of an all-autonomous intersection control scheme. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, **107**: 193-210
- 133 Zhang Y, Lu S, Yang Y, Guo Q. Internet-distributed vehicle-in-the-loop simulation for HEVs. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 2018, **67**(5): 3729-3739
- 134 Li Xiao-Chi, Zhao Xiang-Mo, Xu Zhi-Gang, Wang Run-Min, Wang Wen-Wei. Modular flexible test bed for intelligent and connected transportation system. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, **32**(6): 137-146  
(李骁驰, 赵祥模, 徐志刚, 王润民, 王文威. 面向智能网联交通系统的模块化柔性试验场. 中国公路学报, 2019, **32**(6): 137-146)
- 135 Zhang X, Wang R, Zhao X, Xu Z, Zeng F. Experimental study on performance of V2X communication applied in typical traffic systems in a closed test scenario. In: Proceedings of the 20th COTA International Conference of Transportation Professionals. Xi'an, China: 2020. 812-824
- 136 Klapez M, Grazia C A, Casoni M. Application-level performance of IEEE 802.11p in safety-related V2X field trials. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, **7**(5): 3850-3860
- 137 Zhang Y, Kang T P, Flannagan M, Bao S, Pradhan A, Sullivan J. Hazard cuing systems for teen drivers: A test-track evaluation on mcity. In: Proceedings of the 2019 SAE World Congress Experience. Detroit, USA: 2019. 1-7
- 138 Zheng Ling-Yu, Zhao Yi, Wang Zhong-Yu, Wu Bing. Level of service evaluation of urban streets based on user perception. *Journal of Natural Science Tongji University*, 2016, **44**(5): 753-757  
(郑玲钰, 赵益, 王忠宇, 吴兵. 基于用户感知的城市道路交通服务水平评价方法. 同济大学学报(自然科学版), 2016, **44**(5): 753-757)
- 139 Fan Y, Liu L, Dong S, Zhuang L, Qiu J, Cai C, et al. Network performance test and analysis of LTE-V2X in industrial park scenario. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2020, (2020): 1-12
- 140 Kong H, Chen W, Fu S, Zheng H, Du L, Mao Y. OBU design and test analysis with centimeter-level positioning for LTE-V2X. In: Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Information and Safety. Liverpool, UK: 2019. 383-387
- 141 Avcil M N, Soyuturk M. Performance evaluation of V2X communications and services in cellular network with a realistic simulation environment. In: Proceedings of the 1st International Informatics and Software Engineering Conference. Ankara, Turkey: 2019. 1-6
- 142 Hofer M, Bernado L, Rainer B, Xu Z N, Temme G, Khan S, et al. Evaluation of vehicle-in-the-loop tests for wireless V2X com-

