



研究与开发

基于计算控制通信融合的车联网资源协同优化技术研究

张志龙, 张天琦, 李雪菲, 刘丹谱
(北京邮电大学, 北京 100876)

摘要: 车联网高度动态且业务种类多样, 安全业务和非安全业务并存。如何同时满足差异化的业务需求, 是车联网面临的重大挑战。分析了计算、控制与通信等要素在车联网中的融合方式, 并指出以协同管理多维资源提升驾驶安全性和业务体验质量的必要性。针对业务特点分别介绍了面向自动驾驶的控制与通信融合机制、面向信息娱乐业务的计算与通信资源协同管理机制以及面向差异化业务并发的多维资源协同管理机制, 最后基于相关挑战展望了该领域未来的技术发展趋势。

关键词: 车联网; 控制与通信融合; 多维资源管理; 自动驾驶; 高动态

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023090

Research on collaborative resource optimization technology based on convergence of computing, control and communication in Internet of vehicles

ZHANG Zhilong, ZHANG Tianqi, LI Xuefei, LIU Danpu
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Internet of vehicles is highly dynamic and has diverse application types, including both security and non-security applications. How to satisfy differentiated requirements at the same time is one of the major challenges that Internet of vehicles face. Therefore, the convergence of computing, control and communication in Internet of vehicles was investigated, and the necessity of the collaborative management of multi-dimensional resources was outlined to improve both the driving safety and the quality of experience. Specifically, the control and communication convergence mechanism for autonomous driving, the computing and communication resource collaborative management mechanism for infotainment application, and the multi-dimensional resource collaborative management mechanism for differentiated application concurrency were introduced respectively according to the application characteristics. Finally, the technology development trend of this field was discussed based on related challenge analysis.

Key words: Internet of vehicles, convergence of control and communication, multi-dimensional resource management, autonomous driving, high dynamics

收稿日期: 2022-10-27; 修回日期: 2023-04-12

通信作者: 刘丹谱, dpliu@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.62271065, No.61971069, No.U22B2001)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62271065, No.61971069, No.U22B2001)



0 引言

作为智能交通和自动驾驶的关键使能技术,蜂窝车联网 (cellular-vehicle to everything, C-V2X) 受到了工业界和学术界的广泛关注^[1]。2020 年,国家发展和改革委员会等联合出台《智能汽车创新发展战略》,提出建设超低时延、超高可靠、超大带宽、广泛覆盖的车用无线通信网络是智能汽车创新发展的主要任务之一^[2]。

车联网承载的业务种类众多,既包括道路安全类、交通效率类、信息服务类等基本应用,也包括车辆编队、自动驾驶、远程驾驶、传感器扩展等增强应用^[3],不同业务的性能评价指标以及对网络资源的需求差异化明显。例如,道路安全性类应用需求以低时延、高可靠性为主。自动驾驶等增强类应用中,车辆通常集成了车载雷达、摄像机等上百个传感器,每秒会产生大量数据用于行驶控制。车载应用的智能化在一定程度上提高了驾驶的安全性和舒适性,但随之而来的是频繁的交互控制、毫秒级的时延需求以及较大的计算和通信负担。此外,随着用户对业务内容、体验等方面的需求不断提高,信息娱乐应用不再局限于语音、图像等传统模式,超高清视频 (4K/8K)^[4]、

沉浸式虚拟现实/增强现实 (virtual reality/augment reality, VR/AR)^[5]、视频分析、在线游戏等多样化的业务不断涌现^[6],也对网络的时延、带宽和计算能力等提出了更高的要求。

5G 时代的到来^[7]和车辆边缘计算 (vehicle edge computing, VEC) 的发展^[8]为上述需求带来了新的机遇。一方面,5G 新车用无线通信 (new radio vehicle-to-everything, NR-V2X) 协议使车联网的容量显著提升,传输时延降低,在一定程度上满足了业务对通信带宽和时延等方面的需求;并且 5G 网络切片技术的出现,可使不同类型的业务处于不同的虚拟网络中,有利于提供面向业务的定制化服务。另一方面,VEC 技术可有效缓解车辆和路侧智能设备的计算和存储压力以及业务端到端时延高的问题,减轻海量感知数据回传导致的网络负担,提升系统效率和实时决策性能。C-V2X 与 VEC 结合是车联网演进的主流方向,是实现车、路、云的协同感知、决策和控制的基础和关键,基于 C-V2X 和 VEC 的未来典型车联网场景如图 1 所示。

