



专题：智能网联汽车

车路协同路侧感知系统的关键技术与测试验证

鲍叙言, 龚正, 李伯雄, 余冰雁

(车联网技术创新与测试评价工业和信息化部重点实验室 (中国信息通信研究院), 北京 100083)

摘要: 车路协同路侧感知系统是发展“车路云一体化”、实施交通基础设施数字化转型升级的重要一环。立足当下应用需求和产业进展, 介绍了车路协同路侧感知系统的关键技术、标准化现状, 以及研究团队研发的测试工具及开展测试验证的情况。测试验证结果展现出部分已部署的路侧感知系统仍存在较大技术爬坡空间, 且在测试工具的辅助下可大幅提升系统性能, 同时也验证了关键技术的必要性、已有标准的可用性、测试工具的高价值。

关键词: 车路协同; 路侧感知系统; 传感技术; 融合算法; 标准化; 测试验证

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024248

Key technology and validation of roadside sensing system for vehicle-road cooperation

BAO Xuyan, GONG Zheng, LI Boxiong, YU Bingyan

Key Laboratory of Internet of Vehicle Technical Innovation and Testing (CAICT), Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100083, China

Abstract: Vehicular-road collaborative roadside sensing systems are a crucial part of developing “integrated vehicular-road-cloud systems” and implementing the digital transformation and upgrading of transportation infrastructure. Based on current application needs and industrial progress, key technologies and the standardization status of the system were analyzed, and the testing tools and verification results developed by the research team were presented. The results of testing and verification show that some deployed roadside sensing systems still have a significant technological gap to be fulfilled, and with the aid of testing tools, system performance can be greatly improved. The necessity of key technologies, the usability of existing standards, and the high value of testing tools have all been confirmed.

Key words: vehicular-road collaboration, roadside sensing system, sensing technology, fusion algorithm, standardization, testing verification

收稿日期: 2024-09-26; 修回日期: 2024-11-27

通信作者: 余冰雁, yubingyan@caict.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2021YFB2501000)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2021YFB2501000)



1 车路协同路侧感知系统的关键技术

1.1 传感技术

车路协同路侧感知系统的传感技术主要包括“传感器技术”和“处理技术”。在传感器技术方面，主要关注传感器性能及其与场景的适配程度^[2]。摄像机成本低廉，获取信息量丰富，但计算量需求大，抗干扰能力弱；毫米波雷达成本适中，测量距离广，抗干扰能力强，但信息较为贫乏，难以胜任复杂的识别应用；激光雷达^[3]则以较高的成本换取了更全面、更高的性能，且部分机械结构的雷达会存在使用寿命上的劣势。在成本与性能的权衡下，摄像机+毫米波雷达优势互补，成了当前主流方案之一；激光雷达在服务网联汽车自动驾驶的场景中可以提供更好的感知性能。

在处理技术方面，主要关注数据标定、同步、原始测量数据融合等。多传感器标定^[4]较为成熟，然而工程实践却较为烦琐和费时，当前业界研究重点是半自动化和自动化标定；传感器同步技术相对较为成熟，但工程化的硬件产品仍有待完善；

原始测量数据融合是指在生成结构化数据前将多传感器原始数据进行融合，其复杂度与对网络数据传输需求较高，但却有更好的理论效果。

1.2 感知算法

感知算法是影响车路协同路侧感知系统性能表现的关键因素，可分为“单点算法”和“融合算法”两部分。单点算法是实现感知算法的基础与核心技术，其性能在很大程度上决定了路侧感知系统所能支撑的应用级别与种类。其中的关键技术包括目标分类、目标定位、目标尺寸识别、目标持续跟踪、目标重识别（Re-ID）等^[5-6]。一个典型的车路协同路侧感知系统的单点算法功能与流程如图2所示。

就目前业界应用的感知算法的实际效果而言，仍存在识别范围不够大、检出率和准确率不够高等问题，平均技术水平仍有较大爬坡空间。研发团队分析认为，从感知算法研发的角度来看，这一方面是由于研发环节模型泛化能力有限，且面向车路协同场景的专用数据集不足；另一方面是由于多视角下的跟踪、Re-ID等算法能力相对不完善，感知结果出现跳变、跟踪丢失等概率较高。从产业层面

