



专题：智能边缘计算

未来车辆雾计算网络

惠宁^{1,2,3}, 伍杰^{1,2,3}, 周一青^{1,2,3}, 刘玲^{1,2,3}, 潘振岗⁴

- (1. 中国科学院计算技术研究所, 北京 100190;
2. 移动计算与新型终端北京市重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 北京紫光展锐通信技术有限公司, 北京 100190)

摘要: 面向安全、可靠的车辆行驶需求, 车联网对信息传输和处理的实时性要求高、对数据存储和使用的安全性要求高、对网络架构的灵活性和包容性要求高。未来车辆雾计算网络基于雾计算部署于网络边缘的特点, 可降低数据的传输和处理时延; 基于雾计算黑盒操作的特点, 有利于保障数据安全; 基于雾计算分布式架构, 可实现异构车辆节点的互联互通与资源共享。对未来车辆雾计算网络进行了综述, 介绍了车辆雾计算的架构、挑战与关键技术, 着重分析移动状态下的通信与计算资源的共享与任务协同处理、车辆雾计算的安全性以及车辆雾计算设施的异构性。最后提出了车辆雾计算网络三级管控架构, 推动车联网向网联协同决策与控制发展。

关键词: 车联网; 雾计算; 智能化; 移动性; 安全性; 异构性

中图分类号: TN911

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020175

Future vehicular fog computing networks

HUI Ning^{1,2,3}, WU Jie^{1,2,3}, ZHOU Yiqing^{1,2,3}, LIU Ling^{1,2,3}, PAN Zhengang⁴

1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. Beijing Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Beijing 100190, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Beijing UNISOC Technologies Co., Ltd., Beijing 100190, China

Abstract: Facing the requirements of secure and reliable vehicle driving, internet of vehicles requires high real-time information transmission and processing, high data storage and security using capacity, and high flexibility and inclusiveness of network architecture. The future vehicular fog computing network can reduce the data transmission and processing delay based on the characteristics of fog computing deployed at the edge of the network, can ensure data security based on the characteristics of fog computing black box operation, and can make heterogeneous facilities connect with other devices and make sure resource sharing between vehicle nodes based on the fog computing distributed architecture. The future vehicular fog computing networks were reviewed, the architecture, challenges, and key technologies of vehicle fog computing were introduced, the communication and computing resource sharing and task collaboration in the mobile state, vehicle fog computing security, and vehicle fog computing heterogeneity of facilities were focused on. Finally, a three-level management and control architecture for vehicular fog computing networks were proposed to promote the development of internet of vehicles to on-networking collaborative decision-making and control.

Key words: internet of vehicles, fog computing, intelligent, mobility, security, heterogeneity

专题组稿人: 赵军辉, 窦笠, 周一青

收稿日期: 2020-04-20; 修回日期: 2020-05-27

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目 (No.61901452); 中国科学院计算技术研究所创新项目 (No.20196110)

Foundation Items: The National Natural Science Youth Fund (No.61901452), The Innovative Project of ICT ICAS (No.2096110)

1 引言

移动通信和互联网技术的高速发展^[1-5], 推动了物联网时代的到来, 使“万物互联”成了一种可能^[6]。作为一种典型的物联网, 车联网是以车内网、车际网和车载移动互联网为基础, 按照约定的通信协议和数据交互标准, 在车-X(X 指车、路、行人及互联网等)之间, 进行无线通信和信息交换的大系统网络^[6]。在车辆网联化程度方面, 按照网联通信内容的不同, 可以将其划分为网联辅助信息交互、网联协同感知、网联协同决策与控制 3 个阶段, 目前车联网处于网联辅助信息交互阶段^[6], 即车辆之间可以通过联网进行信息交换。

随着车联网技术的不断发展, 全球车联网产业进入快速发展阶段, 智能化、信息化成为车联网发展的关键。目前, 中国、俄罗斯、美国等国家和地区 70%以上新组装车辆已配备网络接口, 2018 年全球联网车数量约为 9 000 万辆, 预计到 2025 年将突破 10 亿辆^[6]。智能化、信息化的车辆将产生大量的数据, 以 Google 无人驾驶汽车为例, 每辆无人驾驶汽车每秒产生约 1 GB 的数据^[7]。为了确保车辆的安全可靠行驶, 必须基于这些海量数据实时产生避障、变道等决策。但车载处理器的密集计算能力有限, 在车辆本地处理海量数据将带来不可忽略的处理时延。另一方面, 将海量数据传输至云服务器进行处理, 虽然可以借助强大的云计算能力降低处理时延, 但传输过程会带来 100 ms 以上的时延, 造成整体时延的大幅度提升, 难以满足车联网中大量任务(如危险预警、故障判断等)对实时性的要求。因此保障车联网中信息传输和数据处理的实时性, 是车联网安全有效工作的重要前提。为了降低车联网中数据传输时延, 必须在网络边缘对数据进行处理, 其中一种可行的方法是雾计算, 通过缩短数据传输距离, 降低传输时延; 同时, 为了降低车联网中数

据的处理时延, 也可以利用雾计算, 通过网络边缘多个雾节点的协作, 帮助计算能力不足的单一车辆节点进行数据处理, 降低单一节点的高处理时延。

雾计算是指将网络的计算能力部署在网络边缘, 是一个从云端到物端的多层次计算架构, 具有分发计算、通信、存储、控制、联网等多种功能^[8]。利用网络边缘雾节点的计算能力对入网终端产生的数据进行处理、存储、应用, 能大幅降低任务传输、处理的时延。雾计算为车联网的智能化和信息化提供了一种新的途径, 可将每一个车辆(包括静止车辆和运行的车辆)均视作独立雾节点, 与手机终端、基站、计算机、服务器等其他雾节点一同组成车辆雾计算网络, 从而在网络内对用户请求的任务进行就近、分布式处理, 有效降低任务的传输和处理时延^[9-10]。

除了实时性, 车联网对用户数据的安全性有着极高的要求。目前广泛应用的云计算是将所有数据上传云服务器, 数据统一在云服务器中处理结束后将结果返回用户端。用户使用的云服务器为公有云, 云管理员可以获取所有用户数据, 因此, 在这种云服务器统一集中管理资源的架构下, 数据安全面临极大挑战。对比云计算, 雾计算的雾节点属于本地边缘节点, 车辆雾计算对数据进行计算、资源共享时, 与网络的其他部分是隔离的, 即一种黑盒处理机制, 数据只在黑盒节点处理而对外界不可见, 因此用户和其他节点对于信息的处理不可知, 并且一项任务可能由多个节点进行处理后, 发回用户节点汇总, 安全性高^[11]。

未来车联网也对网络架构的灵活性和包容性提出了很高的要求。随着车联网技术的发展, 产生了丰富多样的车辆服务业务, 从 GPS(global positioning system, 全球定位系统)导航到自动驾驶, 从单一的辅助驾驶系统到多样的车载娱乐系统。车辆正逐渐转变为未来人机物三元互联的核心。诸多应用请求使得车辆需要集成更多的设备