但是,C-V2X 与 VEC 提供的车联网平台无法满足全部业务需求。未来车联网只有以需求为导向将网络中的控制、计算与通信等要素进行协同

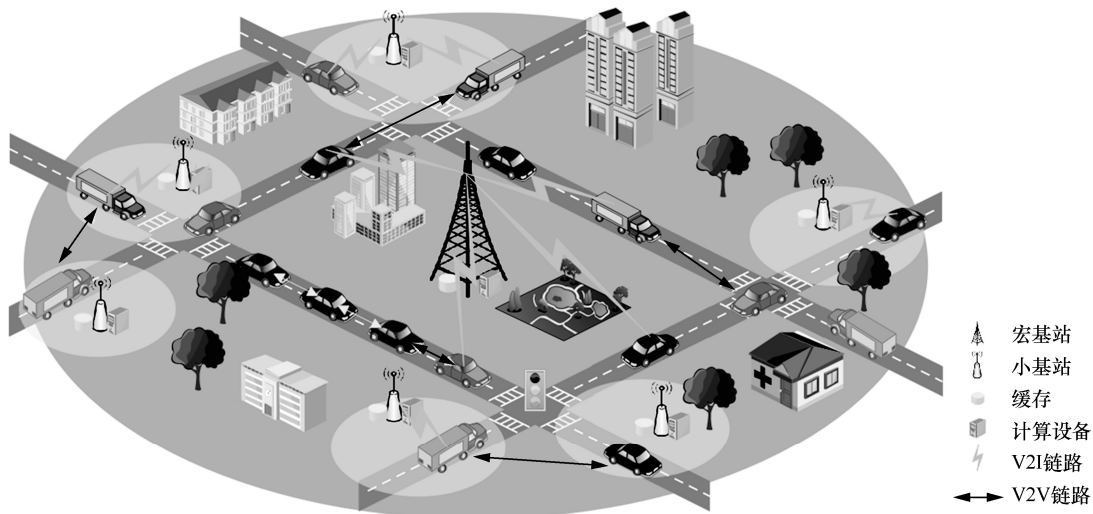


图1 基于 C-V2X 和 VEC 的未来典型车联网场景

融合和优化设计,科学管理有限的网络资源,才能最大限度地提升业务性能,实现低碳、高效的网络管控。首先,超低时延、海量传输和密集计算是未来自动驾驶和信息娱乐业务的共同特征。尤其对于控制类的安全驾驶业务,如果其低时延、高可靠性需求不能得到很好的满足,可能导致车辆行驶混乱,甚至造成生命和财产损失。由于很多业务的端到端传输及处理链条中包含控制、计算、通信等诸多环节,各环节相互影响,共同决定了业务性能,从单方面进行系统设计和优化无法达到最佳的效果。联合优化的思路逐渐受到关注,但现有研究大多针对具体的控制场景进行分析和设计,不利于揭示该场景下的一般性原理和规律。其次,车辆的高速移动导致车联网普遍工作在高动态的环境中,信道状态快速变化、网络拓扑频繁更新。由于路网结构约束,车辆行进状态基本可预测,甚至在自动驾驶场景中实现车辆行驶可控制,此时如何提升系统性能和用户体验是亟须解决的问题。尽管在多维资源协同管理等方面存在大量研究成果,但现有研究对移动性和多维资源联合优化方面的关注较少,并且尚未系统性区分可感知和可控制的移动性。最后,不同类型的车联网应用对通信、缓存和计算资源的需求具有较大的差异性,并且性能评价指标也有所不同。例如,行驶控制类业务追求的是控制系统的稳定性和安全性,而娱乐类业务注重用户的体验。除了传统移动网络面向个人的业务,车联网中还出现了大量机器间通信的需求,例如自动驾驶车辆通过车对车(vehicle-to-vehicle, V2V)通信链路传输车载雷达等传感器产生的数据,用于行驶控制类安全业务;车辆与路侧感知设备、C-V2X的路侧单元(road side unit, RSU)和车载单元(on board unit, OBU)等设备进行车路间信息共享和交互^[9]。在差异化业务并存且各资源域存在竞争关系时,如何提供丰富、精准以及个性化的支撑保障也是车联网面临的问题。

如何充分发挥 V2X 和 VEC 结合的优势,在高动态网络中应对超低时延、海量传输、密集计算等差异化需求的挑战,是当前学术界和工业界共同面对的重要课题。只有解决该课题的相关理论和科学问题,才能充分发挥车联网的技术优势,推动相关产业的进一步发展。

1 控制通信计算融合的资源优化技术

不同的车联网应用对控制、通信和计算的需求差异较大,并且多用户、多业务对网络中有限的计算、缓存、通信等多维资源形成竞争关系。多维资源协同管理是指在给定各网络节点的资源配置情况下,对多维资源进行跨域联合优化管理。在传统资源优化机制中,各资源域割立分治,资源分配效率较低,无法自适应匹配差异化性能需求。区别于各资源域独立优化,针对不同业务的需求进行资源协同优化,可以进一步提升业务性能和车联网服务保障能力。

各维度资源的属性不同,其对具体业务的影响既存在差异,又相互关联。其中,计算资源用于对输入数据进行处理从而得到输出数据,流入与流出计算单元的数据量往往不同。计算资源的容量通常用每秒执行指令数度量,与处理器性能相关。缓存资源用于将热点数据缓存在车联网边缘,以一定概率降低业务时延和网络负载。缓存命中时,流入缓存单元的数据量小于流出的数据量。缓存资源的容量通常用存储空间大小或可缓存的文件数表示,由缓存设备决定。缓存资源对业务和网络性能的影响是有记忆的,即过去缓存的内容可以影响现在和未来的决策。通信资源包括带宽、发射功率等,决定了数据在信道中的传输速率、传输时延和可靠性等指标。在多用户系统中,用户实际传输速率还与资源分配、用户接入等策略相关。多维资源之间的关联体现在各资源共同影响了业务和网络的性能,并且可以在一定程度上互换^[10],因此存在协同优化的可能性和必要性。



现有的许多研究和方案提出面向具体的业务需求或者网络特点,将控制、通信、计算等要素融合,协同优化多维资源的分配。下面分别从面向自动驾驶的控制与通信融合设计、面向信息娱乐业务的计算与通信融合设计、面向差异化业务的多维资源协同管理 3 个方面介绍相关技术。

1.1 面向自动驾驶的控制与通信融合设计

自动驾驶系统中,控制性能不仅取决于控制算法,还取决于无线网络的性能。无线信道的不理想因素导致的通信延迟、中断、丢包等会对整个系统的运行造成较大的影响,因此需要兼顾通信和控制两个方面来保障自动驾驶系统的稳定性。关于车联网承载自动驾驶业务的研究思路可以分为如下 3 个方面。

(1) 侧重于控制系统的设计,将无线通信系统理想化

自动驾驶车辆编队行驶的控制目标通常是保持车辆间的预定距离,同时保持相同速度和加速度,或者保证编队行驶的稳定性。由于控制系统的复杂性,早期研究注重控制系统设计及优化控制目标,简化了通信模型,假设控制系统能够实时获取车辆的运动信息,忽略了延迟、中断、丢包等通信问题。例如,文献[11-13]考虑车辆编队行驶场景,假设可实时获取车辆的运动学和动力学信息,基于控制论提出了一系列编队行驶控制协议或机制,保证车辆行驶的稳定性。但上述研究未考虑通信系统的不确定性,将通信网络的信息传输理想化。

(2) 侧重于通过无线通信系统设计来满足控制系统的需求

考虑通信不理想条件会影响控制系统稳定性,可以将控制的安全性需求作为前提条件,优化传输方案。例如, Yang 等^[14]将无线信道特征作为数据来训练人工神经网络,使车辆可以通过识别通信场景来选择适当的信道模型和传输模式。Keshavamurthy 等^[15]针对具有可靠性约束和半双

工限制的多播组 V2V 通信,提出了一种服务质量 (quality of service, QoS) 需求感知的直连链路资源分配优化方法,提高了通信系统的可靠性和时延性能。但上述研究侧重于考虑通信设计,并未考虑通信系统与车辆控制系统之间的联动。

