

面向 6G 的通信感知一体化车联网研究综述

林粤伟^{1,2} 王 溢² 张奇勋² 尉志青²

(1. 青岛科技大学信息科学技术学院, 山东青岛 266061;
2. 北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室, 北京 100876)

摘 要: 通信感知一体化是第 5.5 代、第 6 代移动通信、无线局域网的研究热点, 与此同时物联网, 以及车辆与一切互联的车联网技术正在蓬勃发展, 车联网与汽车自动驾驶作为通信感知一体化技术的典型应用场景, 相关关键技术需要深入研究, 以推动智能交通系统、智慧城市的发展。本文首先介绍通信感知一体化车联网的研究背景与应用场景, 然后对国内外近期通信感知一体化车联网的相关研究进行梳理, 从网络架构、波形设计、干扰与资源管理、波束管理、硬件设计与验证等五个方面展开综述, 最后对通信感知一体化车联网领域的未来研究趋势以及相关的技术挑战进行展望, 提出车联网通感一体化基础研究、车联网专用一体化波形设计、车联网通信感知计算一体化等三个建议的研究方向并总结全文。

关键词: 第 6 代移动通信; 通信感知一体化; 车联网; 无人自动驾驶; 硬件设计

中图分类号: TN911.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2023.06.002

引用格式: 林粤伟, 王溢, 张奇勋, 等. 面向 6G 的通信感知一体化车联网研究综述[J]. 信号处理, 2023, 39(6): 963-974. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2023.06.002.

Reference format: LIN Yuewei, WANG Yi, ZHANG Qixun, et al. Overview of the research on 6G oriented Internet of vehicles for integrated sensing and communication[J]. Journal of Signal Processing, 2023, 39(6): 963-974. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2023.06.002.

Overview of the Research on 6G Oriented Internet of Vehicles for Integrated Sensing and Communication

LIN Yuewei^{1,2} WANG Yi² ZHANG Qixun² WEI Zhiqing²

(1. College of Information Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China; 2. Key Laboratory of Universal Wireless Communications, Ministry of Education, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The Integrated Sensing and Communication (ISAC) belongs to the hot research area of 5.5G, 6G and Wi-Fi. Meanwhile the Internet of Things (IoT), Vehicle to Everything (V2X) and Internet of Vehicles (IoV) technologies are developing vigorously. As a typical application scenario of ISAC, IoV and Advanced Driving Assistance System (ADAS) require in-depth research on relevant key technologies to promote the development of Intelligent Transportation System (ITS) and smart city. First, the research background and application scenarios of ISAC IoV is introduced. Then, the recent relevant researches on the ISAC IoV at home and abroad are sorted out, the network architecture, waveform design, interference and resource management, beam management, hardware design and verification are summarized. Finally, the future research trends and related technical challenges in the field of ISAC IoV is prospected, and three research directions of

收稿日期: 2023-01-11; 修回日期: 2023-05-17

基金项目: 国家自然科学基金优秀青年项目(62022020); 国家重点研发计划项目(2020YFA0711302); 国家自然科学基金项目(U21B2014); 泛网无线通信教育部重点实验室(北京邮电大学)开放课题; 青岛科技大学公派国内访学项目

ISAC IoV basic research, IoV dedicated integrated waveform design, and Integrated Sensing, Communication and Computing (ISACC) of IoV are proposed, and the full text is summarized.

Key words: 6th generation mobile communication; integrated sensing and communication; Internet of vehicles; unmanned automatic driving; hardware design

1 引言

近几年通信与雷达技术各自取得了较快的发展,一方面,5.5G(5G-Advanced)、第六代移动通信(6th Generation Mobile Communication, 6G)、无线局域网(Wireless Fidelity, Wi-Fi)等无线通信技术通过发送承载着数据的随机性无线电信号实现信息的高速低时延通信传输。正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)、多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术在蜂窝移动通信、Wi-Fi通信都得到了应用^[1]。另一方面,雷达通过发送确定性无线电信号并接收其回波对目标进行感知探测,不局限于军用,在汽车自动驾驶(Advanced Driving Assistance System, ADAS)、无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)自主飞行等民用领域得到广泛应用。OFDM与MIMO技术同样应用在了雷达领域,涌现出了MIMO雷达、OFDM波形雷达等较为新式的雷达技术^[2]。通信感知一体化、雷达通信一体化近几年已成为5.5G、6G、Wi-Fi、雷达领域的研究热点^[2-3]。

未来6G网络工作频段从传统的6GHz以内频段(Sub-6GHz)发展到毫米波(mmWave)、太赫兹(THz)乃至可见光频段,与雷达工作频段重叠,这促使“通信感知一体化”^[3]理念的产生。“通信感知一体化”的理念是将无线电通信与无线电感知集成为一个整体,物理层共用频率以及射频硬件资源,即采取通信与感知共生、共同设计的方案,较传统的通信与感知分别独立设计的共存方案,具有频谱利用率高、硬件成本低、尺寸小等优势。通信感知一体化可以带来集成增益与协作增益^[4],一方面,感知可以增强通信,如感知功能辅助下更为准确的信道建模、信道估计、波束管理、多车资源联合管理等。另一方面,通信也可以增强感知,如支撑车联网多车海量感知数据的超大带宽与极低时延融合,以及无人驾驶汽车、无人机的大范围超视距感知。

2022年北京大学的程翔等在通信感知一体化车联网综述论文中对车联网领域中通信与感知的功能融合(通信与感知设备分离独立设计、同频共

存^[2])、信号融合(真正狭义上的通信感知一体化:通信与感知联合设计、共用频率和硬件资源、同频共生^[2])研究分别进行了较为全面的综述^[5],对于信号融合重点介绍了车联网一体化波形设计方面的进展。在此基础上,本文聚焦于狭义上的通信感知一体化,对通信感知一体化在车联网领域的网络架构、波形设计、干扰与资源管理、波束管理、硬件设计与验证5个方面进行综述。首先介绍通信感知一体化车联网的研究背景与应用场景,然后对国内外近期通信感知一体化车联网的相关研究进行梳理归纳,最后对通信感知一体化车联网领域的未来研究进行展望,提出建议的研究方向并总结全文。

2 通信感知一体化车联网应用场景

通信感知一体化在车联网、无人机、工业互联网、智慧办公、环境监测、沉浸式扩展现实(Extended Reality, XR)、空天地海一体化乃至元宇宙等场景都可以得到应用^[3,5-6],本文聚焦于车联网应用场景进行介绍。