来满足不断增长的需求^[12]。目前,各厂商纷纷推出自己的车载系统,同时满足汽车的驾驶属性和娱乐属性。但不同厂商之间采用了不同设备和方案。这些异构设备采用不同的硬件设施、软件平台以及通信协议,具备不同的计算能力、数据格式、操控指令以及通信能力等,互不兼容,为车辆的互联互通、车载资源的共享带来了挑战^[13-15]。基于雾计算的分布式架构,利用中间件、智能感知接入等关键技术,有望实现异构车辆设备的协作与资源共享。

综上所述,为了实现安全、可靠的车辆行驶,车联网对信息传输和处理的实时性要求高、对数据存储和使用的安全性要求高、对网络架构的灵活性和包容性要求高。未来车联网必须融合雾计算,基于雾计算部署于网络边缘的特点,实现数据就近传输和处理,降低数据的传输和处理时延;基于雾计算黑盒操作的特点,结合多节点分布式处理,保障数据安全;基于雾计算分布式架构,融合中间件和智能感知接入等技术,实现异构车辆节点的互联互通与资源共享。

2 车辆雾计算的系统架构

车辆雾计算网络与传统雾计算网络的不同之处在于,车辆将作为主要的雾节点,因此移动性是车辆雾计算的主要特征。车辆雾计算的系统架构如图1所示,可分为云服务层和雾节点层^[16-17]。云服务层负责处理计算复杂、非时延敏感型任务。雾节点层主要包括边缘MEC(mobile edge computing,移动边缘计算)服务器、车、路边传感器、用户终端节点(如手机、平板电脑)等众多计算能力不同的边缘节点,雾节点之间可以互相感知、互联互通,资源共享。当有车辆、用户产生任务时,将向周围雾节点请求服务,通过任务卸载,利用周围雾节点的空闲资源协同处理,高效完成任务。因为任务直接在网络的边缘和请求服务的节点附近被处理,不需要将任务传回远端云服务

器,可大幅降低传输时延,有利于完成时延敏感型任务。

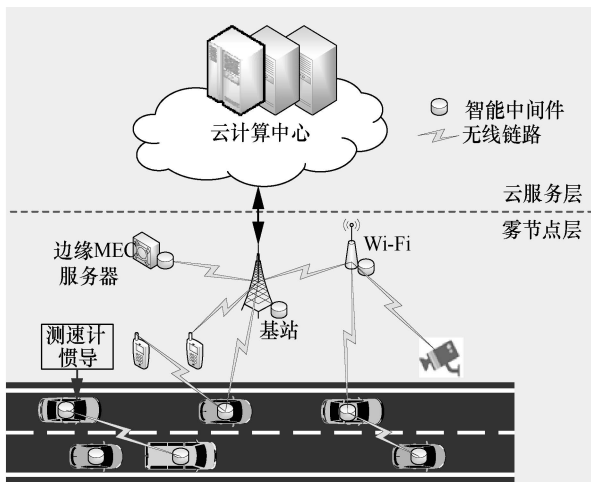


图1 车辆雾计算系统架构

3 车辆雾计算的挑战与关键技术

雾计算能够加速车联网智能化、信息化的进程,推动车联网从网联辅助信息交互阶段向网联协同感知、网联协同决策与控制阶段发展,但是雾计算应用于车联网仍存在众多技术挑战。本章从移动状态下的通信与计算资源的共享与任务协同处理、车辆雾计算的安全性、车辆雾计算设施的异构性3个方面阐述目前车辆雾计算网络存在的挑战与关键技术。

3.1 移动状态下通信与计算资源的共享与任务协同处理

面向未来车辆雾计算网络中的密集计算任务,单一节点资源有限、计算能力受限,无法满足其需求,必须通过车辆雾节点间共享通信与计算资源、协同处理任务,才可能完成密集计算,提高用户体验。这个方向上目前已经展开了广泛的研究^[18-21],但大部分研究将车辆视作静止雾节点,以简化问题^[22]。但是车辆之间存在相对移动性是车联网的一个重要特征,车辆雾计算的研究必须考虑其移动性^[23-25]。这种移动性会导致节点间的通信状态不稳定,为节点间的资源共享与任

务协同处理带来挑战。因此,如何在移动状态下实现高效的资源共享与任务协同处理是亟待解决的问题。移动状态下通信与计算资源共享与任务协同处理包含 3 个挑战:第一是车辆移动情况下的通信网络组网,第二是移动状态下的计算任务卸载,第三是移动节点服务迁移。

3.1.1 车辆移动情况下的通信网络组网

在静止条件下,用户所处的环境较为稳定,通过有线或无线通信建立的信道质量较好,有利于资源的共享与任务的协同处理。但车辆雾计算中,所有车辆节点均处于无线网络环境中,且大量节点存在高速相对运动,导致时变的负载分布与不稳定的通信连接,为数据交换与任务协同处理带来挑战。因此,在车辆移动的环境下,需要利用车辆雾计算的两层结构,结合区域内的无线通信网络智能自组网^[16-17, 26-27],将不断移动的车辆作为通信节点接入网络,以相互动态协作实现网络负载平衡,通过车辆间组网形成分散的网络结构,在每个自组网络内管理实时数据,有效地负载网络流量(拉平负载),减轻网络负担,为移动状态下车辆间的资源共享与任务协同处理构建基础网络架构。

参考文献[16]提出利用车辆作为通信和计算的基础设施构建 VFC (vehicular fog computing, 车辆雾计算) 网络,通过整合各种移动和停放车辆的丰富资源,对 VFC 网络的数据预处理、通信、计算能力进行分析,揭示车辆的通信能力、连通性和移动性之间的关系,为车辆雾计算网络内节点间的资源分配、任务的协同处理提供理论指导。对于移动车辆而言,参考文献[16]通过分析车辆移动速度等移动性指标与通信能力和连通性之间的关系,得到幂律关系,即当速度大于阈值 A (分析可得: $A=72$ km/h) 时,可成功连接的车辆越少,通信能力越差;当速度小于阈值 A 时,移动性对网络连通性和通信容量没有明显影响。由于在城市行驶过程中,多数车辆速度均小于阈值,因此

参考文献[16]认为在将移动车辆接入 VFC 进行信息传输时,可以充分利用车辆的多跳特性和移动特征,将信息从一个地方带到另一个地方,即将移动的车辆作为信息传输的载体,通过不断与 VFC 网络内的其他车辆建立连接持续传输信息,实现地理位置接近的车辆间相互协作、相互连接,形成边缘通信网络,完成信息交互,避免移动车辆接入点与目标之间通过远程服务器进行大量信息传输,降低传输负载与基础设施无线节点的能耗,提升通信系统的效率、平衡网内实时负载、降低信息传输成本。

参考文献[17]拟利用雾计算解决网络时延和带宽的限制,提出在互相连接的移动车辆上部署雾节点(如自动驾驶公共汽车和出租车),并将车辆配置成无线接入点,避免多跳通信引起的时延,同时允许每个车辆雾节点充当本地云服务器,为连接范围内的车辆和移动设备提供服务,为移动的车辆之间任务的协同处理与资源分配提供了车辆雾计算的解决方案。主要思路是,对于移动的车辆节点,可以根据车辆行驶的路线不同、移动计算任务的优先级不同,对移动的车辆雾节点进行按需配置,即可以在行驶路线相同的车辆之间形成按需自组织雾计算网络,在网络中共享通信与计算资源,对移动中产生的高计算量、高负载、低时延要求任务(如增强现实/虚拟现实)进行处理。由于车辆行驶路线相同、速度差较小,因此通信链路连通性高于移动车辆直接与静止无线接入点相连,且不需要频繁切换,仅需车辆自组网络内信息的交互即可完成任务处理,均衡网络负载,增强网络连通性,提升用户体验的同时降低通信成本。