(3) 联合通信与控制进行协同设计

考虑通信不理想因素对控制系统的影响,现有一些研究考虑联合通信与控制进行协同设计。在协同设计中,可以从控制系统的鲁棒性角度出发,让控制系统尽量适应通信的不理想因素。例如, Gonçalves 等^[16]提出根据无线通信丢包概率优化控制参数,在保障编队行驶稳定性的前提下使车辆尽可能集中分布,从而提高道路承载能力并降低燃油消耗。Li 等^[17]联合考虑通信和控制因素,设计车辆编队的行驶策略,根据通信信标的传输成功概率调整控制参数,在编队形成、车辆驶入和驶离等场景中分析和验证了策略的可行性。但是,上述方案只是让控制系统被动适应通信的不理想状态,并没有基于控制稳定性的需求优化通信系统。针对上述不足,应综合考虑和联合优化通信和控制系统。例如,文献[18-20]分别在网联车辆自主导航、编队行驶等场景中,通过 V2V 通信收集周围车辆信息用于控制系统的实时决策,考虑了车辆控制参数、通信时延需求、传输功率等因素,以控制系统的稳定性或可靠性为目标或约束条件,进行控制和通信的联合优化设计。Hong 等^[21]提出了一种基于自适应分布式模型预测控制的控制器,根据队列状态和动态信息调整控制参数,但其并未考虑跟随车辆之间信息传输方式的设计。

综上所述,在针对控制类自动驾驶业务的相关研究中,早期工作主要侧重于控制或者通信单方面的设计,近年来联合优化通信和控制系统的思路逐渐受到关注,但该领域还存在很多问题与挑战。现有文献大多针对具体的控制场景进行分析和设计,不利于揭示该场景下的一般性原理和规律。

1.2 面向信息娱乐业务的计算与通信融合设计

很多信息娱乐业务的性能由其经历的计算过程和通信过程共同决定（此处的计算泛指运算和缓存操作，分别对应下文中的计算资源和缓存资源）。为了在高动态车载环境中提升用户体验，应有效应对移动性挑战并提升系统资源的利用率，需要对计算、缓存和通信资源进行协同管理。

（1）通信与计算资源协同管理

将计算和通信资源联合分配可降低车联网的业务时延和能耗等关键指标，使资源利用率、用户体验、运营成本等方面得到优化。Yuan 等^[22]研究了云间协作和行驶路线的规划，在满足业务时延约束的前提下最小化系统成本，通过强化学习的方法进行建模和求解，提高了传输和计算资源利用率。Zhu 等^[23]提出了面向视频流媒体业务，考虑了用户移动性的影响，将车辆作为移动雾节点，动态分配车辆雾计算网络的计算和通信资源来优化服务质量和时延。Zhu 等^[24]提出了一种车联网中的任务迁移方法，采用帕累托包络选择算法确定策略，以解决数据密集型任务的计算资源和执行效率不足的问题。Liu 等^[25]提出了一种多无人机支持的移动车联网模型，其中无人机跟踪服务移动车辆并在飞行时间内向车辆发送下行信息，通过联合优化车辆通信调度、无人机功率分配和无人机轨迹来最大化系统吞吐量。上述研究分别从不同角度研究了计算和通信资源协同管理的问题，但没有联合考虑移动性的影响与车辆间协作，并且对移动性的分析大多聚焦在路线预测和规划上，没有充分利用自动驾驶车辆轨迹可按需调控的特征。

（2）通信与缓存资源协同管理

协同管理车联网的缓存与通信资源，当缓存命中时可降低时延和网络负载。在该方面的研究中，Luo 等^[26]考虑了文件和车辆的不同优先级，提出了一种智能文件分发机制，以效用最大化为目标对缓存与通信资源进行联合优化。在此研究

基础上，Zhang 等^[27]考虑了车辆可以为移动用户提供缓存服务的场景，对车辆和移动用户成功传输概率进行了推导，并以能耗最小化为目标对缓存和传输资源的分配进行了优化。Zhang 等^[28]综合考虑用户移动性和通信信道状态，设计了面向可伸缩视频的动态缓存方案，降低了文件下载时延。Li 等^[29]面向视频业务，综合考虑用户移动性和视频片段流行度，设计了基于用户移动性预测的主动缓存策略，提高了缓存命中率。

（3）通信、计算和缓存资源协同管理

车联网同时具备通信、缓存和计算资源，当承载对各类资源都有需求的业务时，合理分配多维资源是提升网络性能和业务体验的关键。文献[30-31]考虑了车载娱乐业务中计算、网络拥塞和内容下载等时延，提出卸载、缓存等策略，降低网络总时延。Luo 等^[32]引入了车辆间的协同，基于深度强化学习方法研究了车联网中通信、缓存和计算资源的联合调度问题。Qin 等^[33]进一步探讨了通信、计算卸载和内容缓存之间的深度协作，提出了一个层次化的端边缘框架。Zhao 等^[34]联合优化了服务缓存、请求调度和资源分配，在考虑成本效益的情况下最小化车联网随机服务请求的响应时延。Zhang 等^[35]面向无线视频直播业务，联合考虑用户分组、带宽资源分配以及视频码率选择，验证了跨域优化通信、计算和缓存资源的有效性。

（4）通信与计算资源协同的多播广播技术

多播广播是车联网的重要通信方式，在自动驾驶、交通效率、信息娱乐等业务中有广泛应用。如何在高动态的车联网场景中实现可靠和高效的数据多播广播是迫切需要解决的问题。在该领域，文献[36-37]提出两种基于车辆轨迹的多播方法，有效降低了信息传输成本。Sun 等^[38]提出了一种基于集群的协作多播方案，在有限的频谱资源下为用户提供高质量的数据传播，提高了频谱资源利用率以及传输成功率。Zhang 等^[39]采取合



作数据下载的方式,将位置相邻的用户组成一个簇,簇内成员采用直通链路共享各自下载的内容。但是该方案中簇成员仅能通过直通链路获取数据,没有同时利用蜂窝链路和直通链路来提高多播效率。

综上所述,上述文献在降低业务时延及提升业务体验和网络性能等方面有较多的研究成果,但大多针对具体业务或场景,尚未建立通用的业务模型,在通信、计算、缓存资源融合的车辆移动场景下进行有效的业务性能分析和优化设计。此外,缺少对自动驾驶车辆上的乘客请求信息娱乐业务的场景研究。可以考虑基于控制结果的车辆轨迹预测,在保证安全性的前提下,通过调整车辆的行进状态影响通信环境,以利于信息娱乐业务的数据传输。最后,虽然已有部分文献将直通链路和蜂窝链路结合来提高多播传输效率,但都没有考虑在多播通信中引入计算环节,通过中继车辆对多播数据流的实时处理来改变速率特征。

1.3 面向差异化业务的多维资源协同管理

在多业务并发的车联网场景下,为了给不同的业务提供差异化的支撑保障,通常需要综合考虑业务的需求特征、优先级、性能评价指标等方面,对网络的多维资源进行协同管理,使车辆在保障自身行车安全的前提下,尽可能提高交通通行效率和信息娱乐服务体验。