车联网技术可以实现车辆与周围的车(Vehicle-to-Vehicle, V2V)、人(Vehicle-to-Pedestrian, V2P)、交通基础设施(Vehicle-to-Infrastructure, V2I)、网络(Vehicle-to-Network, V2N)等的全方位连接和通信,可以大幅提高交通效率和驾驶安全性,可以为智能交通系统的互联通信提供基础支撑^[7]。车联网协议标准主要包括我国主导的蜂窝车联网(Cellular Vehicle to Everything, C-V2X)与美国主导的专用短程通信车联网(Dedicated Short Range Communication Vehicle to Everything, DSRC-V2X),即IEEE 802.11p(5.9GHz频段)和IEEE802.11ad(60GHz毫米波频段)^[7]。其中C-V2X目前主要包括4G的LTE-V2X与5G的NR-V2X两种,而IEEE 802.11p还可作为车载自组织网络(Vehicular Ad Hoc network, VANET)车辆间的无线通信协议,VANET是移动自组织网络(Mobile Ad Hoc Network, MANET)的重要分支^[8]。

在车联网的开放空间场景,通信感知一体化技术有着广阔的应用空间^[3,5-6]。对于车联网中的无人驾驶汽车,一方面,现阶段通信与雷达(感知)独立

设计的方案无法满足功能需求。例如,无人驾驶现阶段依赖于传统的传感器,包括毫米波雷达、激光雷达、基于计算机视觉的摄像头等,感知探测距离(200 m以上)与人体肉眼可视距离(500 m以上)仍然存在较大差距,且易受到天气、光亮、遮挡物的影响。另一方面,大量分立无线传感器、无线通信设备的使用导致频谱利用率低、互干扰较大、成本较高,多设备之间的信息交互导致通信的可靠性与实时性无法保障。在车联网中进行通信感知一体化设计可以提高频谱等资源的利用率。单车感知设备的感知范围和性能有限,通过通信技术联网可实现设备之间感知信息的传输共享,进而达到大量感知数据的快速融合,从而对环境进行更为准确的描述。与一般场景相比,通感一体化的车联网场景具有高动态特性。车辆的快速运动一方面导致更为显著的多普勒频偏,进而给一体化波形设计带来挑战,OFDM波形对频偏更为敏感,无法充分满足车联网高动态场景的需要,另一方面导致车联网网络拓扑结构与无线信道的时空高动态变化。在车辆高密度的车联网场景中需要高速率、高可靠、低时延的通信技术对其进行支撑。

综上,需要将通信感知一体化技术应用到无人自动驾驶场景,并融入计算形成多车车联网网络感知能力(即通感算一体化),以规避传统传感器的缺陷,满足感知通信分立设计和单车感知设计无法满足的无人自动驾驶感知和通信性能要求,同时提高频率利用率、降低干扰和成本。

3 研究现状

3.1 网络架构

已有研究多数聚焦于通感、通算等两方面的一体化,对于通感算三方面的一体化深度融合,虽已提出了愿景与设想,仍然较为缺乏深入全面的通感算一体化基础理论与关键技术研究。通感算赋能的网络化感知将感知能力引入蜂窝通信网络,将网络能力从单一传统通信维度扩展到通信与感知相互赋能的双重维度,进而提升网络整体性能。需要在车联网架构方面研究通感算一体化的全新架构,为理论与关键技术的落地应用提供架构支撑。

针对5G网络,中国移动研究院的徐晓东和华为公司的叶威等在文献[9]提出了三种5G通感一体化蜂窝网络架构,分别为接入网分布式、接入网集中式、接入网与核心网综合式,感知逻辑位置分属不同的接入网和核心网网元,考虑了通信与感

知,并未考虑计算功能。进一步的,面向我国主导的C-V2X车联网协议,针对6G网络,我国IMT-2030(6G)推进组在文献[1,3]初步定义了面向6G的通信感知计算一体化三层网络架构,包括资源层、能力层、应用层。北京邮电大学的闫实等在文献[6]提出了更加细化的6G通感算一体化网络架构,如图1所示,依靠通信-感知-计算之间的紧耦合实现了通感算一体化,并支撑上层车联网全自动驾驶等领域的行业垂直应用。该架构的主要硬件设备包括:中心网云、通感一体化设备、智能边缘设备、分布式终端4部分。其中,中心网云负责提供随愿柔性服务,分为业务智适应和资源智适应。通感一体化设备(基站)和智能边缘设备为一体化网元,进行泛在智算,借助未来6G超高速极低时延无线通信信道,进行“云、雾/边、管、端”协同工作与人工智能(Artificial Intelligence, AI)内生计算。通感一体化设备通过对协议栈的重新设计实现了通感融合。分布式终端分为普通接入终端与通感算终端。通感算终端是含有通信、感知、计算能力的接入节点,超级通感算终端可以运行联邦学习等分布式学习算法。

2023年北京科技大学的马忠贵等在文献[10]突破车联网中通感算融合的架构壁垒,对网络架构进行抽象,提出了“五层四面”通感算一体化网络架构,如图2所示,横向五层包括多元接入层、统一网络层、多域资源层、协同服务层、管理与应用层;纵向四面包括通信面、感知面、算力面、智能融合面。基于通感算功能模块化,构建资源可解耦、能力可扩展、架构可重构的通感算一体化车联网网络架构。

其中,横向的协同服务层是网络架构的核心层,纵向的智能融合面为其他层、面提供人工智能与网络管理能力。多元接入层和通信面采用6G和C-V2X技术,感知面复用6G超高频毫米波或太赫兹频段,融合感知信息进行协同感知,算力面为用户提供算力服务与分布式交互感知。但是,该文并未将所提网络架构映射细化到具体的蜂窝网络设备。

表1对通感一体化车联网网络架构的代表性文献进行了比较。对于未来的网络架构研究与演进,首先,未来可以进一步在核心网引入感知单元,在接入网的基站、终端引入感知收发和处理模块,在边缘网络引入感知信息融合的信息处理模块。其次,车联网具有高动态特性,场景更为复杂,已有研究所提出的架构无法覆盖所有路况,需要进一步研究更为完善的车联网通感算一体化网络架构,考虑更为复