- munication. In: Proceedings of the 2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference. Honolulu, USA: 2019. 1–5
- 143 Ahmad S, Musleh S, Nordin R. The gap between expectation & reality: Long term evolution & third generation (3G) network performance in campus with test mobile system. In: Proceedings of the 9th Asia Modelling Symposium. Kuala Lumpur, Malaysia: 2015. 164–168
- 144 Wang Y, Liu X, Peng X, Du H. Research on LTE-V2X out-field expressway performance testing method in the 5.9 GHz band. In: Proceedings of the IEEE 3rd International Conference on Computer and Communication Engineering Technology. Beijing, China: 2020. 284–288
- 145 Liu Ding-Bei, Zhang Xin-Rui, Wang Run-Min, Li Xiao-Chi, Xu Zhi-Gang. DSRC-based vehicle network communication performance in closed field test. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2020, **10**(3): 180–187  
(刘丁贝, 张心睿, 王润民, 李晓驰, 徐志刚. 封闭测试场条件下基于DSRC的车联网通信性能测试. *汽车工程学报*, 2020, **10**(3): 180–187)
- 146 Duan Zong-Tao, Zheng Xi-Bin, Li Ying, Kang Jun, Wang Chao. WiFi network testbed oriented Internet of vehicles. *Microelectronics & Computer*, 2015, **32**(7): 90–94  
(段宗涛, 郑西彬, 李莹, 康军, 王超. 车联网环境下的WiFi网络实验床. *微电子学与计算机*, 2015, **32**(7): 90–94)
- 147 Mir Z H, Filali F. Simulation and performance evaluation of vehicle-to-vehicle (V2V) propagation model in urban environment. In: Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation. Bangkok, Thailand: 2016. 394–399
- 148 Shi M, Lu C, Zhang Y, Yao D Y. DSRC and LTE-V communication performance evaluation and improvement based on typical V2X application at intersection. In: Proceedings of the 2017 Chinese Automation Congress. Jinan, China: 2017. 556–561
- 149 Lv Y, Wang Y, Liu X, Xu R, Fang J, Peng X. Research on performance testing for urban scenario based on terminal equipment of LTE-V2X vehicle network. In: Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Signal Processing. Beijing, China: 2018. 993–996
- 150 Miao L, Virtusio J J, Hua K L. PC5-based cellular-V2X evolution and deployment. *Sensors*, 2021, **21**(3): 843
- 151 Liu Zong-Wei, Song Hao-Kun, Hao Han, Zhao Fu-Quan. Innovation and development strategies of China's new-generation smart vehicles based on 4S integratio. *Strategic Study of CAE*, 2021, **23**(3): 153–162  
(刘宗巍, 宋昊坤, 郝瀚, 赵福全. 基于4S融合的新一代智能汽车创新发展战略研究. *中国工程科学*, 2021, **23**(3): 153–162)
- 152 3GPP TR 22.885 V14.0.0: Study on LTE support for vehicle to everything (V2X) services (Release 14) [Online], available: <https://portal.3gpp.org/ChangeRequests.aspx?q=1&specnumber=22.885>, September 1, 2022
- 153 Study on Enhancement of 3GPP Support for 5G V2X Services (Release 16), 3rd Generation Partnership Project TR 22.886 V16.2.0, 2018
- 154 Li S E, Zheng Y, Li K, Wang J. An overview of vehicular platoon control under the four-component framework. In: Proceedings of the 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Seoul, South Korea: 2015. 286–4291
- 155 Willemsen D, Schmeitz A, Fusco M, Ark E J, Kempen E, Soderman M, et al. Requirements review from EU projects D2.1 of H2020 project ENSEMBLE [Online], available: <http://www.platoonensemble.eu>, April 1, 2022
- 156 Yang Zhen-Kai, Hua Yi-Xin, Zi Lu, Zhang Zheng, Wang Ji-Wei. Analysis of the development status and key technologies of high-precision map. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021, **6**: 54–60  
(杨振凯, 华一新, 訾璐, 张政, 王继伟. 浅析高精度地图发展现状及关键技术. *测绘通报*, 2021, **6**: 54–60)
- 157 Zhang R, Lu R, Cheng X, Wang N, Yang L. A UAV-enabled data dissemination protocol with proactive caching and File sharing in V2X networks. *IEEE Transactions on Communications*, 2021, **69**(6): 3930–3942
- 158 Lu R, Zhang R, Cheng X, Yang L. UAV-assisted data dissemination with proactive caching and file sharing in V2X networks. In: Proceedings of the 2019 IEEE Global Communications Conference. Waikoloa, USA: 2019. 1–6
- 159 Wang B, Zhang R, Chen C, Cheng X, Jin Y. Density-aware deployment with multi-layer UAV-V2X communication networks. *IET Communications*, 2020, **14**(16): 2709–2715
- 160 Abbasi O, Yanikomeroglu H, Ebrahimi A, Mokari N, Alzenad M. Dynamic NOMA/OMA for V2X networks with UAV relaying. In: Proceedings of the 2020 IEEE 92nd Vehicular Technology Conference. Victoria, British Columbia, Canada: 2020. 1–7
- 161 Demir U, Toker C, Ekici O. Energy-efficient deployment of UAV in V2X network considering latency and backhaul issues. In: Proceedings of the 2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking. Odessa, Ukraine: 2020. 1–6
- 162 Ding F, Song A, Zhang D, Tong E, Pan Z, You X. Interference-aware wireless networks for home monitoring and performance evaluation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, **15**(3): 1286–1297
- 163 Li S E, Gao F, Li K, Wang L Y, You K, Cao D. Robust longitudinal control of multi-vehicle systems-A distributed H-Infinity Method. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, **19**(9): 2779–2788
- 164 Yang Z, Huang J, Yang D, Zhong Z. Collision-free ecological cooperative robust control for uncertain vehicular platoons with communication delay. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, **70**(3): 2153–2166
- 165 Ding F, Wen T, Ren S, Bao J. Performance analysis of a clustering model for QoS-aware service recommendation. *Electronics*, 2020, **9**(5): 1–18
- 166 Li K, Bian Y, Li S E, Xu B, Wang J. Distributed model predictive control of multi-vehicle systems with switching communication topologies. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, **118**: 102717
- 167 Shao Y, Sun Z. Eco-approach with traffic prediction and experimental validation for connected and autonomous vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, **22**(3): 1562–1572
- 168 Yang Z, Feng Y, Liu H X. A cooperative driving framework for urban arterials in mixed traffic conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, **124**: 102918
- 169 Li S E, Qin X, Li K, Wang J, Xie B. Robustness analysis and controller synthesis of homogeneous vehicular platoons with bounded parameter uncertainty. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2017, **22**(2): 1014–1025
- 170 Xu B, Li S E, Bian Y, Li S, Ban X J, Wang J, et al. Distributed conflict-free cooperation for multiple connected vehicles at unsignalized intersections. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2018, **93**: 322–334
- 171 Ma F, Yang Y, Wang J, Li X, Wu G, Zhao Y, et al. Eco-driving-based cooperative adaptive cruise control of connected vehicles platoon at signalized intersections. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, **92**: 102746
- 172 Lin Q, Li S E, Du X, Zhang X, Peng H, Luo Y, et al. Minimize the fuel consumption of connected vehicles between two red-signalized intersections in urban traffic. *IEEE Transactions on*