(1) 基于业务数据的重要性进行资源管理,优先保障高优先级业务的资源需求

为使用户得到更好的服务保障,袁子叶等^[40]提出了基于业务优先级的无线资源管理算法,在保障高资源利用率的情况下优先使安全业务接入网络,以降低其接入阻塞率。但其仅从安全和非安全两方面进行了业务优先级的划分,在差异化业务并存的场景下优先级划分粒度较粗。孙向月^[41]根据不同业务的时延和可靠性要求,研究了5G车联网场景下基于业务优先级的资源调度算法,但

其未能优先保证诸如行进控制类等关键业务的资源需求。上述研究均未考虑信道质量和业务优先级之间的关联,其本质上未将资源利用效率与业务数据的重要性结合。除了考虑更加全面的业务优先级划分,还应考虑资源利用率与数据重要性对各业务性能的影响。例如,可以预先对信息重要性进行度量,并基于数据重要性分配资源,对所传数据进行不均等保护^[42-43]。

(2) 通过约束条件与优化目标的差异化建模进行多样化的服务保障

在车联网不同类型的业务中,首先需要保障的是行车安全,在此基础上考虑提高其他类型业务的体验质量。因此,可以将安全类业务性能作为优化问题的约束条件,将非安全类业务性能作为优化目标,通过求解优化问题的方式得到差异化的资源分配结果。Yang等^[44]研究了V2V通信中的联合通信模式选择、资源块分配和功率控制策略,在保证V2V链路高可靠和低时延的通信需求基础上,最大限度地提高车辆和基础设施间(vehicle to infrastructure, V2I)链路的总容量。Zhao等^[45]针对5G通信网络中V2V通信方式的选择和功率适配,提出了一种基于慢衰落参数和统计信息的增强学习框架,以提高V2I链路的总容量,同时满足V2V链路的传输时延和可靠性约束。但上述研究仅对V2V和V2I的链路需求进行了约束和目标建模,没有考虑如何在差异化业务并存时提供更多极化的服务支撑保障。

(3) 使用网络切片技术为差异化业务提供定制化的支撑保障

为保证用户体验,以差异化的业务需求和评价指标为导向,可以考虑根据不同业务需求和评价指标进行切片划分,设计切片间和切片内的多维资源管理方法。张蕾等^[46]论述了5G网络切片在车联网中的应用,并分析了切片创建、资源调度以及安全保障等技术。文献[47-48]考虑高可靠低时延通信(ultra-reliable and low-latency communications,

URLLC)和增强型移动宽带(enhanced mobile broadband, eMBB)两类服务,对网络切片进行划分。其中,Šeremet等^[47]通过网络切片对车辆间的通信链路进行逻辑分离和单独管理,安全业务访问URLLC切片,而非安全业务使用eMBB切片,以此满足差异化的业务需求。Chen等^[48]提出了一种基于网络切片和空间重用的C-V2X框架,该框架同样支持URLLC和eMBB两类服务。然而,由于车联网业务的多样性,仅在安全和非安全两方面进行切片划分无法为业务提供更精准的支撑保障。

综上所述,针对车联网系统中差异化业务并发的相关研究还不够充分,该领域还面临一些新的问题和挑战。首先,未来车联网业务可能包含控制、通信与计算等诸多要素,各要素之间存在关联性,并且在多业务并存时各业务之间存在资源竞争关系,因此需要针对各类业务特征对多维资源进行联合管理。虽然有文献探讨了多要素融合设计的优势,但只考虑了单业务场景,并未考虑差异化业务并存时的资源竞争关系。此外,现有的研究对于面向切片的多维资源配置问题的探索还不够深入和系统,对多切片划分、切片优先级和切片间的资源竞争考虑不足。

2 车联网资源优化技术发展分析

基于前文分析,以业务需求为导向,以多维资源协同优化为手段,联合考虑控制、计算和通信等要素,提升车联网业务性能和服务保障能力是车联网技术的未来发展方向和研究趋势。下面分别从统一控制框架下的多维资源协同优化、高动态网络中的多维资源协同优化、面向差异化业务并存的多维资源协同优化3个方面展望车联网资源管理技术的发展。未来研究方向展望包括基础理论和关键技术两个层面,如图2所示,基础理论支撑关键技术并与关键技术一同应对问题挑战。

2.1 统一控制框架下的多维资源协同优化

在针对控制类业务的相关研究中,早期工作主要侧重于控制或者通信单方面的设计,将无线通信理想化,或者将控制模型简单化。近年来,联合优化通信和控制系统的研究增加,但现有研究大多考虑具体的控制场景,没有对多种控制类业务进行综合考虑、统一化建模和时延耦合关系分析。不仅如此,由于车辆传感器收集的信息不完全准确,自动驾驶车辆需要与路边单元、周边

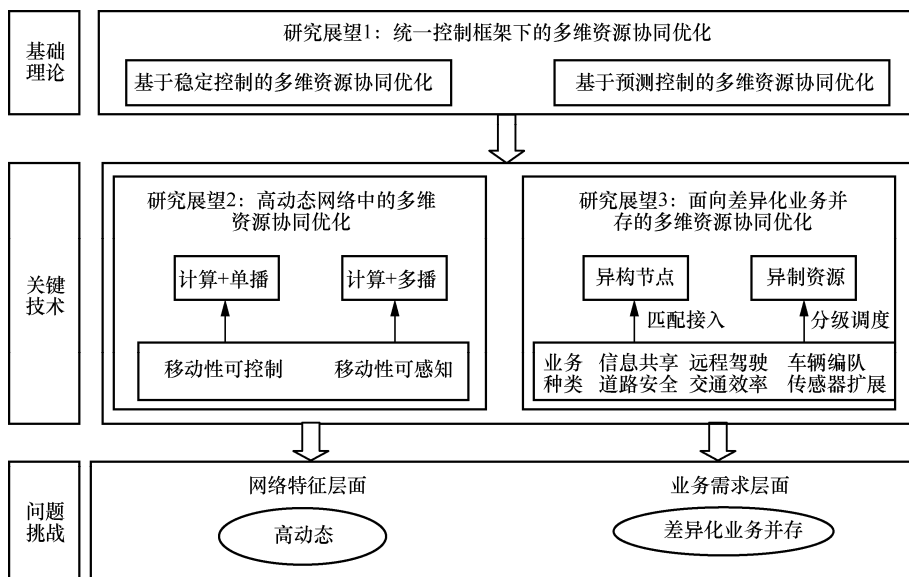


图2 未来研究方向展望



车辆交互信息辅助控制决策,因此,需要联合无线通信系统和边缘计算系统实现资源合理配置。可以考虑基于稳定控制的多维资源作用关系,从信息传输不可靠性及时延存在对控制系统稳定性的影响进行研究,寻求保证系统稳定性的时延阈值,进而以低时延和高可靠性为约束研究控制通信计算协同作用。