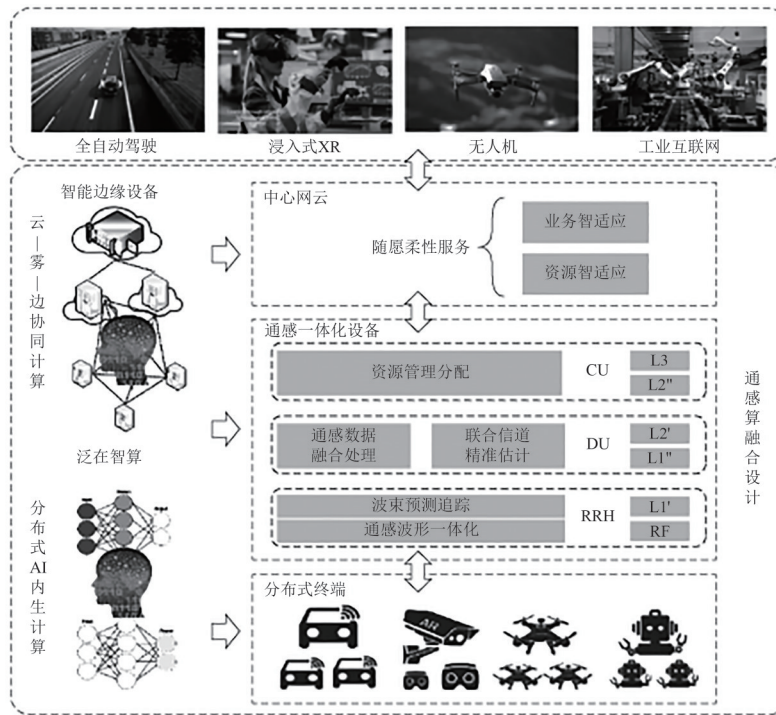


图1 6G通信感知一体化蜂窝网络架构^[6]

Fig. 1 6G ISAC Cellular network architecture^[6]

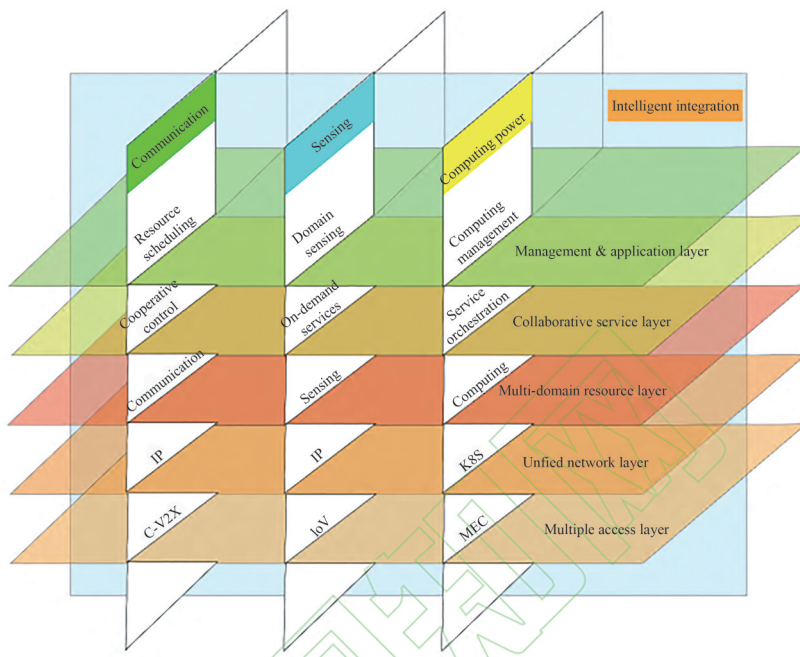


图2 “五层四面”车联网通感算一体化蜂窝网络架构^[10]

Fig. 2 Cellular network architecture of the IoV communication-sensing-computing-integrated with five layers and four planes^[10]

杂的路况与无线信道情况。最后,车联网需要计算资源的支撑,汽车终端受限于自身相对较弱的计算能力,往往需要进行通信任务卸载(task offload),即

将部分通信的计算任务卸载到服务器或路边单元进行云计算、雾计算、移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC),需要有针对性的进一步研究、设计满

表1 通感一体化车联网蜂窝网络架构的代表性文献
Tab. 1 Representative literatures on the ISAC IoV Cellular network architecture

文献	主要贡献	局限性
[9]	提出了三种5G通感一体化蜂窝网络架构	不适用6G;只考虑了通信与感知,未考虑计算
[1,3]	初步定义了6G通感算一体化三层蜂窝网络架构,在通感一体化的基础上进一步融入计算	未将网络层次映射到具体网元
[6]	提出了可支撑车联网应用的6G通感算一体化蜂窝网络架构,将网络层次映射到具体的蜂窝网元	存在车联网通感算融合的架构壁垒
[10]	提出了6G C-V2X车联网通感算一体化“五层四面”蜂窝网络架构,打破架构壁垒	未将网络架构的层、面映射到具体网元

足车联网算力需求的通感算一体化网络架构,并将网络不同层面的功能映射到具体的网元设备。

3.2 波形设计

根据所基于的波形,通信感知一体化车联网的波形设计基本可分为单载波线性连续波形设计与多载波波形设计两种。

首先,在车联网单载波线性连续波波形设计方面,对于调频连续波,2011年加拿大蒙特利尔大学的HAN Liang和WU Ke在文献[11]使用梯形调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)波形信号,面向智能交通场景实现了基于DSRC-V2X标准的通信感知一体化,双工方式为时分双工,采用时分复用的方式进行雷达感知和通信。FMCW波形方案的实现成本较低,但具有距离多普勒耦合问题。调相连续波(Phase Modulated Continuous Wave, PMCW)也可用于汽车雷达,被传输的有效信息可以嵌入到PMCW波形中。2017年,卢森堡大学的DOKHANCHI S H等在文献[12]提出了一种基于PMCW波形的车联网通信感知一体化系统,该波形不易受车联网动态多目标场景中的干扰影响,且可避免通信和感知之间的互干扰,并在文献[12-13]对所提出的PMCW波形的性能进行研究,分析通信感知一体化系统中雷达和通信的克拉美罗下界和误码率性能,以及波形参数设置对通信、雷达性能的影响。需要指出的是,受限于雷达信号的重复频率,一般而言线性连续波波形更为适合低速通信场景,对于宽带高速无线通信,较为适合使用多载波波形。

其次,在车联网多载波一体化波形设计方面,德国卡尔斯鲁厄理工学院的STURM等在文献[14]使用基于DSRC-V2X IEEE 802.11p标准的OFDM波形,使用矩阵对应元素相除(将接收矩阵除以发射矩阵)和周期图(二维FFT)算法获取目标车辆的

时延和多普勒频偏,进而得到车辆的距离和多普勒径向速度。在此基础上,为了克服前文所述车联网FMCW等单频LFM波形具有的距离多普勒耦合问题,文献[15]使用正交啁啾复用(Orthogonal Chirp Division Multiplexing, OCDM)波形作为通感一体化波形,并提出了一种循环解耦雷达信号处理算法,该算法实现了高距离分辨率,但计算复杂度较高。文献[16]针对低速场景提出了一种基于对称三角波脉冲和OFDM脉冲的信号设计方法,其中三角调频可以通过求解差频来解耦距离多普勒信息。然而,与文献[11]类似,三角波脉冲和OFDM脉冲是以时分复用模式交替发送,频谱利用率有待提高。文献[17]提出了基于OFDM波形的双站车辆通信感知一体化系统,文献[13]进一步提出了毫米波频段的双站通信感知一体化系统,设计了面向汽车雷达和通信的毫米波OFDM波形。需要指出的是,高动态的车联网场景会带来更大的多普勒频偏,而OFDM波形对多普勒频偏敏感,需要设计更为新颖的车联网多载波通感一体化波形。对于车联网存在的车辆高速运动的高动态场景,近期被提出的新型正交时频空(Orthogonal Time Frequency Space, OTFS)调制多载波波形可利用回波的时延多普勒域进行调制,可以解决OFDM对多普勒频偏敏感的问题。文献[18]研究了车联网场景下基于OTFS通信感知一体化波形进行参数估计的有效性,并与基于FMCW和OFDM波形的性能进行了性能对比。表2总结了通感一体化车联网波形设计的部分代表性文献,比较了各类波形的优缺点。