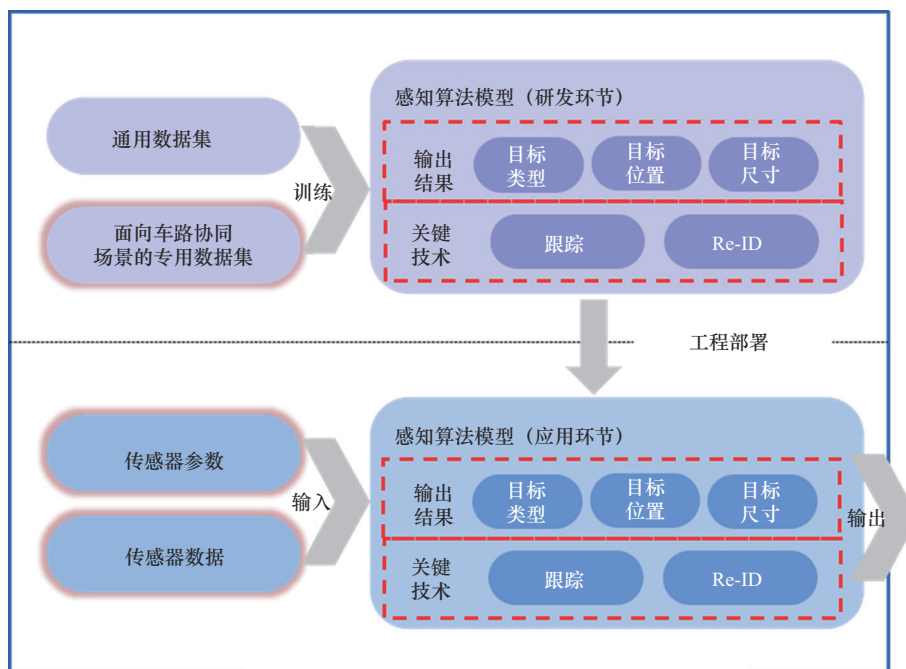


图2 典型的车路协同路侧感知系统的单点算法功能与流程

看,当前各企业的感知算法多为封闭的整体解决方案,算法间接口封闭,难以形成产业合力。下一步可尝试推动算法模型流程的标准化与接口标准化,以促进产业算法整体能力的提升。

1.3 时空同步技术

时空同步技术是实现车路协同路侧感知的重要基础^[7]。为实现视频数据与雷达点云数据的融合,通常采用时空同步技术处理来自不同传感器的数据^[8]。目前,时空同步技术主要通过传感器统一授时,同步协调世界时(universal time coordinated, UTC),同步误差不超过100 μs,为车路协同感知提供时间配准服务。然后,在空间维度上,通过提取周边环境的交通流(流量、排队长度、路口到达率)、行人及车辆轨迹信息,实现毫秒级多目标识别与跟踪,用于行人及非机动车安全预警、目标态势分析及路口盲点推送。

1.4 跨感知节点的目标匹配

跨感知节点的目标匹配是实现车路协同路侧感知的关键环节之一,是移动的车辆能在不同区域内被连续精准感知的关键。目标匹配可分为重叠视角和不重叠视角两类,其中重叠视角在本文中可归为下文介绍的“组间融合”算法。对于不重叠视角的目标匹配,通常采用两种基本方法:基于双阶段轨迹关联的方法和基于单阶段轨迹关联的方法^[9]。在基于双阶段轨迹关联的方法中,先在单个感知节点内部进行目标跟踪,生成单个节点内的目标轨迹,再使用Re-ID技术来关联不同感知节点的目标轨迹。Re-ID技术的基本思路是通过提取和比较目标的外观特征(如颜色直方图、纹理描述符、深度学习特征等)来识别不同感知节点中的同一目标。基于单阶段轨迹关联的方法则直接对所有感知节点的数据进行全局关联匹配,通常依赖于一个全局优化框架,同时考虑所有感知节点的多目标感知结果,并试图找到最佳的全局关联匹配解决方案,典型的关联匹配算法如匈牙利法、图优化、深度学习模型等。