由于传统的 V2V 通信组网模式中存在移动性节点的间歇性连接,无法满足未来车联网业务服务质量和超低时延的要求,参考文献[26]引入 VFC 的概念,定义 VFC 的三层组网模型,即云—一朵云—车辆/终端设备三层结构,实现分布式交通管



理。通过利用移动和停放的车辆作为雾节点，将VFC组网模式内的卸载方案表述为优化问题，可以最大程度地减少车辆收集和报告的全市事件的响应时间，最优化车辆节点的选择，提升网络服务质量，实现网内数据与业务低时延化。针对海量移动终端入网情况下云计算存在的时延冗长、网络拥塞、对移动性支持不佳的问题，参考文献[27]将固定的云计算节点与移动的雾节点（如移动智能手机、自动驾驶车辆等各种移动设备）联合组网，通过在网络中部署大量雾计算节点，可以将计算、中继、缓存、控制等在内的服务灵活地部署在这些移动的、无处不在的雾节点上，更好地降低网络时延。通过博弈论联合考虑网络时延和节点能耗，动态选取节点附近的移动雾节点对任务进行计算、缓存、控制等，提升任务服务质量，在降低任务处理时延的同时，降低网络能耗。在未来车联网场景中，由于车辆具有数量庞大、移动性强、地理位置分布广等特征，如将产生的业务量上传至云端，也存在如参考文献[27]所述的时延冗长等问题，未来网络需要在网络边缘为移动车辆实现任务的低时延、高可靠处理，降低网络拥塞，因此参考文献[27]的研究成果符合未来车联网的应用场景和需求，可以为车联网降低任务处理和传输时延、降低网络拥塞、支持移动性业务等提供参考。

3.1.2 移动状态下的计算任务卸载

计算任务卸载是通信与计算资源分配与任务协同处理方向关注的焦点之一。它是根据协同计算节点的计算能力和任务的实时性要求，将密集计算任务分割，一部分对时延要求高的任务在本地节点计算，剩余任务卸载到其他节点进行处理，解决本地节点计算能力有限，无法完成密集计算任务的问题。车辆雾计算网络中的计算任务卸载必须考虑移动性。由于车辆处在不断的运动中，请求服务的用户节点周围环境不断变化，在选取分布式节点进行协同工作时，若按照静止时刻的

相对位置选取节点，可能会出现节点的不合理选取，造成用户服务时延加大，服务质量下降。例如，在静止时，对节点的选取可依照区域内节点通信范围与整体时延进行优化选择，但由于车辆实际是移动的，部分协作节点接到任务，可能尚未处理结束，就已驶离任务请求节点的通信范围，无法直接回传结果，可能造成任务数据的丢失，影响整体任务的处理与执行。因此需要充分考虑车辆的移动性，在车辆动态组网的架构下，合理为用户节点分配资源，实现移动状态下的车辆间计算任务卸载。

具体而言，移动计算任务卸载的过程受用户共享资源的程度、移动无线信道的状态、移动设备的性能等因素的影响，需要根据实际情况合理制定卸载决策。另一方面，计算任务卸载不仅可以同时处理多项任务，还可利用多个节点对一个可分任务进行并行处理，降低处理时延。在车辆雾计算网络中，雾节点丰富，当用户请求任务卸载时，可以结合车辆移动性的特征，调动所需时间内多个用户可达的雾节点进行卸载决策，对任务进行卸载处理。移动情况下，计算任务卸载选择的卸载节点不同，由于移动性造成的移动传输时延、能耗、服务质量和静止状态相比均存在很大差异。对于移动卸载节点的选取，根据优化目标和不同，可以分为移动状态下的单优化目标卸载与移动状态下的多优化目标卸载两种。

移动状态下的单目标优化卸载主要包括最小化移动传输时延与最小化移动节点能耗两种。由于车辆移动性，车辆雾计算网络具有动态性、随机性和高复杂性，车辆间建立的通信链路不稳定，不适宜卸载大计算任务，因此参考文献[28]考虑了一个车辆集群形成的“车辆云”辅助的负载计算场景。为了有效利用车载计算资源，提出协作任务调度方案，旨在最大程度地减少卸载任务的平均响应时间。在移动性考虑方面，为了表征由车辆的机动性与移动性引起的不稳定性，利用了面

向停留时间的车辆机动性模型,在车辆可以保持连接在“车辆云”的时间内对车辆分配任务进行协同处理;考虑到车辆计算能力的差异性和计算任务的相互依赖性,制定了一个任务调度问题。基于以上移动性考虑模型和任务调度问题,将计算任务按照数据的关联程度划分为相互依赖的子任务,采用遗传算法对计算任务卸载方案进行决策,将子任务卸载至不同车辆节点进行并行处理,最终实现移动状态下的计算任务总时延最小化。参考文献[29]针对车辆移动性造成的网络拓扑、无线信道状态和区域内可用资源的动态变化难以预测的问题,提出基于MAB(multi-armed bandit,多臂赌博机)算法学习任务卸载决策,即通过决策使服务请求车辆不断获取并学习临近车辆的可用资源,并通过重新设计MAB算法中的效用函数,提出一种AVUCB(adaptive volatile upper confidence bound,自适应易失性上限置信度)算法,使其适应移动环境下车辆产生的时变负载和动作环境空间。参考文献[29]提出的算法增强了对移动状态下的负荷感知和事件感知能力,因此AVUCB可以有效应对高度动态的车辆环境,并在学习过程中产生平衡任务负载的决策,选取合适的移动车辆节点处理计算任务,最小化时延。

多优化目标主要包括时延-能耗联合优化、最大化经济效益以及对公平性、安全性等其他因素的考虑。参考文献[30]将车辆作为移动雾节点,指出雾节点在移动过程中产生的计算与通信任务量不断变化。为解决由于雾节点的动态变化产生的计算、通信资源不稳定的问题,在考虑QoS(quality of service,服务质量)损失因子的基础上,提出一种Folo动态任务分配方案,将任务建模为QoS损失因子和服务时延联合优化模型,并使用移动状态下DTA(dynamic task allocation,动态任务分配)架构,使移动雾节点与静态雾节点协同工作,动态分配车辆雾计算网络内的资源。通过将出租车的运行路线数据结合视频数据流以及