控制、通信与计算的模型是三者融合的基础。在控制模型中,一方面需要分析控制信息的构成以及控制稳定性的决定条件。控制信息中或包括车辆的状态指令,如车辆位置、速度等状态信息,或包括多元化业务数据,如语义、视频等处理数据。针对不同类别的控制信息,应表示出其系统的控制误差。另一方面,需要明确控制周期的时延组成部分。一个控制周期的总时延由可变时延与固定时延两部分构成,其中固定时延包括信息采集时延、信息执行时延以及信息处理时延,该时延主要由硬件配置和算法复杂度等方面决定。可变时延包括传感器与控制器之间的状态信息传输时延、控制器与执行器之间的指令信息传输时延组成,可以根据影响因素进行调整优化。因此,可变时延主要由通信模型表征,考虑其影响因素包括信道衰落、车辆位置、基站分布、传感器分布和执行器分布等,将传感器、控制器与执行器泛化为发端节点与收端节点,可以建模收发端节点之间的传输速率;固定时延主要由计算模型表征,其值与传感器、控制器和执行器的算力条件具有一定函数关系,可抽象出待计算数据的一般特征。以上述控制、通信和计算模型为基础,可以确定控制稳定性、通信时延与算力条件的关联关系,例如,无线通信系统的低时延传输受制于计算系统的低时延操作,同时又会影响到控制系统的安全性与稳定性。对于各环节的总时延,可以利用李雅普诺夫等方法分析信息传输的不可靠性对控制系统稳定性的影响,确定时延上界,并以此为阈值作为系统稳定性的时延约束。

此外,无线通信环境不理想或用户较密集会导致网络资源紧张,进而存在通信中断、堵塞、丢包问题等,若上述稳定性控制架构不能同时满足可靠性与时延条件,可以考虑在预测控制方面进行多维资源协同优化,降低通信不理想因素带来的影响。基于预测控制的多维资源融合框架如图3所示。该架构基于传感器、控制器以及执行器的实际物理连接情况进行针对性预测。需要传输的信息主要有两类:传感器-控制器之间的车辆状态信息和传感器-执行器之间的指令信息。控制器在每一时隙收集车辆状态信息,同时还会根据历史状态信息对最大预测时长范围内的车辆状态信息进行预测,并将输出的控制指令传输至执行器进行缓存。当传感器向控制器传输车辆状态信息的过程中发生链路中断时,控制器需要根据车辆历史状态信息对当前时隙的车辆状态进行预测。使用预测模型时,因为外部干扰和模型失配的影响,需要对预测输出和实际输出的偏差值进行滚动优化,即在时间序列中,每一采样时间均使用新得到的测量值作为初始条件,重新预测系统未来输出并求优化解。然后,对模型进行反馈校正,将预测输出和参考轨迹之间的误差作为目标函数来体现整个控制系统对参考轨迹的跟踪能力。最后,针对控制器与执行器信息传输中断情况,对于有限的通信、计算与缓存资源,结合实际场景设计多维资源协同优化机制。

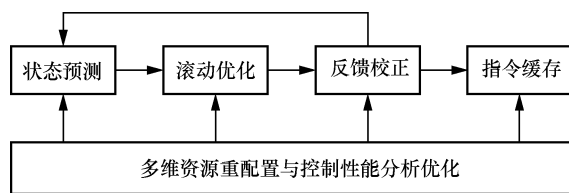


图3 基于预测控制的多维资源融合框架

2.2 高动态网络中的多维资源协同优化

在多维资源融合的异构车联网中,存在单播和多播等多种通信方式。相比于传统蜂窝网络,多播广播在车联网中发挥着更为重要的作用。根

据 NR-V2X 业务需求,多播广播不但是编队行驶、高级驾驶、传感器扩展等增强型业务的重要通信方式,同时也是提升信息共享效率以及车载娱乐业务体验的有效手段。此外,在高动态车载环境中,业务传输效果会受到车辆移动性影响,例如,计算密集型任务可能无法在单一边缘节点的通信范围内完成传输和实时处理,辅助节点预存的内容也可能在用户移动之后失效。但目前相关研究对普通车辆和自动驾驶车辆移动性差异分析不足,车辆的高速移动给资源管理带来不小挑战,高动态环境下的多维资源协同管理技术也需要针对性研究。

在移动性可感知方面,可以基于移动用户的历史位置、速度和行驶方向等信息预测行驶路线,设计通信计算资源协同管理方法,降低业务时延和能量消耗。在如图 4 所示的用户移动性感知的智能任务迁移场景下,基于对用户移动轨迹的预测,动态迁移任务。待计算的数据既可能源自网络,也可能由终端用户实时产生。当计算任务到达时,车辆可以选择在本地执行或者将计算任务卸载至基站或者迁移至合作车辆。如果部分网联车辆没有数据要处理或者其缓存队列时延容忍度高,它们便可以作为合作车辆来协助数据处理。计算任务的执行分为 3 种情况,任务在本地执行、任务卸载至基站执行(该情况分为任务卸载和任务执行两个阶段)、任务迁移至合作车辆(该阶段

计算任务先迁移至合作车辆随后再由合作车辆进行处理),得到不同情况下执行计算任务产生的功耗、能耗及单位时间可处理数据量。由于车辆高速移动,存在任务还未完成上传但车辆已经离开所连基站或合作车辆通信范围的情况。此时,需要将任务迁移至执行计算任务的节点。在任务迁移的过程中,对车辆移动性进行预测,估计车辆与基站或合作车辆的通信时间,决定车辆与基站或合作车辆的传输策略,这样可以更好地利用有限的通信资源,减少传输失败带来的资源浪费。可采用深度强化学习等方法优化通信和计算资源的分配策略,以最小化系统代价为目标,将代价函数的负值作为强化学习的激励函数代入,多次迭代学习使激励函数收敛至最优,从而得到通信与计算资源分配结果。

在移动性可控制方面,可将自动驾驶车辆的行驶位置相关变量作为可调变量,进一步完成任务迁移和移动性管理的联合优化。优化过程可分为长期和短期优化。长期考虑车辆路径规划,通过调整车辆行驶路线,优化车辆分布并降低迁移成本;短期考虑车辆间距优化,通过调整车辆间距,从而影响传输距离和通信环境。例如,可综合考虑车辆起始点和目的点、业务时延、车辆行驶时长及基站覆盖、车辆数目等因素,联合优化任务迁移和车辆移动性。以有限的通信资源、计算能力和道路通行能力为约束条件,使系统代价