1.5 融合算法

融合算法有两种分类方式,其一,根据传感器的部署位置,可分为“组内融合”和“组间融合”,如图3所示。在朝向单向的感知需求中,主要的融合为组内融合,例如,将同向同视角的摄像头与毫米波雷达进行融合^[10]。在全息路口等全向感知需求中,还涉及组间融合,即将不同位置的不同传感器进行融合,例如,将路口的摄像头与路边的激光雷达进行融合。目前,组间融合在应用中尚存在较大挑战,如标定难度高、融合算法成功率较低造成的定位跳变、跟踪失败等问题。

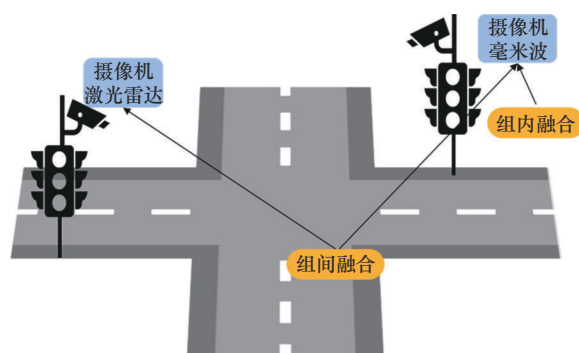


图3 车路协同路侧感知系统的组内融合与组间融合

其二,按照数据融合的方式,可分为前融合、后融合和中融合^[11]。其中,后融合算法指的是不同的传感器先进行单点感知,再将多个感知结果进行融合。由于不同传感器的感知算法模型相对独立,结构化数据后再实现融合相对简单,故后融合算法相对较为成熟且主流。然而,结构化信息造成的数据丢失,会使后融合算法的性能受到影响。前融合算法是将多个传感器的数据在早期阶段进行融合,通常是在数据层面进行整合。在车路协同路侧感知系统中,前融合算法可以将摄像头、毫米波雷达和激光雷达等传感器采集的数据直接进行融合处理,形成一个统一的数据表示。中融合算法,也称为多传感器特征级融合,是一种将来自多个不同传感器的数据在特征层面进行融合的方法。它旨在提取各个传感器数据中的关键特征,并将这些特征进行整



合,以获得更全面、准确且具有更高价值的信息表示。多传感器特征级融合介于前融合和后融合之间。与前融合相比,它对数据进行了一定程度的处理和抽象,减少了数据量和计算复杂度;而与后融合相比,它保留了更多的原始信息,有助于提高融合结果的准确性。

与前融合算法相比,基于鸟瞰视图的中融合算法^[12]具有以下差异和优势。在差异性方面,二者融合阶段不同,前融合在数据层面进行,而中融合在特征提取后进行,更注重对不同传感器特征的深入分析和整合。同时,二者的数据处理方式也不同,前融合算法直接处理原始数据,对数据的同步性要求较高;中融合算法先提取特征,再进行融合,对数据同步的要求相对较低。在优势性方面,中融合算法灵活度更高,可以根据不同传感器的特点和应用场景,灵活调整特征提取和融合的方法,适应性更强。例如,在某些情况下,中融合算法可以根据路况和目标类型,调整摄像机、毫米波雷达和激光雷达的特征权重,以获得更准确的感知结果。同时,中融合算法信息利用率更高,通过对不同传感器特征的提取和融合,能够更充分地利用各个传感器的信息,提高感知精度。例如,在复杂路况下,摄像机可以提供丰富的视觉信息,毫米波雷达可以提供准确的距离和速度信息,激光雷达可以提供高精度的三维空间信息,中融合算法能够将这些信息有效地整合起来,为车路协同路侧感知系统提供更全面、准确的信息。

与后融合算法相比,基于鸟瞰视图的中融合算法的融合阶段和处理方式不同。后融合算法在目标检测和识别后进行,中融合算法在特征提取后、目标检测前进行。同时,后融合算法主要对结果进行融合,对传感器数据的处理相对较少;中融合算法则是对特征进行融合,能够更深入地挖掘传感器数据的信息。在优势方面,中融合算法能够在目标检测前,将不同传感器的特征进行整合,为目标检测提供更丰富、准确的信息,从而提高感知精度。例