实时目标检测产生的任务数据,进行模型和算法的仿真,验证算法和模型的有效性:Folo算法可以将平均服务时延缩短27%,同时将QoS损失减少56%。参考文献[31]认为在车联网雾计算应用中,由于不同的应用对时延的要求不同,且车辆在不断移动,不仅计算资源是可变的,车辆与固定服务器间建立的连接也不稳定,在对应用进行再卸载、再处理时还会产生额外的开销,迫切需要有一种针对车辆移动性的资源分配方案来提高卸载效率、降低额外开销。因此设计基于SMDP(semi-Markov decision process,半马尔科夫决策过程)的计算卸载策略,满足请求者在移动环境下最大化长期预期回报的要求,通过动态的资源分配满足应用对于时延的不同要求,即最大化车联网雾计算的收入与系统消耗的差值并提高移动性条件下的车辆雾计算卸载效率。参考文献[32]针对车辆移动性造成的任务卸载网络时延与拥塞难以管理和卸载节点难以决策的问题,提出一种基于SDN(software defined network,软件定义网络)的解决方案,通过SDN控制器控制任务的优先级管理器,结合负载均衡器,对移动车辆产生的计算任务卸载需求进行决策。由于传统网络是基于硬件的,由分布式或分散式架构组成,其控制平面和数据平面之间的强耦合使得网络配置和管理非常复杂,尤其在面对未来车辆雾计算高移动性、业务复杂多样化、对网络灵活性要求高的场景下,传统网络难以针对车联网添加灵活多变的新的网络功能和高移动性的处理策略,容易出现网络拥塞与网络难以管理的问题,并且不适合处理典型车联网场景中网络流量增加的情况。SDN将网络设备上的控制权分离出来(控制平面与数据平面解耦),由集中的控制器管理,无须依赖底层网络设备(路由器、交换机、防火墙),屏蔽了来自底层网络设备的差异,使控制权面向用户完全开放,用户可以自定义任何想实现的网络路由和传输规则策略,从而更加灵活和智能,以最小的



成本和网络拥塞提供了高度的灵活性和可扩展性，缓解网络拥塞，更好地管理网络流量。在车联网中，海量车辆产生纷繁多变的业务，车辆的高移动性也带来网络拓扑的不断变化，利用 SDN 的高灵活性和可扩展性，可以智能地管理网络流量，快速响应业务需求变化，面向车辆业务灵活调控网络软硬件资源，有助于构建未来智能的车辆雾计算网络。

3.1.3 移动节点服务迁移

在雾节点层中，由于拥有较强计算能力的雾节点如 MEC 服务器等部署在网络边缘（如部署在基站侧与基站共址），其服务范围有限，加上车辆的高移动性，同一移动用户节点可能需要通过部署在不同基站侧的 MEC 服务器上传任务和接收计算处理结果。现有研究大多忽略了车辆移动性的影响，将任务分配给部署在当前服务基站侧的 MEC 节点，当车辆移动时，移动用户终端与提供服务的 MEC 服务器距离逐步增加，业务的交互时延增加，业务 QoS（包括交互时延和吞吐量）降低。通过服务迁移^[33-37]，可将运行业务的 VM（virtual machine，虚拟机）迁移到距离终端较近的 MEC 服务器。在车辆雾计算中应用服务迁移策略，可以更好地实现车辆移动过程中用户的 QoS 保障。

服务迁移的概念最早出现在云计算（数据中心）领域^[38]，研究的目标是最小化迁移成本、降低系统的能耗和负载均衡等，但相关方法和机制未考虑与终端移动性相关的参数，未必适用于移动场景。考虑用户移动性造成的影响，例如对任务进行处理时需要不断切换计算访问点、导致网络中断与服务降级，参考文献[33-37]研究移动场景下 MEC 的服务迁移，通过服务迁移将移动节点中正在运行业务的 VM 迁移到距离移动终端较近的 MEC 服务器，来提升业务的服务质量。参考文献[33-34]认为在移动场景中，每个计算访问点仅提供有限的无线覆盖范围，因此物联网设备的

移动将要求在不同的计算访问点之间进行切换，从而导致复杂的互连网络问题和服务中断，因此提出“总是迁移”方案，即用户的业务总是在距离其最近的 MEC 服务器处理，可以有效降低业务的传输时延，但是该方案完全忽略服务迁移成本。参考文献[37]指出服务迁移会产生不可忽略的迁移成本，如迁移过程中需要进行大量中间数据（如 VM 内存数据、内存脏页）的传输，导致网络负载急剧增加。参考文献[35-37]关注迁移成本的建模，对迁移成本进行定义。参考文献[35-36]将迁移成本定义为常数，认为车辆在某时隙的迁移成本可视为在当时时隙开始时的状态下的固定花销，通过对不同迁移任务进行分类并定义不同类型任务的迁移成本，将移动用户的迁移成本进行常数化处理。但是在实际场景中，由于用户的移动性，迁移成本受不同位置设备的启动停止成本、数据中心对移动设备的流量分配、实际移动过程中用户与云服务中心交换数据带来的带宽消耗不同等的影响，参考文献[37]考虑更加实际的迁移成本，从用户移动过程中带来的网络负载随时间变化的角度建模迁移成本，将其定义为传输数据与传输距离的乘积。此外，参考文献[35-37]采用 MDP（Markov decision process，马尔科夫决策过程）进行迁移增益（改善的 QoS）和迁移成本的均衡，得到基于服务距离的迁移策略，即根据系统每个时刻的用户服务距离进行迁移决策。在车辆雾计算中应用上述移动场景下的服务迁移策略，可以改善由于车辆移动性造成的任务执行不断切换、服务降级、时延提升等问题，有效提升用户的 QoS。

综上所述，面向车辆移动状态下的资源共享与任务协同处理问题，需要综合考虑车辆移动情况下的通信网络组网、移动状态下的计算任务卸载、移动节点的服务迁移等，提升车辆雾计算网络的吞吐量，降低网络内部任务的服务时延，更好地提升用户的服务质量。

3.2 车辆雾计算的安全性

车辆雾计算中车辆节点广泛联网,参与决策,在提升网络智能化的同时带来巨大的安全风险,尤其是随着自动驾驶技术的发展,车辆雾计算的安全性更加重要^[39]。车辆雾计算网络在通信系统安全性方面,除了面临假冒网络、信令窃听、信令篡改和信令重放等信令面风险外,还面临着虚假信息、假冒终端、信息篡改、信息重放和隐私泄露等安全风险^[40]。根据这些网络威胁的内容不同,可以将车辆雾计算的安全问题分为终端安全、网络安全、应用服务安全、数据安全四大类^[41]。对于终端而言,一方面存在无线链路脆弱、网络拓扑动态变化、节点计算存储能力与能源有限、现场干扰大、通信环境差等安全隐患;另一方面,黑客可以通过互联网技术攻击车联网,进而实施对车辆终端整个车内网络的控制,带来严重信息安全、隐私安全甚至人身财产安全隐患。对于网络而言,目前主要存在协议层面、切换机制等方面的安全漏洞,同时还存在密钥暴露等带来的安全与隐私泄露风险。应用服务安全存在的主要问题是各类操作系统存在一定的安全漏洞,操作系统本身的脆弱性将直接影响整个系统的安全性,同时每一类应用程序都存在一定的安全风险与漏洞,若配置不当将会对整个车辆雾计算网络的安全造成威胁。数据安全问题主要包括黑客对数据的窃取、篡改、发布恶意信息、伪造等,这将导致车辆雾节点终端无法接收到准确的车辆控制与指令信息,影响车辆正常运行,最终威胁车辆雾计算整体网络安全^[40-41]。面向未来车辆雾计算网络的智能化、多样化发展,安全性将成为越来越重要的问题。传统密码学和信息安全技术与区块链的发展,为未来车辆雾计算网络的高可靠性、高安全性、高隐私性发展创造了新的条件。