3.3 干扰与资源管理

毫米波雷达正在成为汽车安全驾驶的重要射频单元。它也是现代车辆上高级驾驶辅助系统的关键组件,支持前向碰撞警告、车道变更警告和紧急制动

表2 通感一体化车联网波形设计的代表性文献

Tab. 2 Representative literatures on the ISAC IoV waveform design

文献	波形种类	波形	优点	缺点
[11]	单载波	FMCW 梯形波	实现成本低、低 PAPR	距离多普勒问题、通信速率低
[12]		PMCW	不易受车联网动态多目标场景中的干扰影响,且可避免通信和感知之间的互干扰、低 PAPR	通信速率低
[14]		OFDM	通信速率高、计算复杂度低	高 PAPR、对高动态车联网场景的多普勒频偏敏感
[16]	多载波	OFDM+FMCW 三角波	抑制距离多普勒耦合效应、PAPR 较 OFDM 更低	OFDM 与 FMCW 三角波时分复用,频谱利用率有待提高
[15]		OCMD	抑制距离多普勒耦合效应、距离分辨率高	计算复杂度高、高 PAPR
[18]		OTFS	通信速率高、更适合高动态车联网场景、PAPR 较 OFDM 更低	作为一种块调制方案,较传统 OFDM 延迟更高

警告等。随着车辆的增加,车与车之间雷达的互干扰成为限制雷达测距性能的关键因素。车联网通感一体化研究需要对车辆雷达干扰进行准确合理的分析,这也为后续车联网一体化波形设计与信号处理、干扰与资源管理算法的研究提供理论基础。

首先,在车联网雷达互干扰建模领域,国外方面,对于简单的双车道互干扰模型,2007年澳大利亚悉尼大学的 BROOKER 在文献[19]研究了在重叠频带中工作的两个车载雷达施加的互干扰,干扰的影响将导致 FMCW 雷达的信噪比明显降低。2018年澳大利亚皇家墨尔本理工大学的 AL-HOURANI A 等在文献[20]首次引入随机几何方法来建模车辆雷达干扰和可能的紧界。同年德国亚琛大学的 MUNARI A 和瑞典皇家理工学院的 PETROVA 等在文献[21]使用随机几何方法描述由独立脉冲雷达所组成平面网络中的互干扰效应。基于上述双车道互干扰模型,部分文献对其进行扩展,以对更为复杂的多车道互干扰进行建模。国内方面,北京理工大学、北京邮电大学相关团队分别在文献[22]、[23]对多车道互干扰建模,其中文献[22]用高斯波形(函数)逼近定向天线辐射方向图,推导出了雷达平均干扰的封闭表达式。已有研究多将波动变化的随机变量——目标雷达截面(RCS)简化为一个常数,与实际情况不符,致使仿真结果不够精准。针对该问题文献[24]利用随机几何中的泊松点过程(PPP)对车辆位置进行建模,研究了双向多车道场景中多辆车之间 FMCW 雷达的互干扰。该文使用卡方模型来建模目标雷达截面(RCS)的波动。基于该模型,推导得出包括对向车道直接入射干扰和同向车道间接反射干扰在内的成功测距概率的闭式解,分析了车道车辆强度以及信号干扰噪声比带来的影响。

其次,在车联网通感融合的干扰与通信资源管理领域,带宽、功率等通信资源的管理(分配)与干扰彼此影响,在通感一体化设计时可以联合考虑,基于上述文献中的车联网互干扰模型,针对车联网互干扰与资源管理,文献[25-27]通过雷达波形、时频资源和空间配置的多个雷达之间的主动协同,可以有效地消除雷达互干扰,从而在有限的资源下获得较高的感知性能,进一步提高车联网道路的安全性。针对车联网资源管理,文献[28]提出在通感一体化 V2X 车联网中,不同的车辆可能需要不同的通信和感知服务,因此对通信速率和感知分辨率有不同的需求。在给定总可用频谱的情况下,所有这些要求都可以作为带宽分配设计中的约束条件。文献[29]提出了一种通感一体化功率分配设计方案,以最小化多车克拉美罗下界的总和为优化目标,以多个车辆的总速率为约束条件,与经典的注水算法相比,在提高通信速率的同时,显著降低了估计误差。

最后,在车联网通算融合的边缘计算资源管理(边缘计算能力部署)领域,为了解决通信任务卸载问题,需进行通信与计算资源的联合优化。文献[30]建立了任务重要性的数学模型,设计了任务卸载排序算法和基于强化学习的卸载算法,优化了任务卸载的能耗和延迟。文献[31]提出了一种 V2X 场景分布式卸载策略,多个协作节点具有串行卸载模式和并行计算模式,对系统延迟进行优化。文献[32]提出基于深度强化学习的车联网频谱与功率资源管理机制,有效提升了车联网用户信道容量。

通过上述文献的介绍可以发现,现有车联网干扰与资源管理方面的研究存在一定局限性,已有研究工作大多关注车联网通感一体化或通算一体化的资源管理,需进一步研究面向车联网通感算一体

化的多维资源协作管理与优化方案,增强通感算多维资源管理对车联网高动态时变环境的智能适应能力,提高资源利用率,并进一步研究具有不同通信速率和时延的无线通信技术对分布式边缘计算任务卸载量的影响。

3.4 波束管理

车联网较为适合使用毫米波等高频段电磁波与大规模、超大规模 MIMO 波束赋形、波束管理技术。车联网中的波束对准是一种典型的感知辅助通信的应用场景,借助车辆、路侧单元(Road Side Unit, RSU)、基站等设备中的多天线毫米波雷达通过感知获取到的目标位置等先验信息,通信无须频繁的通过信道估计获得信道状态信息,即可实现波束对准,有效减少通信开销。