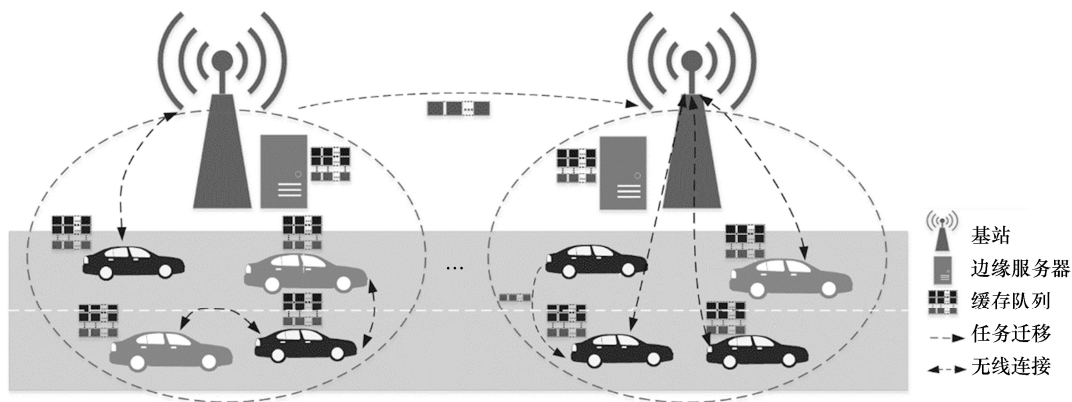


图 4 用户移动性感知的智能任务迁移场景



最小。在不影响驾驶安全性的前提下,通过微调车辆的行进参数影响通信距离和通信环境,以利于实时数据传输。

在通信与计算协同的车联网多播广播方面,边缘计算与直通链路辅助的多播传输是值得关注的的发展方向。分组与簇头选择示意图如图5所示,假设每辆车在多播分组过程中既可以作为簇头,也可以是簇成员。可将该场景的节点和通信连接抽象为全连通图。假设网络可相对准确地检测到车辆位置的变化并对部分车辆的移动性进行一定范围内的控制。此时,可以基于车辆移动性定义链路质量评价指标,考虑因素包括链路寿命、信道容量、车辆的计算能力等。为达到最佳的多播效果,簇头应选择最大化网络中的最差链路,即在图中找到一个顶点,使其他顶点与该顶点之间的最小特征距离最大化。在多播分组确定的情况下,根据业务需求特征,自适应选择簇头和直通链路的传输资源分配方式以优化用户效用。其资

源管理的理论本质为在带宽和簇头计算能力的约束下,最大化用户和效用。通过优化问题求解的方式同时确定直通链路通信资源分配方式以及簇头和簇成员的业务速率。

2.3 面向差异化业务并存的多维资源协同优化

车联网业务类型较多,不同类型的业务对网络资源需求差异较大,且业务间存在资源竞争关系,决策结果会相互影响。此外,承载车联网差异化业务的不同类型的接入节点所能提供的网络资源和服务能力有较大区别。因此,在高动态的复杂异构网络场景中,以差异化的业务需求和评价指标为导向,匹配服务节点和终端用户、科学配置网络中的各类资源将是提升网络性能和用户体验的关键,也是需要研究的方向。

根据业务特征,其优先级可分为多个基础级别。

基础优先级 I: 远程驾驶、高级驾驶、车辆编队等行进控制类业务。该类业务对时延和带宽有着更加严格的要求,需优先保证该类业务在不

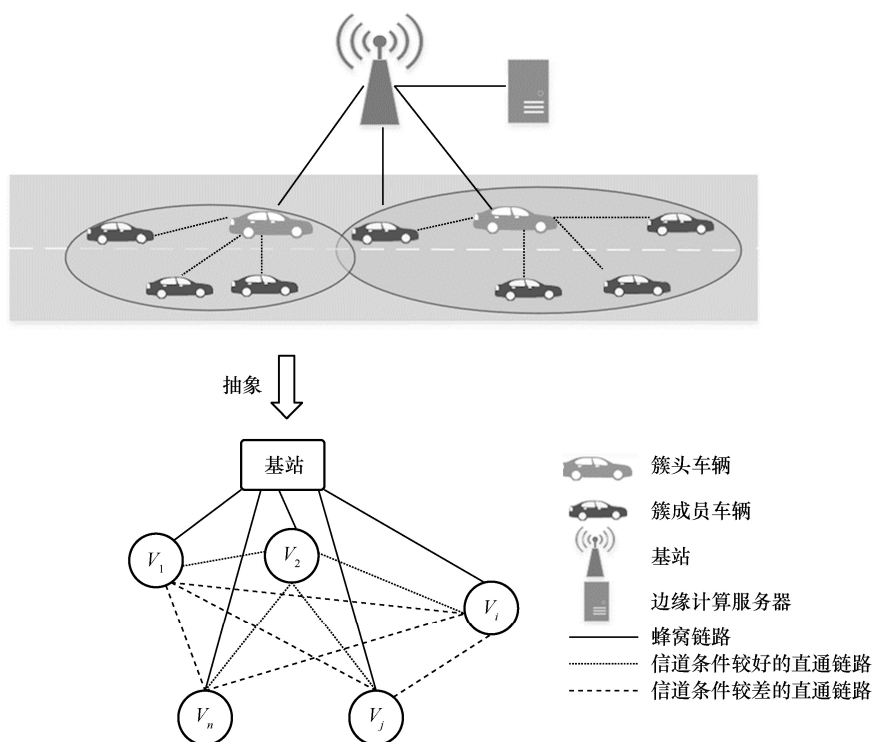


图5 分组与簇头选择示意图

同业务的资源竞争中的最高资源需求。

基础优先级Ⅱ：安全信息共享类业务，该类业务要求对上百个传感器产生的数据进行计算处理，需要消耗大量的通信和缓存资源，但时延要求较行进控制类业务略低。

基础优先级Ⅲ：交通效率类业务，业务类型主要有实况直播、运行监控、车位共享等。通常发生在交通密集的区域，网络需要具备极强的广播能力才能支撑服务。

将不同业务的基础优先级和动态资源利用效率结合，定义业务综合优先级，每类业务对资源需求的侧重点各有不同，对于需求相同的用户，则按照其业务优先级进行有序接入。然后，在高动态车辆移动异构场景下，根据差异化的业务需求和资源配置，确立多辆车和多个网络服务节点