如,在车辆检测中,通过融合摄像机、毫米波雷达和激光雷达的特征,可以更准确地确定车辆的位置、速度和形状等信息,减少误检和漏检的情况。此外,由于中融合算法在特征层面进行融合,能够减少单个传感器故障对系统的影响,提高系统的稳定性和可靠性。例如,当某个传感器出现故障时,其他传感器的特征仍然可以进行融合,为车路协同路侧感知系统提供一定的信息支持。

1.6 结果可靠性分析

车路协同路侧感知系统的结果可靠性分析是目前较为重要且进展较为缓慢的技术领域。路侧感知系统最具有价值与挑战性的应用是作为智能网联汽车的车外传感器,而这要求感知结果应提供一定的可靠性信息^[13]。例如,在给出分类结果的同时,需要给出分类置信度;或者在给出定位结果的同时,给出定位精度误差等,但目前路侧感知系统的输出数据鲜有关联的置信度或精度误差。其涉及的关键技术细节包括传感器选择算法、环境检测模型、感知系统误差模型等。

2 车路协同路侧感知系统的标准化现状

在国家级车联网先导区、“双智”试点城市、“车路云一体化”应用试点建设的牵引带动下,面向平台的非实时或弱实时管控,面向辅助驾驶为驾驶员提供实时道路信息、辅助现场决策,面向自动驾驶支撑协同感知、决策和控制等各类应用“百花齐放”。这些应用的建设场景、服务对象、功能需求均存在差异,这种差异性正逐步引导和推动车路协同路侧感知系统向与应用场景紧耦合、与功能需求相匹配的方向演进,呈现分级分类的发展趋势。例如,传统的电子不停车收费(electronic toll collection, ETC)和路网路段级交通管控指令下发只需要开放网联能力即可,几乎不需要配备感知能力。相较而言,车道级的交通管控、交叉口的碰撞预警、协作式的变道汇入等应用更依赖于高精度的识别、定位等精细化感知能力。

为顺应产业发展需要,车路协同路侧感知系统相关标准研制工作在中国通信标准化协会(China Communications Standards Association, CCSA)、中国汽车工程学会(China SAE)、全国智能运输系统标准化技术委员会(National Technical Committee 268 on Intelligent Transport Systems of Standardization Administration of China, 简称ITS标委会)、中国智能交通产业联盟(C-ITS)以及国际电信联盟电信标准化部门(ITU-T SG16和SG20)均有开展。CCSA于2024年7月正式发布行业标准《车路协同路侧感知系统技术要求及测试方法》(YD/T 4770-2024)^[14],该项标准面向各类应用场景的差异化需求,定义了分级分类的系统级指标体系,首先从路侧感知系统的基础性能、交通参与者感知、交通事件检测、交通流检测4个方面定义了全量的指标集,然后针对应用需求提出了合理的量化分级标准,最后确定了针对不同指标类别的测试验证方法。由ITS标委会提出并归口的《车路协同系统智能路侧协同控制设备技术要求和测试方法》(GB/T 44417-2024)^[15]在测试方法上与YD/T 4770-2024同步。同时,ITU-T SG20、China SAE、C-ITS等组织均立项了与路侧感知系统有关的标准,如ITU-T SG20定义了《自动驾驶汽车路侧多传感器数据融合系统的功能架构》(ITU-T Y.4487)^[16],详细阐释了融合感知技术框架、服务和应用支持层设计、系统功能实体等内容,并与ITU-T SG16开展的《面向网联自动驾驶车辆的协同环境感知框架与需求》(ITU-T F.CAV-CDP)^[17]标准协同,共同规范了路侧和车端的感知系统技术框架,不断支持车路协同技术体系迭代演进。China SAE主要围绕智能网联汽车开展了路侧感知系统技术条件和辅助驾驶前向视觉感知性能评测等技术研究。ITS标委会为适应智能交通发展需求,研制了车路协同路侧感知系统系列标准,该系列标准中关于路侧感知系统共性技术要求和测试方法的

内容全面引用了YD/T 4770-2024,并面向高级别自动驾驶提出了增量技术要求。

3 车路协同路侧感知系统的测试验证

研究团队研发的车路协同路侧感知系统的测试工具主要由数据采集模块、数据生成模块以及性能指标评测模块构成,如图4所示。其中,数据采集模块可采集激光雷达获取的点云数据、摄像机获取的图像数据、组合导航获取的定位与时间等数据、车载单元(on-board unit, OBU)获取的路侧交通参与者信息,并进行存储。数据生成模块可对采集的原始数据进行解算,获取交通参与者的真值数据和待测数据。性能指标评测模块可对真值数据与待测数据进行数据处理,生成待测路口的系统性能和交通参与者感知性能指标。