在相应的车联网多天线波束管理与波束赋形方面,文献[33]利用安装在 RSU 上的 MIMO 雷达来感知车辆,依靠回波信号来估计通信信道的协方差矩阵。RSU 可以进一步设计预编码器并向车辆发送导频,以帮助其完成接收波束赋形。由于利用了信道互易性,不再需要车辆和 RSU 之间的反馈。南方科技大学的刘凡、袁伟杰等在文献[34-35]在 V2I 波束跟踪和预测中使用通感一体化信号,无须专用传感器,实现了集成和协作增益。文献[34]提出了一种用于 V2I 应用的感知辅助的波束跟踪方案。首先从雷达回波中提取车辆的感知参数,然后使用扩展卡尔曼滤波算法,通过车辆状态转换模型进行波束预测,并提出了一种多用户功率分配方案,以最小化估计误差。文献[35]开发了一种用于车联网的波束赋形方案,其中 RSU 基于通信感知一体化信号的回波来估计和预测车辆的运动参数。提出了一种基于因子图的消息传递算法,并通过最大后验估计实现了接近最优的性能,基于预测的角度设计波束赋形器,以建立通信链路。文献[36]概述了在 V2V 和 V2I 应用中采用毫米波的动机和挑战。利用感知能力,提出了一种毫米波波束训练的解决方案,该文也是感知辅助通信研究的良好开端。刘凡等在文献[37]从技术角度回顾了通信感知一体化的基本原理,概述了通信感知一体化车联网中的最新技术,给出了信令传输的一般设计准则和代表性方法,并进一步在文献[38]解决了 V2I 链路的预测波束成形问题,不需要显式的状态演化模型。在 RSU 发送的双功能雷达通信(Dual-Functional Radar-Communication, DFRC)一体化信号的帮助下完成波

束跟踪,利用反射回波信号来估计车辆的位置参数,提出了一种无须指定状态模型的预测车辆下一位置的方法。文献[39]是关于雷达辅助车辆通信波束对准领域的开创性论文。使用来自雷达的信息提取信道信息,然后调整车辆通信系统的波束。

已有车联网通感一体化波束管理的研究较多关注 V2I 波束对准,而 V2I 波束对准面临的主要挑战是车辆高速移动的通信接收机及相对 RSU 快速变化的尺寸对波束覆盖范围的影响,未来发展方向是感知信息辅助下实现更细粒度的车辆状态追踪^[5]。另外,由于基础设施的位置固定不变,V2I 相对来说实现波束对准的难度较低,而 V2V 由于发送和接收端都处于运动状态,波束对准的挑战度更大,因此 V2V 波束对准仍然有待进一步的研究。

3.5 硬件设计与验证

本节就车联网通信感知一体化的收发信机架构设计与硬件技术验证两个方面进行论述。

首先,在车联网通信感知一体化收发信机架构设计方面,在低频段,文献[11]设计了适用于智能交通系统的 Sub-6 GHz 通信感知一体化收发信机,采用 TDD 架构和时分复用(通信和感知模式被安排在不同的时隙),在此基础上文献[40-41]对其进行了改进。在高频段,文献[42-43]提出一种适用于毫米波频段的通信感知一体化车用收发信机架构并硬件实现了基于所提架构的收发信机。文献[44-45]设计了较为新颖的基于多端口干涉器的通感一体化收发信机架构,发送机与接收机链路部分分离,更为适合车联网毫米波频段和大规模 MIMO 场景,能够同时进行雷达到达角检测和数据通信,支持高动态车辆的通信和雷达感知,优点是便于估计到达角、简单易实现等,缺点是接收机灵敏度减小、动态范围有限。

其次,在车联网通信感知一体化硬件技术验证方面,在产业界,2022 年中国移动通信研究院与华为公司团队在文献[9]验证了 5G 通信感知一体化技术的感知能力,在车联网地面交通场景对感知功能进行硬件实测与技术验证。实测表明所研制一体化设备能够对车辆移动目标进行较高精度的感知,工作频点为 26 GHz、带宽为 100 MHz、感知距离为 500 m 以上。在通信感知一体化波形的设计方面,文献[9]采用直接复用 5G NR CP-OFDM 标准波形的方案,也就是复用通信信号实现感知功能,以最大化资源利用率。在学术界,2009、2011 年德国卡尔斯鲁厄理工学院的 STURM 等在文献[46, 14]

研究并硬件验证了毫米波 OFDM 雷达通信一体化系统,工作频率 24 GHz,该系统可以对多辆汽车目标的距离和速度进行感知。2020-2021 年我国北京邮电大学团队在文献[47-49]初步搭建了 6G 毫米波通感一体化实验系统。使用美国国家仪器(National Instruments, NI)公司的 PXIe、USRP 软件无线电设备,工作频点为毫米波频段的 28 GHz,通信与感知时分复用,双工方式为 TDD,通信速率为 2.2~2.8 Gbps,感知定位精度为 0.2 m。2022 年,东南大学曾勇教授团队演示了所开发的毫米波 OFDM 车辆通信感知一体化验证系统^[50]。该系统发端为 8x8 相控阵 MIMO 天线,感知接收端为 1x16 相控阵天线,车载 USRP 支持视频通信传输,支持小车的变道避障和距离、角度、速度的基础感知。由 USRP 实现视频编码、通感一体化信号传输、雷达信号处理等功能。

上述文献验证的多为单车场景下的通感一体化技术,进一步的,在车联网多车组网协同感知的通感硬件技术验证方面,2022 年,北京邮电大学团队在文献[51-52]对之前文献[47-49]实现的通感一体化系统进行升级,如图 3 所示,将场景由简单的单车感知拓展到更为复杂的多车组网协同感知。引入计算功能,设计并演示了多车融合的通信感知计算一体化网络级平台。为了克服单个自动驾驶车辆传感能力提高的瓶颈,提出了一种基于加权平均精度的感知数据融合算法,通过共享来自两个基于时分的通感一体化车辆的感知数据来提高目标定位性能。与单车感知方案相比,所提出的基于多车融合的感知算法大幅降低了目标定位均方根误差。

以上车联网通感一体化硬件验证原型系统基本都使用了 OFDM 波形,频段涉及 Sub-6 GHz 和毫米波,能够实现雷达测距、测速等基本感知功能,并且已经初步验证了通感算一体化的多车协同感知方案^[51,52]。已有车联网硬件验证原型系统存在一定局限性,首先,在 6G 层面,现有车联网通感一体化验证系统对 PXIe、USRP 等商业设备、仪表的依赖程度

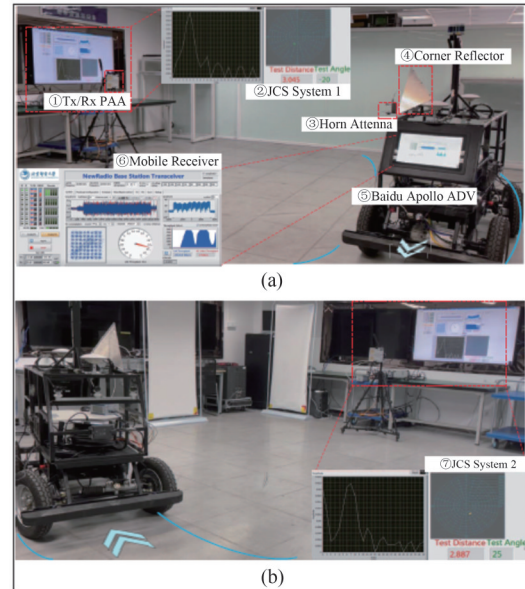


图3 28 GHz 通信感知一体化车联网硬件技术验证^[52]