- Vehicular Technology*, 2018, **67**(10): 9060–9072
- 173 Arthurs P, Gillam L, Krause P, Wang N, Halder K, Mouzakitis A. A taxonomy and survey of edge cloud computing for intelligent transportation systems and connected vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, **23**(7): 6206–6221
- 174 Kirubasri G, Sankar S, Pandey D, Pandey B K, Singh H, Anand R. A recent survey on 6G vehicular technology, applications and challenges. In: Proceedings of the 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization. Noida, India: IEEE, 2021. 1–5
- 175 Chen Shan-Zhi, Ge Yu-Ming, Shi Yan. Technology development, application and prospect of cellular vehicle-to-everything (C-V2X). *Telecommunications Science*, 2022, **38**(1): 1–12 (陈山枝, 葛雨明, 时岩. 蜂窝车联网 (C-V2X) 技术发展、应用及展望. 电信科学, 2022, **38**(1): 1–12)
- 176 Ding F, Ma Z, Li Z, Su R, Zhang D, Zhu H. A terminal-oriented distributed traffic flow splitting strategy for multi-service of V2X networks. *Electronics*, 2019, **8**(6): 1–16
- 177 Khan H, Luoto P, Samarakoon S, Bennis M, Latva-Aho, M. Network slicing for vehicular communication. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2021, **32**(1): 1–14
- 178 Huang M, Yi Y, Zhang G. Service caching and task offloading for mobile edge computing-enabled intelligent connected vehicles. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2021, **26**(5): 670–679
- 179 Ding Fei, Sha Yu-Chen, Hong Ying, Kuai Xiao, Zhang Deng-Yin. Joint Optimization Strategy of computing offloading and edge caching for intelligent connected vehicles. *Journal of System Simulation*, DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0147 (丁飞, 沙宇晨, 洪莹, 蒯晓, 张登银. 智能网联汽车计算卸载与边缘缓存联合优化策略. 系统仿真学报, DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0147)
- 180 Feng L, Li W, Lin Y, Zhu L, Guo S, Zhen Z. Joint computation offloading and URLLC resource allocation for collaborative MEC assisted cellular-V2X networks. *IEEE Access*, 2020, **8**: 24914–24926
- 181 Li S, Hu X, Du Y. Deep reinforcement learning for computation offloading and resource allocation in unmanned-aerial-vehicle assisted edge computing. *Sensors*, 2021, **21**(19): 6499
- 182 Saraiva T, Campos C, Fontes R, Rothenberg C, Sorour S, Valae S. An application-driven framework for intelligent transportation systems using 5G network slicing. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, **22**(8): 5247–5260
- 183 Ding Fei, Mi Guan-Yu, Tong En, Zhang Nan, Bao Jian-Min, Zhang Deng-Yin. Multi-channel high-resolution network and attention mechanism fusion for vehicle detection model. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2022, **13**(1): 122–130 (丁飞, 米冠宇, 童恩, 张楠, 暴建民, 张登银. 多通路高分辨率网络与注意力机制融合的车辆检测模型. 汽车安全与节能学报, 2022, **13**(1): 122–130)
- 184 Alhasser A, Sun H, Jiang J. Cyber security challenges and solutions for V2X communications: A survey. *Computer Networks*, 2019, **151**: 52–67
- 185 Wu Wu-Fei, Li Ren-Fa, Zeng Gang, Xie Yong, Xie Guo-Qi. Survey of the intelligent and connected vehicle cybersecurity. *Journal on Communications*, 2020, **41**(6): 161–174 (吴武飞, 李仁发, 曾刚, 谢勇, 谢国琪. 智能网联车网络安全研究综述. 通信学报, 2020, **41**(6): 161–174)
- 186 Liu X J, Yin Y D, Chen W, Xia Y J, Xu J L, Han L D. Secure data sharing scheme in Internet of Vehicles based on blockchain. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, **55**(5): 957–965