间的接入关系。

此外，也可以考虑面向差异化需求并存的多维资源分级调度机制，根据不同业务需求和评价指标进行切片划分，为每个业务类别建立对应的专属切片。在网络中请求对应业务的车辆需要关联到相应切片中，如果同一车辆请求多类业务，则被关联到多个切片中。不同业务对多维资源存在相互竞争的关系，根据业务的需求差异性，将多维资源分配给多个切片。然后，综合考虑每个切片的性能指标需求，建模多目标函数优化问题，将必须满足的业务指标作为约束条件，将尽力而为的指标作为优化目标。由于不同切片存在对资源利用的冲突，通常不存在使多个指标同时达到最优的解，即在一方得到优化时，另一方可能会有性能损失。

研究方法对比分析见表 1。

表 1 研究方法对比分析

研究方向	现有方案不足	所提方案和思路
行驶控制与无线资源协同优化	针对具体控制场景，未考虑多种控制类业务统一化建模及通信控制耦合关系分析	基于控制类业务通用模型，分析通信不理想因素对控制性能的影响，并结合稳定控制和预测控制模型优化多维资源分配
高动态场景下的跨域资源协同优化	未区分与联合考虑移动性可控制和移动性可感知的多维资源协同优化	聚焦高动态的网络特征，感知普通车辆的移动性，调控自动驾驶车辆轨迹和间距，并展望了高动态环境下的多播分组和资源优化技术
面向差异化业务需求的资源协同优化	较少考虑差异化业务并存时的资源竞争关系及网络切片中的多维资源配置问题	聚焦差异化业务并存的需求特征，基于资源切片、差异化接入、动态优先级划分等技术，展望了资源和需求动态匹配的用户接入以及切片间/切片内的分级调度技术

综上，在车联网中进行多维资源融合的思路已得到业内关注。在此基础上，以业务为导向，引入控制元素，寻求提升自动驾驶的安全性、信息娱乐业务的用户体验、多播传输效率以及网络对差异化业务的保障能力，是车联网资源管理技术未来的重要发展方向。

3 结束语

本文从面向自动驾驶的控制与通信融合设计、面向信息娱乐业务的计算与通信融合设计以及面向差异化业务的多维资源协同管理 3 个方面出发，分析了车联网资源优化的关键技术及其研

究现状，并展望了未来该领域的技术发展，为应对车联网的拓扑高动态、差异化业务需求并存等挑战提供了参考方案和思路。未来可以重点考虑的研究方向如下。

(1) 根据控制通信计算的相互作用关系，优化车辆行驶控制参数、无线资源优化和节点算力分配，提升弱网环境中的自动驾驶安全性。

(2) 针对传统车辆和自动驾驶车辆的移动性特征，通过多维资源协同优化的方式来最小化业务端到端交付时延，并以多速率多播方式改善信息共享效率，提升高动态网络环境下的网络性能和业务体验。



(3) 通过资源切片、差异化接入、动态优先级划分、分级调度等机制提供针对业务的定制化服务, 增强车联网的差异化服务支撑能力, 满足多业务并存的典型需求。

参考文献:

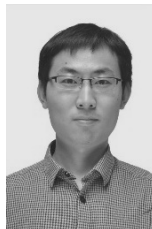
- [1] 陈山枝, 葛雨明, 时岩. 蜂窝车联网 (C-V2X) 技术发展、应用及展望[J]. 电信科学, 2022, 38(1): 1-12.
CHEN S Z, GE Y M, SHI Y. Technology development, application and prospect of cellular vehicle-to-everything (C-V2X)[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 1-12.
- [2] 国家发展和改革委员会, 中共中央网络安全和信息化委员会办公室, 科学技术部, 等. 智能汽车创新发展战略[R]. 2020. National Development and Reform Commission, Office of the Central Cyberspace Affairs Commission, Ministry of Science and Technology, et al. Intelligent vehicle innovation and development strategy[R]. 2020.
- [3] 3GPP. Service requirements for enhanced V2X scenarios (v16.0.0): 3GPP TS.22.186[S]. 2018.
- [4] 工业和信息化部, 国家广播电视总局, 中央广播电视总台. 超高清视频产业发展行动计划 (2019-2022 年) [R]. 2019. Ministry of Industry and Information Technology, National Radio and Television Administration, China Media Group. Action plan for the development of ultra HD video industry (2019-2022)[R]. 2019.
- [5] SUKHMANI S, SADEGHI M, EROL-KANTARCI M, et al. Edge caching and computing in 5G for mobile AR/VR and tactile Internet[J]. IEEE Multi Media, 2019, 26(1): 21-30.
- [6] FU F, KANG Y P, ZHANG Z C, et al. Soft actor-critic DRL for live trans coding and streaming in vehicular fog-computing-enabled IoV[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(3): 1308-1321.
- [7] 北京市经济和信息化局办公室. 北京 5G 产业发展白皮书 (2019) [R]. 2019. Beijing Municipal Bureau of Economy and Information Technology. White paper on Beijing 5G industry development (2019) [R]. 2019.
- [8] 宋贤鑫, 张一帆, 秦晓琦, 等. 车联网中基于边缘计算的感知决策技术[C]//第十四届中国智能交通年会论文集. 北京: 电子工业出版社, 2019: 81-87.
SONG X X, ZHANG Y F, QIN X Q, et al. Perceptual decision-making technology based on edge computing in the Internet of vehicles[C]//Proceedings of the 14th China Intelligent Transport Annual Conference. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019: 81-87.
- [9] 陈山枝. 蜂窝车联网(C-V2X)及其赋能智能网联汽车发展的辨思与建议[J]. 电信科学, 2022, 38(7): 1-17.
CHEN S Z. Critical thinking and suggestions on C-V2X with the developments of intelligent connected vehicles[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(7): 1-17.
- [10] 张志龙. 无线视频传输优化技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2020.
ZHANG Z L. Wireless video transmission optimization technology[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2020.
- [11] LI Y F, HE C P. Connected autonomous vehicle platoon control considering vehicle dynamic information[C]//Proceedings of 2018 37th Chinese Control Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 7834-7839.
- [12] PENG B, YU D X, ZHOU H X, et al. A platoon control strategy for autonomous vehicles based on sliding-mode control theory[J]. IEEE Access, 2020(8): 81776-81788.
- [13] PRAYITNO A, NILKHAMHANG I. V2V network topologies for vehicle platoons with cooperative state variable feedback control[C]//Proceedings of 2021 Second International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA-SYMP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-4.
- [14] YANG M, AI B, HE R S, et al. Machine-learning-based scenario identification using channel characteristics in intelligent vehicular communications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(7): 3961-3974.
- [15] KESHAVAMURTHY P, PATEROMICHELAKIS E, DAHLHAUS D, et al. Resource scheduling for V2V communications in co-operative automated driving[C]//Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [16] GONÇALVES T R, VARMA V S, ELAYOUBI S E. Vehicle platooning schemes considering V2V communications: a joint communication/control approach[C]//Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [17] LI Y F, CHEN W B, PEETA S, et al. Platoon control of connected multi-vehicle systems under V2X communications: design and experiments[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(5): 1891-1902.
- [18] ZENG T C, SEMIARI O, SAAD W, et al. Joint communication and control system design for connected and autonomous vehicle navigation[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2019.
- [19] ZENG T C, SEMIARI O, SAAD W, et al. Integrated communications and control Co-design for wireless vehicular platoon