3.2.1 传统密码学和信息安全技术

传统密码学、信息安全认证技术、网络安全平台等保障安全的技术与手段的发展,为车辆雾

计算的安全性提供了可靠的保障与风险防范方案。参考文献[40]分析认为,应对新形势下的车联网安全,除了应该在制度层面健全车联网安全标准体系外,更应该以技术为依托,加强车联网关键安全技术和产品的研发,包括加快国产关键软硬件自主研发,加强车联网关键防护技术产品和解决方案的研发(包括适用于车辆场景的身份和位置隐私保护技术、轻量级的认证协议和加密算法等),建立车联网安全漏洞信息共享平台,建立车联网安全检测预警平台等。参考文献[41]针对车联网通信系统安全,分析了车联网通信的安全性问题,认为在车联网应用系统中,需要依据应用的具体需求对车辆播发的消息提供认证性、完整性和机密性保护能力,从而提出了一种车联网通信安全服务架构、一种公钥证书方案和一种PKI(public key infrastructure,公钥基础设施)部署方案,促进车联网通信安全的发展。参考文献[42]通过分析端、管、云3个层面的安全风险,阐述密码技术在车联网中的应用,认为非对称加密(如SM2)、对称加密(如SM1、SM4)、完整性运算(如SM3)等多种多样的密码算法是保障车联网安全的核心技术和基础支撑,是解决车联网安全问题有效、可靠、经济的手段。但是,仅希望依靠密码学去解决车联网中的所有问题是不切实际的,国密算法应用在车辆体系中存在较多困难,例如,对于车联网来说,通过V2X通信的更多的是车端与路测设施之间的通信,因此路测设备与车辆之间的密码算法接口需要统一,但是目前尚无行业标准与规范,需要结合其他网络安全技术共同保障车辆雾计算以及车联网的安全。

3.2.2 基于区块链的车辆雾计算安全

随着近几年区块链的快速发展,使用区块链作为车辆雾计算网络的保障性技术来确保车辆雾计算网络数据的安全性和操作安全性成为新的趋势。区块链是多种计算技术的结合,包括分布式数据库、点对点传输、共识机制和加密。由于区



区块链具有去中心化、不变性、匿名性和安全性的特点，因此通过身份验证和识别，区块链可以使车辆与网络的连接更加可靠和安全^[43-44]。在车辆雾计算网络中，区块链可以作为保障性技术部署在网络边缘，利用雾节点层的节点组成区块链网络。随着车辆雾计算的发展，区块链防篡改的特性可以保护数据隐私，同时防止攻击者对网络数据和下达指令的恶意更改。从运营的角度来看，基于区块链的车辆雾计算网络中产生的所有任务数据、交易流程都将更新到区块链的分布式分类账中，并且可以被网络中的参与者识别和认证的每个节点访问，实现安全、可靠的网络管理^[45-46]。

在利用区块链保障车辆雾计算安全性与数据安全共享时，首先需要对车辆雾计算网络的主用户（如管理一个区域的基站）合法性进行验证，通过合法机构注册获得证书及交易过程中需要使用的公钥与私钥^[47]。在进行车辆入网安全性保障时，基站通过制定智能合约用于规范车辆用户安全入网并激励用户共享资源。主用户在实现入网用户资源共享的过程中，利用私钥签署交易，并将可以获取网内用户资源的公钥广播给链内其他用户，当请求资源的用户所持私钥与主用户公钥匹配后，可获得网络内共享资源的使用权限，完成一笔交易^[48]。区块链内车辆间安全产生的每一笔资源、数据交易将被存储在分布式分类账中，由全体区块链内车辆用户共同维护，不允许篡改与删除。产生的交易将被记录在区块链的区块中，创建区块需要矿工不断挖矿计算，得到一个带有时间戳的哈希值，并向链内用户广播以获得验证。当区块链内的用户验证通过后，就可创建一个可记录区块链内交易的区块。通过这种基于智能合约与所有用户共同验证的方式，基于区块链的车辆雾计算可以安全、高效地进行链内资源共享与数据传输，保障用户数据的隐私性与安全性的同时，保障区块链内数据与资源的透明性^[49]。

目前已有研究关注基于区块链的车辆雾计算

安全。参考文献[50]认为，IV（intelligent vehicle，智能车辆）在为社会提供了便利的同时，也存在通信、数据等诸多层面的安全风险。基于区块链可以建立信任关系与可靠性，提出基于区块链的IV通信的CTP（crypto trust point，加密信任点）机制，考虑合法和非法的车辆行为，通过奖励来建立车辆间的信任，并在ITS（intelligent transportation system，智能运输系统）中使用区块链技术对CTP进行数据管理。通过CTP，构建用于IV数据共享和通信安全可信的分布式环境，即无须通过第三方验证机构对安全性进行验证，也不需要将数据传输至核心网后进行共享，在边缘网络中即可快速建立车辆节点间的信任关系，并在网络边缘快速、实时处理产生的数据，达到IV之间可以高效安全地进行数据共享的目的，同时这种区块链互相验证的方案保证了车辆服务对区块链网络内用户的透明性。参考文献[51]认为联网车辆充斥着众多安全和隐私漏洞，信息共享中的安全性和隐私性是车辆通信网络的主要关注点。因此提出将区块链技术应用到车辆自组织网络中，通过区块链网络中的智能合约、所有参与者对加入用户与数据的共同验证以及不允许篡改与伪造，保证了基于区块链的车辆自组织网络的安全性与可靠性。在该架构内，车辆可以使用分布式访问控制系统共享信任度高、安全、可靠的网络资源，网络自动分析并验证信息共享的每个阶段，确保区块链用户个人数据的私密性。通过这种新型架构，在安全高效共享数据的同时，避免了第三方验证机构对用户安全性的验证，降低了多用户向第三方传输验证请求并等待验证的时延，实现了用户数据在网络中的完整性和机密性，推动区块链在车联网中的应用。参考文献[52]认为网络攻击者可以通过攻击联网车辆获取车辆中收集到的用户数据信息，从而造成用户隐私的泄露。由于区块链可以保障用户数据安全与隐私，因此提出了一种基于区块链的车辆数据平台，在车辆间建立

区块链网络, 保证所有通过区块链安全性验证、加入区块链的节点才可获取网络内的用户数据信息, 否则将拒绝提供数据。通过区块链的智能合约、所有节点共同验证的方式, 保证可入网节点的安全性与可靠性, 从而确保联网车辆的数据隐私性、完整性和可访问性。

综上所述, 数据和网络的安全性与可靠性是保证车辆雾计算正常、安全工作的重要保障。传统密码学、信息安全认证技术、网络安全平台以及区块链技术, 在一定程度上提升了未来车辆雾计算系统的安全性与可靠性。但目前各类安全性技术在车联网领域的应用还处在较为初级的阶段^[39], 未来如何实现各类安全技术的融合、更好地提升车辆雾计算的安全性水平, 密切关系着车辆雾计算的发展与交通的安全与稳定, 还需要更深入的研究。