Fig. 3 Hardware technical verification of 28 GHz ISAC IoV^[52]

较大,未来需加大基于自主国产硬件芯片与产品的研制力度。然后,现有车联网硬件原型所验证的雷达感知功能较为基础,多为测距、测速等基本功能,缺乏成像等方面的更为综合的感知功能验证。最后,车联网场景具有高动态特性,较一般场景更为复杂多变,需要高速率、高可靠性、低延迟的通信性能。多车协同感知时,Sub-6 GHz/毫米波雷达、激光雷达、摄像头等多模态海量感知数据的传输与融合需要极高的通信速率和计算能力,现有硬件平台所验证的 6G 车联网场景和网络架构仍然较为基础,更为复杂的场景和架构有待进一步的硬件技术验证。表 3 总结了通感一体化车联网硬件验证情况,其中的“——”符号表示文献未提供相关信息。

4 未来研究展望

4.1 车联网通信感知一体化基础理论研究

除了前文所述高动态特性,车联网还具有覆盖

表3 通感一体化车联网硬件验证情况

Tab. 3 ISAC IoV hardware verification

文献	车联网场景	频点、带宽	波形	通信验证情况	感知验证情况
[9]	5G、单基站感知、通感一体化	26 GHz、100 MHz	CP-OFDM	——	测距距离 500 m
[47-49]	6G、单车感知、通感一体化	28 GHz、800 MHz	OFDM	2.2~2.8 Gbps	测距距离 10 m, 测距精度 0.189 m
[50]	6G、单车感知、通感一体化	27.5 GHz、——	OFDM	支持视频传输	支持测距、测速、测角
[51-52]	6G、多车协同感知、通感算一体化	28 GHz、800 MHz	OFDM	2.8 Gbps	测距距离 0.9 m, 测距精度 0.044 m

范围广、极高的数据传输速率、极低的传输时延等特性,以保障无人自动驾驶的安全性。此外,车辆的实时移动性导致网络拓扑与无线信道高动态变化,对于路边行人、路上车辆进行行为预测的难度也较大。V2I通信波束与感知波束存在相互干扰,需要设计专门的通信感知互干扰模型。此外,需要继续深入探索车联网场景下通信与感知的信息论之间的联系,针对C-V2X车联网所基于的4G~6G蜂窝移动通信系统,据笔者所知,缺乏对其所使用MIMO-OFDM系统的感知互信息的研究。面向后5G、6G蜂窝移动通信系统,感知互信息与雷达检测性能指标、估计性能等的关系仍然不明确,需要针对实际移动通信系统研究通感互信息理论,进一步研究通信-感知性能的权衡关系,并对感知互信息与其他感知性能指标的关系进行研究,进而建立通感一体化系统的性能指标体系。进一步的,需要在通感一体化在互信息、性能表征指标等方面的成果基础之上,针对车联网特殊场景研究其通感一体化基础理论、网络架构、信道建模等。

4.2 车联网专用一体化波形设计

由于实际应用场景的限制,针对车联网场景专门定制的通信感知一体化波形信号在车联网系统中的应用仍然受到限制。已有的通信感知一体化波形设计往往被建模为较为复杂的数学优化问题,并且需要来自于无线信道的先验信息。然而,在高度动态的车联网环境中,较难获得准确的无线信道瞬时信息,加重了对前述优化问题进行求解的困难程度^[5]。另外,针对一般场景的一体化波形设计方案虽然考虑了移动性,但是难以适用车联网高速移动的高动态场景。因此,需要针对车联网设计专用的定制化通感一体化波形,如基于OTFS的车联网通感一体化波形等。

4.3 车联网通信感知计算一体化

文献[53]针对单车感知无法满足未来自动驾驶安全需求的现状,面向多车传感器信息融合与时效性共享问题,提出了基于感知-通信-计算融合的智能车联网方法与解决思路。目前在通信与计算融合方面,以及感知与计算融合方面,已有文献进行了专门的研究,但是对于车联网通信感知计算一体化相关的研究还处于起步阶段,现有的相关工作大多集中于通信与感知、通信与计算、感知与计算等双边能力的融合方面,而对车联网通信感知计算三者的一体化与深度融合,目前基本处于愿景

与设想阶段,迄今鲜见深入且全面的基础理论和关键技术对其进行支撑。下面对车联网通感算未来的研究方向进行展望。

首先,未来在车联网协同感知与信息融合,以及基于深度学习、强化学习、联邦学习等AI算法的通信感知计算一体化深度融合与网络设计值得深入研究,支持大规模多车辆车联网多维度资源分配优化、多车入网时任务处理总时延与多车感知性能联合优化等。然后,现有研究大多聚焦于单站通感算的研究,对于多基站、多车协同感知的研究尚处于起步阶段,多车或路侧多基站协同感知时,毫米波雷达、激光雷达、摄像头等多模态海量感知数据的传输与融合需要极高的通信速率和计算能力。需进一步研究专门的信息融合与资源管理技术,包括多模态感知环境信息的卡尔曼滤波融合或深度学习理解性融合等。最后(但并非最不重要),需要对多基站、多车等车联网多站协同感知场景下的通感算一体化方案进行硬件原型技术验证。

5 结论

5. 5G、6G通信感知一体化车联网技术正在蓬勃发展,近几年国内外在通感一体化车联网领域的网络架构、波形设计、干扰与资源管理、波束管理、硬件设计与验证等方面已有初步的研究成果,推动了通信、车联网与无人自动驾驶等产业的发展。未来在通感一体化车联网的基础理论、网络架构、信道建模等基础研究,专用一体化波形设计,以及通信感知计算一体化组网(结合AI技术)等方面,仍然需要进一步的深入研究,以加快通信感知一体化技术、车联网技术的落地和产业化进程。

参考文献

- [1] IMT-2030(6G)推进组. 6G网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021.
IMT-2030 (6G) Promotion Group. 6G network architecture vision and key technology outlook white paper [R]. 2021. (in Chinese)
- [2] 刘凡,袁伟杰,原进宏,等. 雷达通信频谱共享及一体化:综述与展望[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 467-484.
LIU Fan, YUAN Weijie, YUAN Jinhong, et al. Radar-communication spectrum sharing and integration: Overview and prospect [J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 467-484. (in Chinese)
- [3] IMT-2030(6G)推进组通信感知一体化任务组. 通信感