- 187 Jabbar R, Kharbeche M, Al-Khalifa K, Krichen M, Barkaoui K. Blockchain for the internet of vehicles: A decentralized IoT solution for vehicles communication using Ethereum. *Sensors*, 2020, **20**(14): 3928
- 188 Khan M A, Ghosh S, Busari S A, Huq K M S, Dagiuklas T, Mumtaz S, et al. Robust, resilient and reliable architecture for V2X communications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, **22**(7): 4414–4430



丁飞 南京邮电大学物联网学院副教授. 2010年获东南大学博士学位. 主要研究方向为智能网联汽车通信与网络技术, 边缘智能与协同计算技术. 本文通信作者.

E-mail: dingfei@njupt.edu.cn

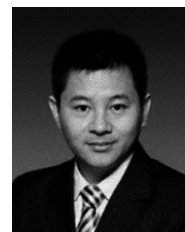
(DING Fei Associate professor at the School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications. He received his Ph.D. degree from Southeast University in 2010. His research interest covers communication and networking technology of intelligent connected vehicles, and edge intelligence and collaborative computing technology. Corresponding author of this paper.)



张楠 南京邮电大学物联网学院硕士研究生. 主要研究方向为 C-V2X 技术和边缘智能技术.

E-mail: zhangnan4899@163.com

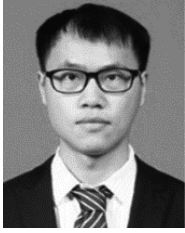
(ZHANG Nan Master student at the School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications. Her research interest covers cellular vehicle-to-everything (C-V2X) technology and edge intelligence technology.)



李升波 清华大学车辆与运载学院教授. 2009年获清华大学博士学位. 主要研究方向为自动驾驶与智能汽车, 强化学习与最优控制, 群体智能与分布式控制, 驾驶状态监控与驾驶辅助.

E-mail: lishbo@tsinghua.edu.cn

(LI Sheng-Bo Professor at the School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University. He received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2009. His research interest covers autonomous driving and intelligent vehicles, reinforcement learning and optimal control, swarm intelligence and distributed control, and driver state monitoring and driving assistance.)



**边有钢** 湖南大学机械与运载工程学院副教授. 2019 年获清华大学博士学位. 主要研究方向为协同控制, 智能控制及其在智能网联车辆的应用.

E-mail: byg10@foxmail.com

**(BIAN You-Gang** Associate professor at the College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University. He received his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2019. His research interest covers cooperative control, intelligent control, and their applications to connected and automated vehicles.)



**童恩** 中国移动-南京邮电大学 5G 联合创新中心教授级高工. 主要研究方向为智能网联汽车通信与网络技术, 智能通信与信息系统.

E-mail: tonge@js.chinamobile.com

**(TONG En** Professor at 5G Joint Innovation Center of China Mobile

& Nanjing University of Posts and Telecommunications. His research interest covers communication and networking technology of intelligent connected vehicles, and intelligent communication and information system.)



**李克强** 中国工程院院士, 清华大学车辆与运载学院教授, 国家智能网联汽车创新中心首席科学家. 1995 年获重庆大学博士学位. 主要研究方向为智能网联汽车, 汽车系统动力, 汽车电子与智能控制.

E-mail: likq@tsinghua.edu.cn

**(LI Ke-Qiang** Academician of Chinese Academy of Engineering, professor at the School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, chief scientist of National Innovation Center of Intelligent and Connected Vehicles. He received his Ph.D. degree from Chongqing University in 1995. His research interest covers intelligent and connected vehicles, vehicle system dynamics, vehicle electronics and intelligent control.)