3.3 车辆雾计算设施的异构性

车辆雾计算异构性主要包括设备数据、协议异构和网络异构。数据、协议的异构体现为设备输入输出数据的格式、大小不同; 网络异构可用网络属性表征, 包括无线资源、网络开销、收费标准等。数据、协议异构特性导致设备间通信困难, 目前主要采用中间件技术实现互联互通; 网络异构导致多网资源无法共享, 在动态环境中服务 QoS 下降, 需要动态资源分配技术来保证不同环境不同业务的 QoS^[53]。

3.3.1 智能中间件

车辆以及大量车载或路边传感器的高效互联互通是未来智慧车联网的核心。车辆雾计算网络以车辆以及路边单元作为网络节点, 利用节点上高效的信息交互服务, 感知周围环境, 满足多样化的智慧交通应用场景的需求^[54]。但诸多接入设备和传感器产生海量异质数据, 加重了数据中心的负担, 同时也占用了大量的无线通信资源。在未来车联网中, 雾计算网络节点需要有效地对数据进行初步的处理、分析、融合。而传统网络节

点中间件只能对协议进行转换, 无法实现接入数据的预处理功能。

参考文献[55]提出, 在雾计算边缘服务器上部署智能中间件, 具有感知网络接入、异构数据转换和数据过滤等功能, 可根据不同用户的特点自适应感知上下文, 完成数据预处理并选择数据转发时间与类型, 实现高效的设备互联。参考文献[56]考虑所有设备都可以互联的场景, 提出了基于服务体系架构的车辆网络中间件, 将多个设备集成到统一的系统中, 并分析比较了面向服务的不同体系架构, 验证了 DPWS (device profile for Web services, Web 服务的设备配置文件) 标准最适用于车载娱乐和通信系统。参考文献[57]考虑系统通信故障情况, 提出基于发布/订阅模式的 DDS (data distribution service, 数据分发服务) 中间件, 为不同设备、平台提供通信访问服务, 并对实时性任务性能进行分析。该中间件以数据为中心, 构建任何对象都可以读写的全局数据空间, 用于保存最新的数据分组。当通信失败后, 访问者可以直接从中间件重新获取统一格式的数据, 从而满足一定的 QoS 要求。参考文献[58]提出了动态的、模块化的中间件管理方法, 保证不同异构设备的“即插即用”, 并满足不同应用服务的 QoS 需求。模块化的中间件也适应了车辆雾计算网络复杂的设备接入情况以及多变的网络拓扑。

3.3.2 异构网络接入与资源分配

多样的基础设施、动态的网络环境、不同的接入技术导致车辆组网过程越来越复杂。未来的车辆雾计算网络将发展为不规则的、多网并存的自组织异构网络。车辆可通过不同方式接入网络来请求车辆业务需求, 但动态的环境导致服务质量难以得到保证。车辆需要在复杂的异构环境中, 进行网络选择, 实现服务质量与通信资源的匹配。

参考文献[59]利用有限的通信网络资源, 合理选择 Wi-Fi、蓝牙、DSRC (dedicated short range communication, 专用短程通信) 和蜂窝网络等异



构网络进行互交,提高车辆数据服务性能,满足多样化应用场景需求。针对车载传感器以及车内其他通信设备间干扰导致的高能耗问题,参考文献[60]在综合考虑能耗利用率、信号强度、网络开销、时延、带宽等条件下,提出了 Wi-Fi、蓝牙、蜂窝网络等网络的切换方案。值得注意的是,车辆还可以利用 V2V、V2I 等多种接入方式,实现不同范围内通信资源、计算资源的共享^[61]。参考文献[62]利用移动预测模型,根据全局信息为车辆规划最优路由,自由地选择 V2I 或 V2V 以适应网络的动态变化。参考文献[63]研究了车辆组网过程中能耗问题,研究了 V2V 与 V2I 联合组网的节能资源分配算法,提出了基于拍卖匹配的联合中继选择、频谱分配和功率控制算法。为了保证车辆通信的可靠性,参考文献[64]研究了 LTE、Wi-Fi 通信的 V2I 网络和 DSRC 通信的 V2V 网络的异构网络融合组网,以最小化服务时延为目标,提出了低复杂度的中继选择优化算法。同样,参考文献[65]综合 DSRC 和 LTE V2X 优势,并基于车辆地理位置和速度的集群方法,提出了双跳传输的异构网络架构。首先,集群成员通过 DSRC 和集群领导车辆通信(V2V);其次,集群领导车辆通过 LTE 与路边基础设施通信(V2I);最终实现了车辆集群的实时更新和 DSRC、LTE 间带宽资源的优化。

4 车辆雾计算网络三级管控架构

随着未来车联网智能化的不断提升、无人驾驶等人工智能应用的出现,对车辆雾计算网络内车辆间的通信、协同工作提出了更高的要求。但是,目前的无人驾驶车辆均还是独立的智能体,车辆联网获取信息的程度较低,无法满足全局交通管控有序化、降低交通拥堵、减少事故发生率等需求,亟须对独立智能体联网管控,通过交管中心与边缘区域的协同管控,实现车辆间的信息交互与协同工作,根据实时交通信息规划车辆管控信息,达到全局有序化管理、减少事故发生率、

降低交通拥堵等效果。为此,本文提出一种基于中心管控—局部管控—本地管控三级管控的车辆雾计算网络管控架构,在无人驾驶高度灵活性、智能化的本地管控基础上,增加了对所有车辆的中心管控和对局部范围内车辆的局部管控。车辆雾计算网络三层管控架构如图 2 所示,中心管控单元具备丰富的计算和存储资源,负责系统中心管控,完成整体交通路网信息处理,为每个车辆提供全局路径导航;局部管控由路边基础单元负责,包括 4G/5G 基站、支持 DSRC 的 RSU (road side unit, 路侧单元) 等,系统将根据服务质量需求,匹配当前网络资源,选择合适的路边基础单元完成与移动车辆的通信,并利用智能中间件统一数据格式,在中心管控单元完成来自 4G/5G 基站和 DSRC RSU 的数据融合,同时可以接收来自中心管控单元的车辆全局路径导航信息,对行驶至本区域内的车辆规划区域内的道路级导航,控制车辆行驶在局部导航规划的车道上;本地管控由车辆自身智能体负责,接收局部导航信息,实时感知周围交通环境,并与路边单元不断互交,简单处理突发状况,控制车辆精确、安全地在预定路线上行驶。

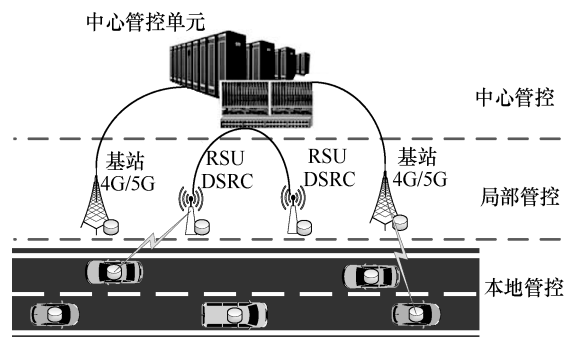


图2 车辆雾计算网络三层管控架构

这种支持网联协同感知与决策控制的车辆雾计算网络三级管控,既需要高速可靠的移动通信技术(如 5G)的支撑,也需要高度的智能管理,要有能力自适应地、动态地感知周围环境以及网络内部信息的变化。因此,如何将无监督的机器学习应用于动态感知信息、动态调用可用资源并进行配置以