- 知一体化技术研究报告[R]. 2021.
- Task group for integration of communication and perception, IMT-2030 (6G) Promotion Group. Research report on integration of communication and perception technology[R]. 2021. (in Chinese)
- [4] LIU Fan, CUI Yuanhao, MASOUIROS C, et al. Integrated sensing and communications: Toward dual-functional wireless networks for 6G and beyond[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(6): 1728-1767.
- [5] 程翔, 张浩天, 杨宗辉, 等. 车联网通信感知一体化研究: 现状与发展趋势[J/OL]. *通信学报*: 1-15 [2022-08-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2022&filename=TXXB202208017&uniplatform=NZKPT&v=plc0SX0ZHq1uZLv_CbL4mLD5a0HCHV3pVcJWLZaNOS2Yc0uhNrEcjvue0XRsqjIC. CHENG Xiang, ZHANG Haotian, YANG Zonghui, et al. Integrated sensing and communications for Internet of vehicles: current status and development trend[J/OL]. *Journal on Communications*: 1-15 [2022-08-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFDLAST2022&filename=TXXB202208017&uniplatform=NZKPT&v=plc0SX0ZHq1uZLv_CbL4mLD5a0HCHV3pVcJWLZaNOS2Yc0uhNrEcjvue0XRsqjIC. (in Chinese)
- [6] 闫实, 彭木根, 王文博. 通信-感知-计算融合: 6G 愿景与关键技术[J]. *北京邮电大学学报*, 2021, 44(4): 1-11. YAN Shi, PENG Mugen, WANG Wenbo. Integration of communication, sensing and computing: The vision and key technologies of 6G[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2021, 44(4): 1-11. (in Chinese)
- [7] 陈山枝, 时岩, 胡金玲. 蜂窝车联网(C-V2X)综述[J]. *中国科学基金*, 2020, 34(2): 179-185. CHEN Shanzhi, SHI Yan, HU Jinling. Cellular vehicle to everything (C-V2X): A review[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2020, 34(2): 179-185. (in Chinese)
- [8] 陈山枝. 蜂窝车联网(C-V2X)及其赋能智能网联汽车发展的辩思与建议[J]. *电信科学*, 2022, 38(7): 1-17. CHEN Shanzhi. Critical thinking and suggestions on C-V2X with the developments of intelligent connected vehicles[J]. *Telecommunications Science*, 2022, 38(7): 1-17. (in Chinese)
- [9] 徐晓东, 李岩, 叶威, 等. 通信感知一体化应用场景、关键技术和网络架构[J]. *移动通信*, 2022, 46(5): 2-8. XU Xiaodong, LI Yan, YE Wei, et al. Application scenarios, key technologies and network architecture of integrated sensing and communication[J]. *Mobile Communications*, 2022, 46(5): 2-8. (in Chinese)
- [10] 马忠贵, 李卓, 梁彦鹏. 自动驾驶车联网中通感算融合研究综述与展望[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(1): 137-149. MA Zhonggui, LI Zhuo, LIANG Yanpeng. Overview and prospect of communication-sensing-computing integration for autonomous driving in the Internet of vehicles[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(1): 137-149. (in Chinese)
- [11] HAN Liang, WU Ke. Multifunctional transceiver for future intelligent transportation systems[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, 59(7): 1879-1892.
- [12] DOKHANCHI S H, BHAVANI SHANKAR M R, NIJSURE Y A, et al. Joint automotive radar-communications waveform design[C]. 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). Montreal, QC, Canada. IEEE, 2017: 1-7.
- [13] DOKHANCHI S H, MYSORE B S, MISHRA K V, et al. A mmWave automotive joint radar-communications system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(3): 1241-1260.
- [14] STURM C, WIESBECK W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(7): 1236-1259.
- [15] HUAN Sha, CHEN Weichun, PENG Yifen, et al. Orthogonal chirp division multiplexing waveform for mmWave joint radar and communication[C]. *IET International Radar Conference (IET IRC 2020)*, Online Conference, 2020: 1222-1226.
- [16] LIU Gaogao, ZHENG Minhua, WEI Nan, et al. Doppler compensation of triangular wave for OFDM communication integration in low speed scenario[C]. 2019 6th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Xiamen, China, 2019: 1-5.
- [17] DOKHANCHI S H, BHAVANI SHANKAR M R, STIFTER T, et al. OFDM-based automotive joint radar-communication system[C]. 2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18). Oklahoma City, OK, USA. IEEE, 2018: 902-907.
- [18] GAUDIO L, KOBAYASHI M, CAIRE G, et al. On the effectiveness of OTFS for joint radar parameter estimation and communication[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(9): 5951-5965.
- [19] BROOKER G M. Mutual interference of millimeter-wave