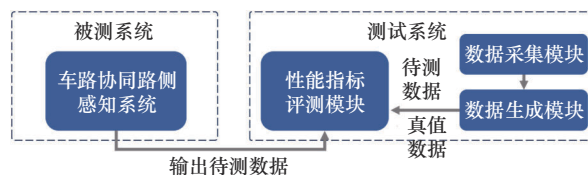


图4 车路协同路侧感知系统的测试工具

对各地车路协同路侧感知系统的实地测试评估,下面针对定位精度、目标识别及分类等指标出现的典型问题进行分析,相关结论基本验证了第2节技术研究的结论。

(1) 针对硬件性能的瓶颈,各类传感器组合(激光雷达+毫米波雷达+摄像机,激光雷达+摄像机,毫米波雷达+摄像机)均有感知边界,计算设备也存在算力瓶颈。二者因素叠加,通常会影响整个系统的最大感知范围、感知的实时性及感知精度。

(2) 针对融合算法的问题,组内融合和组间融合的融合效果受授时精度、点云融合、多目标关联等算法性能制约。其中,组间融合仍面临较大挑战,如标定难度高、融合算法成功率低等,造成转角等感知叠加区域定位跳变、跟踪失败等问题;前融合算法能保证数据精度,但时空同步



难，算力消耗大；后融合算法支持敏捷部署，实现相对容易，但会丢失部分精度。当前，业界开展的一些介于前融合和后融合之间的中融合算法（即特征级融合算法）尝试，从算力需求和感知结果来看，均是二者折中。

(3) 针对设备可靠性的问题，一些项目建成后，缺少常态化的运维管理，导致设备在线率无法保证。开放环境下设备自身的折旧老化也会降低系统运行的可靠性，导致局部区域的感知失效。

研究团队基于研究成果，对某路口实际部署的车路协同路侧感知系统开展了优化工作。

该路口部署的车路协同路侧感知系统存在如下问题：一，右转车道感知性能弱，推测标定特征点过少，无法满足弯道定位需求；二，存在某一方向感知距离短，推测对向感知设备故障或数据丢失等；三，部分路段整体误差较大，可评测数据量少，推测标定及算法融合不完善。研究团队利用测试工具在该路口反复定位问题及优化调测后，以上3个问题均已准确定位和成功解决。

4 结束语

不论是用于智能网联汽车还是智能交通管理，多传感器融合是车路协同路侧感知系统的主要发展趋势。与激光雷达在汽车端备受关注不同的是，由于作业环境、价格等因素，摄像机与毫米波雷达在路侧感知领域得到了更多的关注。与此同时，国内感知设备厂商与算法提供商呈现互相融合、边界越发模糊的趋势，越来越多的算法提供商开始进行软硬件一体化部署。车路协同路侧感知系统产业当前处在相对起步的发展期，尚未出现有绝对统治地位的龙头企业，且存在产业不够壮大、分工细化程度不足、产品标准化程度不高等特点。本文立足当下车路协同路侧感知系统的应用需求和产业发展现状，分析车路协同路侧感知系统的关键技术、标准化现状，介绍了研究团队研发的系统测试工具，以及基于测试工具的实地测试验

证情况。测试验证结果证明了技术分析的有效性，同时展现了已部署的路侧感知系统大多仍存在技术爬坡空间，但在测试工具的辅助下可大幅提升系统性能，体现出了测试工具的高价值。