- systems[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [20] ZENG T C, SEMIARI O, SAAD W, et al. Joint communication and control for wireless autonomous vehicular platoon systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(11): 7907-7922.
- [21] HONG C H, SHAN H G, SONG M Y, et al. A joint design of platoon communication and control based on LTE-V2V[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 15893-15907.
- [22] YUAN Q, LI J L, ZHOU H B, et al. A joint service migration and mobility optimization approach for vehicular edge computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(8): 9041-9052.
- [23] ZHU C, TAO J, PASTOR G, et al. Folo: latency and quality optimized task allocation in vehicular fog computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4150-4161.
- [24] ZHU D W, BILAL M, XU X L. Edge task migration with 6G-enabled network in box for cybertwin-based Internet of vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(7): 4893-4901.
- [25] LIU X, LAI B J, LIN B, et al. Joint communication and trajectory optimization for multi-UAV enabled mobile Internet of vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(9): 15354-15366.
- [26] LUO Q Y, LI C L, LUAN T H, et al. EdgeVCD: intelligent algorithm-inspired content distribution in vehicular edge computing network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(6): 5562-5579.
- [27] ZHANG Y, LI C L, LUAN T H, et al. A mobility-aware vehicular caching scheme in content centric networks: model and optimization[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3100-3112.
- [28] ZHANG Z L, DAI J M, ZENG M Y, et al. Scalable video caching for information centric wireless networks[J]. IEEE Access, 2020(8): 77272-77284.
- [29] LI X F, WANG J W, ZHANG Z L, et al. Mobility-aware proactive video segment caching based on deep reinforcement learning[C]//Proceedings of 2021 7th IEEE International Conference on Network Intelligence and Digital Content (IC-NIDC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 230-234.
- [30] NDIKUMANA A, TRAN N H, KIM D H, et al. Deep learning based caching for self-driving cars in multi-access edge computing[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(5): 2862-2877.
- [31] NING Z L, ZHANG K Y, WANG X J, et al. Intelligent edge computing in Internet of vehicles: a joint computation offloading and caching solution[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(4): 2212-2225.
- [32] LUO Q Y, LI C L, LUAN T H, et al. Collaborative data scheduling for vehicular edge computing via deep reinforcement learning[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(10): 9637-9650.
- [33] QIN Z X, LENG S P, ZHOU J H, et al. Collaborative edge computing and caching in vehicular networks[C]//Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). New York: ACM Press, 2020: 1-6.
- [34] ZHAO J H, SUN X K, LI Q P, et al. Edge caching and computation management for real-time Internet of vehicles: an online and distributed approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(4): 2183-2197.
- [35] ZHANG Z L, ZENG M Y, CHEN M Z, et al. Joint user grouping, version selection, and bandwidth allocation for live video multicasting[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(1): 350-365.
- [36] LIU G, WANG Z Q, HU J W, et al. Cooperative NOMA broadcasting/multicasting for low-latency and high-reliability 5G cellular V2X communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5): 7828-7838.
- [37] WANG W J, LUO T, KANG H X. A local information sensing-based broadcast scheme for disseminating emergency safety messages in IoV[J]. Mobile Information Systems, 2019(2): 1-11.
- [38] SUN J N, DONG P, DU X J, et al. Cluster-based cooperative multicast for multimedia data dissemination in vehicular networks[C]//Proceedings of 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [39] ZHANG Y L, XU Y H, WU Q H, et al. Context awareness group buying in D2D networks: a coalition formation game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 12259-12272.
- [40] 袁子叶, 葛万成. 车联网异构网络资源管理优化研究[J]. 信息通信, 2019, 32(5): 93-95.
- YUAN Z Y, GE W C. Research on resource management optimization of heterogeneous network in vehicle networking[J]. Information & Communications, 2019, 32(5): 93-95.
- [41] 孙向月. 5G 车联网场景下基于业务优先级的资源调度算法的研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
- SUN X Y. Research on resource scheduling algorithm based on service priority in 5G vehicle networking scenarios[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2019.



- [42] 张志龙, 刘丹谱, 尹长川, 等. 一种基于比特重要性的功率分配方法及装置: ZL201410710167.7[P]. 2017.
ZHANG Z L, LIU D P, YIN C C, et al. A power allocation method and device based on bit importance: ZL201410710167.7[P]. 2017.
- [43] ZHANG Z L, LIU D P, WANG X. Joint carrier matching and power allocation for wireless video with general distortion measure[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2018, 17(3): 577-589.
- [44] YANG H L, XIE X Z, KADOCH M. Intelligent resource management based on reinforcement learning for ultra-reliable and low-latency IoV communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4157-4169.
- [45] ZHAO D, QIN H, SONG B, et al. A reinforcement learning method for joint mode selection and power adaptation in the V2V communication network in 5G[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2020, 6(2): 452-463.
- [46] 张蕾, 朱雪田, 李金艳. 5G 网络切片在车路协同系统中的应用研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(1): 12-16.
ZHANG L, ZHU X T, LI J Y. Research on the application of 5G network slice in intelligent vehicle infrastructure cooperative systems[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(1): 12-16.
- [47] ŠEREMET I, ČAUŠEVIĆ S. Benefits of using 5G network slicing to implement vehicle-to-everything (V2X) technology[C]//Proceedings of 2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [48] CHEN Q M, JIANG H, YU G D. Service oriented resource management in spatial reuse-based C-V2X networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(1): 91-94.

[作者简介]



张志龙 (1985-), 男, 博士, 北京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信、网络多媒体与人工智能。



张天琦 (1999-), 女, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为无线通信、车联网通信控制融合。



李雪菲 (1995-), 女, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为无线网络资源管理与优化、车联网通感融合、强化学习、图神经网络。



刘丹谱 (1972-), 女, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为 6G 移动通信、空天地一体化网络与资源管理。