- radar systems[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, 49(1): 170-181.
- [20] AL-HOURANI A, EVANS R J, KANDEEPAN S, et al. Stochastic geometry methods for modeling automotive radar interference[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(2): 333-344.
- [21] MUNARI A, SIMIĆ L, PETROVA M. Stochastic geometry interference analysis of radar network performance[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(11): 2362-2365.
- [22] CHU Ping, ZHANG J A, WANG Xiaoxiang, et al. Interference characterization and power optimization for automotive radar with directional antenna[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 3703-3716.
- [23] HUANG Jingxuan, FEI Zesong, WANG Tianxiang, et al. V2X-communication assisted interference minimization for automotive radars[J]. *China Communications*, 2019, 16(10): 100-111.
- [24] FANG Zixi, WEI Zhiqing, CHEN Xu, et al. Stochastic geometry for automotive radar interference with RCS characteristics[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2020, 9(11): 1817-1820.
- [25] AYDOGDU C, KESKIN M F, CARVAJAL G K, et al. Radar interference mitigation for automated driving: Exploring proactive strategies[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2020, 37(4): 72-84.
- [26] MAZHER K U, HEATH R W, GULATI K, et al. Automotive radar interference characterization and reduction by partial coordination[C]. 2020 IEEE Radar Conference (RadarConf20). Florence, Italy. IEEE, 2020: 1-6.
- [27] ROOS F, BECHTER J, KNILL C, et al. Radar sensors for autonomous driving: Modulation schemes and interference mitigation[J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2019, 20(9): 58-72.
- [28] YANG Heng, WEI Zhiqing, FENG Zhiyong, et al. Queue-aware dynamic resource allocation for the joint communication-radar system[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(1): 754-767.
- [29] LIU Fan, MASOUIROS C. Joint localization and predictive beamforming in vehicular networks: Power allocation beyond water-filling[C]. ICASSP 2021 - 2021 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Toronto, ON, Canada. IEEE, 2021: 8393-8397.
- [30] 张海波, 荆昆仑, 刘开健, 等. 车联网中一种基于软件定义网络与移动边缘计算的卸载策略[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(3): 645.
- ZHANG Haibo, JING Kunlun, LIU Kaijian, et al. An offloading mechanism based on software defined network and mobile edge computing in vehicular networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(3): 645. (in Chinese)
- [31] 曹敦, 张应宝, 邹电, 等. V2X多节点协同分布式卸载策略[J]. *通信学报*, 2022, 43(2): 185.
- CAO Dun, ZHANG Yingbao, ZOU Dian, et al. Multi-node cooperative distributed offloading strategy in V2X scenario[J]. *Journal on Communications*, 2022, 43(2): 185. (in Chinese)
- [32] 王晓昌, 吴璠, 孙彦赞, 等. 基于深度强化学习的车联网资源管理[J]. *工业控制计算机*, 2021, 34(9): 31.
- WANG Xiaochang, WU Fan, SUN Yanzan, et al. Internet of vehicles resource management based on deep reinforcement learning[J]. *Industrial Control Computer*, 2021, 34(9): 31. (in Chinese)
- [33] ALI A, GONZALEZ-PRELCIC N, HEATH R W, et al. Leveraging sensing at the infrastructure for mmWave communication[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 58(7): 84-89.
- [34] LIU Fan, YUAN Weijie, MASOUIROS C, et al. Radar-assisted predictive beamforming for vehicular links: Communication served by sensing[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(11): 7704-7719.
- [35] YUAN Weijie, LIU Fan, MASOUIROS C, et al. Bayesian predictive beamforming for vehicular networks: A low-overhead joint radar-communication approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(3): 1442-1456.
- [36] CHOI J, VA V, GONZALEZ-PRELCIC N, et al. Millimeter-wave vehicular communication to support massive automotive sensing[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2016, 54(12): 160-167.
- [37] LIU Fan, MASOUIROS C. A tutorial on joint radar and communication transmission for vehicular networks—Part I: Background and fundamentals[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 25(2): 322-326.
- [38] LIU Fan, MASOUIROS C. A tutorial on joint radar and communication transmission for vehicular networks—Part III: Predictive beamforming without state models[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 25(2): 332-336.
- [39] GONZÁLEZ-PRELCIC N, MÉNDEZ-RIAL R, HEATH R W. Radar aided beam alignment in MmWave V2I communications supporting antenna diversity[C]. 2016 Information Theory and Applications Workshop (ITA). La Jolla, CA, USA. IEEE, 2017: 1-7.
- [40] MOGHADDASI J, WU Ke. Improved joint radar-radio (Rad-

- Com) transceiver for future intelligent transportation platforms and highly mobile high-speed communication systems [C]. 2013 IEEE International Wireless Symposium (IWS). Beijing, China. IEEE, 2013: 1-4.
- [41] MOGHADDASI J, WU Ke. Multifunctional transceiver for future radar sensing and radio communicating data-fusion platform[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 818-838.
- [42] HAN L, WU K. 24-GHz joint radar and radio system capable of time-agile wireless sensing and communication [C]. 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Baltimore, MD, USA. IEEE, 2011: 1.
- [43] HAN Liang, WU Ke. 24-GHz integrated radio and radar system capable of time-agile wireless communication and sensing[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(3): 619-631.
- [44] MOGHADDASI J, WU Ke. Unified radar-communication (RadCom) multi-port interferometer transceiver [C]. 2013 European Microwave Conference. Nuremberg, Germany. IEEE, 2013: 1791-1794.
- [45] MOGHADDASI J, WU Ke. Millimeter-wave multifunction multipoint interferometric receiver for future wireless systems [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(3): 1452-1466.
- [46] STURM C, ZWICK T, WIESBECK W. An OFDM system concept for joint radar and communications operations [C]. VTC Spring 2009-IEEE 69th Vehicular Technology Conference. Barcelona, Spain. IEEE, 2009: 1-5.
- [47] ZHANG Qixun, SUN Huan, WEI Zhiqing, et al. Sensing and communication integrated system for autonomous driving vehicles [C]. IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Toronto, ON, Canada. IEEE, 2020: 1278-1279.
- [48] ZHANG Qixun, LI Zhenhao, GAO Xinye, et al. Performance evaluation of radar and communication integrated system for autonomous driving vehicles [C]. IEEE INFOCOM 2021-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2021: 1-2.
- [49] ZHANG Qixun, WANG Xinna, LI Zhenhao, et al. Design and performance evaluation of joint sensing and communication integrated system for 5G mmWave enabled CAVs[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2021, 15(6): 1500-1514.
- [50] 在线视频, <https://www.chaspark.com/#/coffeeHours/media/809260877825687552>, 2022.
Online video, <https://www.chaspark.com/#/coffeeHours/media/809260877825687552>, 2022. (in Chinese)
- [51] ZHANG Qixun, GAO Xinye. Joint communication and sensing enabled cooperative perception testbed for connected automated vehicles [C]. IEEE INFOCOM 2022-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). New York, NY, USA. IEEE, 2022: 1-2.
- [52] ZHANG Qixun, SUN Hongzhuo, GAO Xinye, et al. Time-division ISAC enabled connected automated vehicles cooperation algorithm design and performance evaluation [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2022, 40(7): 2206-2218.
- [53] 尉志青, 马昊, 张奇勋, 等. 感知-通信-计算融合的智能车联网挑战与趋势[J]. *中兴通讯技术*, 2020, 26(1): 45-49.
WEI Zhiqing, MA Hao, ZHANG Qixun, et al. Challenge and trend of sensing, communication and computing integrated intelligent Internet of vehicles [J]. *ZTE Technology Journal*, 2020, 26(1): 45-49. (in Chinese)

作者简介



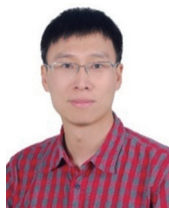
林粤伟 男, 1979年生, 山东青岛人。青岛科技大学信息科学技术学院副教授, 硕士生导师, 博士, 主要研究方向为通信感知一体化、5G/6G 无线通信、FPGA 嵌入式技术等。

E-mail: linyuewei@qust.edu.cn



王溢 男, 1997年生, 河南新乡人。北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室博士研究生, 主要研究方向为通信感知一体化、资源分配等。

E-mail: yigg@bupt.edu.cn



张奇勋(通讯作者) 男, 1983年生, 辽宁沈阳人。北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室教授, 博士, 主要研究方向为通信感知一体化、车联网等。

E-mail: zhangqixun@bupt.edu.cn



尉志青 男, 1987年生, 山西大同人。北京邮电大学泛网无线通信教育部重点实验室副教授, 博士, 主要研究方向为面向智能机器的通信感知一体化技术等。

E-mail: weizhiqing@bupt.edu.cn