取得良好的用户体验,是车辆雾计算网络三级管控面临的一大挑战,需要更深入的研讨。

5 结束语

随着车联网的不断发展,对智能化和信息化的要求越来越高,实时性要求高、计算密集型的车联网业务层出不穷,但现有技术难以满足业务需求。以雾计算为代表的边缘计算给了未来智能车联网新的发展机遇。车辆雾计算能够极大程度地降低系统时延,满足实时性要求。与此同时,雾计算结合区块链还能够保证车联网的用户数据安全性。此外雾计算的分布式架构结合智能中间件和感知接入,可有效应对异构车辆设备带来的互联互通和资源共享问题。面向未来,未来车辆雾计算网络迫切需要从目前的网联辅助信息交互阶段向网联协同感知、网联协同决策与控制阶段发展。为此,本文提出车辆雾计算网络三级管控架构,在高速可靠的移动通信技术和智能技术的支撑下,实现网联协同决策与控制。

参考文献:

- [1] ZHOU Y, TIAN L, LIU L, et al. Fog computing enabled future mobile communication networks: a convergence of communication and computing[J]. IEEE Communication Magazine, 2019, 57(5): 20-27.
- [2] LIU L, ZHOU Y, YUAN J, et al. Economically optimal MS association for multimedia content delivery in cache-enabled heterogeneous cloud radio access networks[J]. IEEE JSAC, 2019, 37(7): 1584-1593.
- [3] LIU L, ZHOU Y, ZHUANG W, et al. Tractable coverage analysis for hexagonal macrocell-based heterogeneous UDN with adaptive interference aware CoMP[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 503-517.
- [4] LIU L, ZHOU Y, GARCIA V, et al. Load aware joint CoMP clustering and inter-cell resource scheduling in heterogeneous ultra dense cellular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(3): 2741-2755.
- [5] ZHOU Y, LIU H, PAN Z, et al. Cooperative multicast with location aware distributed mobile relay selection: performance analysis and optimized design[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(9): 8291-8302.
- [6] 新华网. 车联网产业发展报告[EB].2019. Xinhuanet. Report on the development of internet of vehicles industry[EB]. 2019.
- [7] 互联网周刊.车联网与大数据时代将产生无数应用前景[EB]. 2014. Internet weekly. Internet of vehicles and big data era will produce numerous application prospect[EB]. 2014.
- [8] IEEE. STD 1934-2018[S]. 2018.
- [9] BOMOMI F. Connected vehicles, the internet of things, and fog computing[C]//Proceedings of ACM International Workshop on Vehicular Inter-Networking (VANET). New York: ACM Press, 2011: 13-15.
- [10] BONONMI F, MILITO R, ZHU J, et al. Fog computing and its role in the internet of things[C]//Proceedings of the First Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing. New York: ACM Press, 2012: 13-16.
- [11] NI J, ZHANG A, LIN X, et al. Security, privacy, and fairness in fog-based vehicular crowdsensing[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(6): 146-152.
- [12] HUNG S, ZHANG X, FESTAG A, et al. Vehicle-centric network association in heterogeneous vehicle-to-vehicle networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5981-5996.
- [13] MILOSEVIC M, BJELICA M Z, MARUNA T, et al. Software platform for heterogeneous in-vehicle environments[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2018, 64(2): 213-221.
- [14] RACHEDI A, BADIS H. BadZak: an hybrid architecture based on virtual backbone and software defined network for internet of vehicles[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications(ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [15] LIU Y, FIELDSEND J E, MIN G. A framework of fog computing: architecture, challenges, and optimization[J]. IEEE Access, 2017(5): 25445-25454.
- [16] HOU X, LI Y, CHEN M, et al. Vehicular fog computing: a viewpoint of vehicles as the infrastructures[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 3860-3873.
- [17] XIAO Y, ZHU C. Vehicular fog computing: vision and challenges[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2017: 6-9.
- [18] TANZIL S M S, GHAREHSHIRAN O N, KRISHNAMURTHY V. Femto-cloud formation: a coalitional game-theoretic approach[C]//Proceedings of IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [19] OUEIS J, STRINATI E C, SARDELLITTI, et al. Small cell clustering for efficient distributed fog computing: a multi-user case[C]//Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [20] VONDRA M, BECVAR Z. QoS-ensuring distribution of computation load among cloud-enabled small cells[C]//Proceedings of 3rd IEEE International Conference on Cloud Networking. Piscataway: IEEE Press, 2014: 197-203.
- [21] LIAO H S, CHEN P Y, CHEN W T. An efficient downlink radio resource allocation with carrier aggregation in LTE-Advanced



- networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2014, 13(13): 2229-2239.
- [22] KLAIMI J, SENOUCI S M, MESSOUS M A. Theoretical game approach for mobile users resource management in a vehicular fog computing environment[C]//Proceedings of 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 452-457.
- [23] WANG Z, ZHAO Z W, MIN G Y, et al. User mobility aware task assignment for mobile edge computing[J]. Future Generation Computer Systems, 2018(85):1-8.
- [24] WANG C, LI Y, JIN D. Mobility-assisted opportunistic computation offloading[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(10): 1779-1782.
- [25] HOU X S, LI Y, CHEN M, et al. Vehicular fog computing: a viewpoint of vehicles as the infrastructures[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 3860-3873.
- [26] NING Z L, HUANG J, WANG X J. Vehicular fog computing: enabling real-time traffic management for smart cities[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 87-93.
- [27] ZHANG G W, SHEN F, YANG Y, et al. Fair task offloading among fog nodes in fog computing networks[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications(ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [28] SUN F, HOU F, CHENG N, et al. Cooperative task scheduling for computation offloading in vehicular cloud[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(11): 11049-11061.
- [29] SUN Y, GUO X, ZHOU S, et al. Learning-based task offloading for vehicular cloud computing systems[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications(ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [30] 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.
- [31] WANG Z, ZHONG Z D, NI M M. Application-aware offloading policy using SMDP in vehicular fog computing systems[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications(ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [32] AUJLA G S, CHAUDHARY R, KUMAR N, et al. Data offloading in 5G-enabled software-defined vehicular networks: A stackelberg-game-based approach [J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(8): 100-108.
- [33] BAO W, YUAN D, YANG Z J, et al. Follow me fog: toward seamless handover timing schemes in a fog computing environment[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(11): 72-78.
- [34] WANG K, SHEN M, BANERJEE J, et al. MobiScud: a fast moving personal cloud in the mobile network[C]//Proceedings of Workshop on All Things Cellular: Operations. New York: ACM Press, 2015: 19-24.
- [35] WANG S, URGANONKAR R, HE T, et al. Mobility-induced service migration in mobile micro-clouds[C]//Proceedings of IEEE Military Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 835-840.
- [36] KSENTINI A, TALEB T, CHEN M. A Markov decision process-based service migration procedure for follow me cloud[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1350-1354.
- [37] TALEB T, KSENTINI A, FRANGOUDIS P. Follow-me cloud: when cloud services follow mobile users[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2016, 7(2): 1350-1354.
- [38] ZHANG F, LIU G, FU X, et al. A survey on virtual machine migration: challenges, techniques, and open issues[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 1206-1243.
- [39] 黄语骁. 车联网网络安全技术研究[J]. 电子世界, 2018(19): 49-50.
- HUANG Y X. Research on internet of vehicles network security technology [J]. Electronic World, 2018(19): 49-50.
- [40] 刘晓曼, 罗成, 田慧蓉, 等. 车联网网络安全管理与技术研究[J]. 电信网技术, 2017(4): 1-4.
- LIU X M, LUO C, TIAN H R, et al. Research on network security management and technology of internet of vehicles [J]. Telecommunication Network Technology, 2017(4): 1-4.
- [41] 周巍, 朱雪田, 夏旭. 面向 5G 的车联网安全业务研究[J]. 电子技术应用, 2019, 45(12): 34-37.
- ZHOU W, ZHU X T, XIA X. Research on 5G internet of vehicles security service [J]. Electronic and Applied Technology, 2019, 45(12): 34-37.
- [42] 冯凯, 李巍, 龚洁中. 车联网中密码算法应用现状分析[J]. 中国信息安全, 2019(9): 97-99.
- FENG K, LI W, GONG J Z. Analysis on the application status of cryptographic algorithms in internet of vehicles [J]. China Information Security, 2019(9): 97-99.
- [43] KATZ M, PIRINEN P, POSTI H. Towards 6G: getting ready for the next decade[C]//Proceedings of 16th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 714-718.
- [44] DAI Y Y, XU D, MAHARJAN S, et al. Blockchain and deep reinforcement learning empowered intelligent 5G beyond[J]. IEEE Network, 2019, 33(3): 10-17.
- [45] XIONG Z H, ZHANG Y, NIYATO D, et al. When mobile blockchain meets edge computing[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(8): 33-39.
- [46] WEISS M B H, WERBACH K, SICKER D C, et al. On the application of blockchains to spectrum management[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2019, 5(2): 193-205.
- [47] DAI Y, XU D, MAHARJAN S, et al. Blockchain and deep reinforcement learning empowered intelligent 5G beyond[J]. IEEE Network, 2019, 33(3): 10-17.
- [48] WEISS M, WERBACH K, SICKER D, et al. On the application of blockchains to spectrum management[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2019, 5(2): 193-205.
- [49] ZHOU Z, CHEN X, ZHANG Y, et al. Blockchain-empowered secure spectrum sharing for 5G heterogeneous networks[J]. IEEE Network, 2020, 34(1): 24-31.

- [50] SINGH M, KIM S. Crypto trust point (cTp) for secure data sharing among intelligent vehicles[C]//Proceedings of International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [51] SHARMA S, GHANSHALA K K, MOHAN S. Blockchain-based internet of vehicles (IoV): an efficient secure Ad Hoc vehicular networking architecture[C]//Proceedings of IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). Piscataway: IEEE Press, 2019: 452-457.
- [52] LEE S O, JUNG H, HAN B. Security assured vehicle data collection platform by blockchain: service provider's perspective[C]//Proceedings of 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 265-268.
- [53] 夏景. 基于工业互联网数据转化的船舶机械设备多元异构集成平台研究[J]. 船舶物资与市场, 2019(7): 34-35.
- XIA J. Research on multiple heterogeneous integration platform of Marine machinery and equipment based on industrial Internet data conversion [J]. Marine Equipment Materials & Marketing, 2019(7): 34-35.
- [54] QIAO G, LENG S, ZHANG K, et al. Collaborative task offloading in vehicular edge multi-access networks[J]. IEEE Communications, 2018, 56(8): 48-54.
- [55] AAZAM M, HUH E. Fog computing micro datacenter based dynamic resource estimation and pricing model for IoT[C]//Proceedings of 2015 IEEE 29th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Piscataway: IEEE Press, 2015: 687-694.
- [56] EICHHORN M, PFANNENSTEIN M, MUHAR D. A SOA-based middleware concept for in-vehicle service discovery and device integration[C]//Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2010: 663-669.
- [57] CHEIKH F B, MASTOURI M A, HASNAOUI S. Implementing a Real-Time Middleware Based on DDS for the Cooperative Vehicle Infrastructure Systems[C]//Proceedings of 6th International Conference on Wireless and Mobile Communications. Piscataway: IEEE Press, 2010: 492-497.
- [58] OUEDRAOGO C A, MEDJIAH S, CHASSOT C. A modular framework for dynamic QoS management at the middleware level of the IoT: application to a OneM2M compliant IoT platform[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications(ICC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [59] LIU Y, WANG W, MA Y, et al. Distributed task offloading in heterogeneous vehicular crowd sensing[J]. Sensors, 2016, 16(7): 1090.
- [60] JIANG D, HUO L, LV Z, et al. A joint multi-criteria utility-based network selection approach for vehicle-to- infrastructure networking[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(10): 3305-3319.
- [61] CHAKKAPHONG S, SUN Z. Multi-hop broadcast protocol in intermittently connected vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2018(99): 1.
- [62] TANG Y, CHENG N, WU W, et al. Delay-minimization routing for heterogeneous VANETs with machine learning based mobility prediction[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4): 3967-3979.
- [63] ZHOU Z, XIONG F, XU C, et al. Energy-efficient vehicular heterogeneous networks for green cities[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1522-1531.
- [64] HUANG W, DING L, MENG D, et al. QoE-Based resource allocation for heterogeneous multi-radio communication in software-defined vehicle networks[J]. IEEE Access, 2018(6): 3387-3399.
- [65] WANG T, CAO X, WANG S. Self-Adaptive clustering and load-bandwidth management for uplink enhancement in heterogeneous vehicular networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5607-5617.

[作者简介]



惠宁 (1995-), 女, 中国科学院计算技术研究所博士生, 主要研究方向为通信与计算融合、移动边缘计算、车联网融合区块链技术。

伍杰 (1994-), 男, 中国科学院计算技术研究所硕士生, 主要研究方向为通信与计算融合、无线定位技术、融合定位技术等。

周一青 (1975-), 女, 中国科学院大学教授, 中国科学院计算技术研究所“百人计划”研究员、博士生导师, 无线通信技术研究室副主任, 移动计算与新型终端北京市重点实验室研究员, 主要研究方向为移动通信、通信与计算融合等。已在相关领域发表论文 100 多篇, 曾获得 WCSP2019、IEEE ICC2018、ISCIT2016、IEEE PIMRC2015、CCS2014、WCNC013 最佳论文奖及 *China Communications*、*IEEE Transactions on Vehicular Technology* 期刊最佳编辑奖等。

刘玲 (1990-), 女, 中国科学院计算技术研究所助理研究员, 主要研究方向为移动通信、通信与计算融合、无线资源管理等。

潘振岗 (1975-), 男, 北京紫光展锐通信技术有限公司中央研究院先进通信技术实验室主任 (副总裁), 主要研究方向为无线信号处理、多天线系统、信道编解码、跨层优化等。