参考文献：

- [1] ZHANG R S, ZOU Z X, SHEN S Y, et al. Design, implementation, and evaluation of a roadside cooperative perception system [J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2022, 2676(11): 273-284.
- [2] GONG Z, XUE W Y, LIU Z A, et al. Design of a reconfigurable multi-sensor testbed for autonomous vehicles and ground robots[C]// 2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [3] 吴维一. 激光雷达及多传感器融合技术应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
WU W Y. Research on application of lidar and multi-sensor fusion technology[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [4] 彭湃, 耿可, 殷国栋, 等. 基于传感器融合里程计的相机与激光雷达自动重标定方法[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(20): 206-214.
PENG P, GENG K K, YIN G D, et al. Automatic recalibration of camera and LiDAR using sensor fusion odometry[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(20): 206-214.
- [5] LI B Y, OUYANG W L, SHENG L, et al. GS3D: an efficient 3D object detection framework for autonomous driving[C]// 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1019-1028.
- [6] ZHANG J C, WEN W S, HUANG F, et al. GNSS-RTK adaptively integrated with LiDAR/IMU odometry for continuously global positioning in urban canyons[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(10): 5193.
- [7] IEEE standard specification format guide and test procedure for single-axis laser gyros[C]// IEEE Std 647-1995. Piscataway: IEEE Press, 1996: 1-88.
- [8] REHDER J, NIKOLIC J, SCHNEIDER T, et al. Extending kalibr: Calibrating the extrinsics of multiple IMUs and of individual axes[C]// 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway: IEEE Press, 2016: 4304-4311.
- [9] 张鹏, 雷为民, 赵新蕾, 等. 跨摄像头多目标跟踪方法综述[J]. *计算机学报*, 2024, 47(2): 287-309.
ZHANG P, LEI W M, ZHAO X L, et al. A survey on multi-target multi-camera tracking methods[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2024, 47(2): 287-309.
- [10] CHOUDHURI A, CHOWDHARY G, SCHWING A G. Assignment-space-based multi-object tracking and segmenta-

- tion[C]//2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Piscataway: IEEE Press, 2021: 13578-13587.
- [11] HUANG K L, SHI B T, LI X, et al. Multi-modal sensor fusion for auto driving perception: a survey[J]. ArXiv e-Prints, 2022: arXiv: 2202.02703.
- [12] WEON I S, LEE S G. Environment recognition based on multi-sensor fusion for autonomous driving vehicles[J]. Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, 2019, 25(2): 125-131.
- [13] 杜豫川, 都州扬, 师钰鹏, 等. 路侧感知车辆轨迹数据质量智能评估方法[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 164-176.
DU Y C, DU Z Y, SHI Y P, et al. An intelligent quality assessment method for vehicle trajectory from roadside perception[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 164-176.
- [14] 中国通信标准化协会. 车路协同路侧感知系统技术要求及测试方法: YD/T 4770-2024[S]. 2024.
China Communications Standards Association. Vehicle-infrastructure cooperation—Technical requirements and test methods of roadside sensing system: YD/T 4770-2024[S]. 2024.
- [15] 全国智能运输系统标准化技术委员会. 车路协同系统智能路侧协同控制设备技术要求和测试方法: GB/T 44417-2024[S]. 2024.
National Technical Committee 268 on Intelligent Transport Systems of Standardization Administration of China. Technical requirements and test method for roadside intelligent cooperative control device in cooperative vehicle-infrastructure system: GB/T 44417-2024[S]. 2024.
- [16] ITU-T SG20. A functional architecture of roadside multi-sensor data fusion systems for autonomous vehicles: ITU-T Y.4487[S]. 2024.
- [17] ITU-T SG16. Framework and requirements of cooperative driving environment perception for connected automated vehicles: ITU-T F. CAV-CDP[S]. 2024.

[作者简介]



鲍叙言 (1989-), 男, 博士, 车联网技术创新与测试评价工业和信息化部重点实验室(中国信息通信研究院)高级工程师, 主要研究方向为车联网、车路协同、融合感知领域的相关政策、产业、标准和前沿技术等。



龚正 (1992-), 男, 博士, 车联网技术创新与测试评价工业和信息化部重点实验室(中国信息通信研究院)工程师, CEng特许工程师, 主要研究方向为多源融合定位与感知、路侧感知系统、人工智能大模型与类脑计算等。



李伯雄 (1995-), 男, 车联网技术创新与测试评价工业和信息化部重点实验室(中国信息通信研究院)工程师, 主要从事车联网和智能网联汽车领域技术、标准、测试等工作。



余冰雁 (1989-), 男, 博士, 车联网技术创新与测试评价工业和信息化部重点实验室(中国信息通信研究院)副主任、高级工程师, 主要从事车联网边缘计算、路侧感知、云控平台等领域的政策与产业研究、技术标准研制等工作。