

边缘智能驱动的车联网

张彦¹, 张科², 曹佳钰²

(1. 挪威奥斯陆大学, 挪威 奥斯陆 0316; 2. 电子科技大学信息与通信工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 边缘智能技术通过将计算、存储等资源向用户端推进的方式, 赋予了网络边缘实体更强大的信息处理与内容投递能力, 也为移动业务的开发与实现提供了高效、低时延的服务支撑平台, 深刻地改变着移动应用的功能与网络资源的利用模式。首先对网络边缘智能技术在车联网中的应用进行研究, 提出了设计高效车联边缘系统所需要解决的核心科学问题。然后, 深入分析了以上问题解决过程中所面临的技术挑战, 并给出了应对策略。

关键词: 边缘智能; 车联网; 资源协同; 区块链

中图分类号: TP319

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00080

Internet of vehicles empowered by edge intelligence

ZHANG Yan¹, ZHANG Ke², CAO Jiayu²

1. University of Oslo, Oslo 0316, Norway

2. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China

Abstract: By pushing computing, storage and other resources to the proximity of end devices, edge intelligence empowers network edge entities powerful information processing and content delivery capabilities, while providing efficient and low-latency service support for the development and implementation of novel mobile services. Thus, edge intelligence is profoundly changing the functions of mobile applications and the utilization patterns of network resources. The application of edge intelligence technology in vehicular networks was studied firstly, and the core scientific problems that need to be solved in designing an efficient vehicular edge system was presented. Then, the technical challenges faced in solving these problems were analyzed and the corresponding solution strategies were given.

Key words: edge intelligence, vehicular network, resource synergy, block chain

1 引言

作为互联网的延伸, 物联网正深刻地影响并改变着人们的生活。遍布于全球不同形态的信息实体利用各种智能泛在通信系统连接起来, 构成一个复杂异构的万物互联体系, 为信息采集、数据分析、态势预测、优化控制等需求提供了强有力的支撑平台。统计结果表明, 物联网络中 80% 的流量与业务需要在接入网段甚至移动节点邻近区域得到处理, 这就促使了边缘网络技术的快速发展。区别于云端处理平台通常在核心网络提供大规模集中式处理资源, 边缘网络服务将计算、存储、通信等资源下延至用户侧, 在业务节点所在网段就近提供业务服

务, 避免信息在用户端与核心网服务节点间的长距离、高时延传输, 提升处理效率并为用户业务提供更敏捷的响应。

在技术发展与业务需求的双重驱动下, 边缘网络产业正持续向纵深发展。由于网络边缘技术涉及网络连接、环境感知、数据聚合以及信息处理等多个领域, 面对复杂多态的物联网应用环境, 如何实现相关业务的紧密耦合、异构资源的协同调度、不同处理阶段的有序协作都是急需解决的关键问题。边缘智能为以上问题提供了一种新的解决思路。在边缘网络实体中集成了智能处理模块, 可使边缘物联网系统具备自治自律的行为能力, 实现面向目标应用需求的资源调配与处理机制, 构建健硕的边缘

应用体系。

现有的边缘智能机制主要包括移动边缘计算 (MEC, mobile edge computing) 和移动边缘缓存 (mobile edge caching)。MEC 技术由欧洲电信标准化协会 (ETSI, european telecommunications standards institute) 在 2014 年提出, 旨在为无线移动节点的信息处理提供强大的计算服务支持并满足其严格的时延约束要求。该技术通过布放在无线接入网边缘的计算服务器为其邻近区域中的移动节点提供所需的计算处理服务, 既满足了无线节点设备计算能力的扩展需求, 也弥补了核心云计算服务耗时较长的缺陷。作为万物互联应用的一种核心计算支撑平台, 边缘计算已成为物联网中不可或缺的重要部分。在产业界, 包括华为、英特尔、ARM、高通动力以及中国信息通信研究院等在内的机构共同成立了边缘计算产业联盟, 标志着边缘计算已从单纯的技术概念成为行业共识。

物联网为人们进行信息交换和资源共享提供便利的同时, 也促使了网络流量呈指数级增长, 这就给网络运营商在传输带宽及设备容量等方面带来了巨大压力。针对传输信息的分析表明, 用户的数据需求大量集中于部分热点内容。在网络上重复传输相同信息将会造成通信资源的严重浪费, 为了缓解大规模数据传输需求与通信资源受限的矛盾, 并实现物联网的低时延内容投递, 业界提出了边缘存储机制。该机制基于布设在接入网段的多个存储设备, 分布式地预先缓存部分热点内容, 在用户需要该数据时, 利用接入网段多种异构通信资源实现邻近节点间信息的直接投递, 从而避免从位于远端网络的数据源直接获取内容, 减少核心网络流量, 显著降低信息的传输时延与通信开销。

近年来, 随着汽车保有量的持续增长, 道路承载容量在许多城市已达到饱和, 交通安全、出行效率以及节能减排等问题日益突出。汽车的智能化和网联化被普遍认为是解决上述交通问题的重要途径。“中国制造 2025” 战略部署指出, 具备自动驾驶技术的智能网联汽车是未来我国汽车发展的重要战略方向。典型的自动驾驶技术是通过装备在车辆上的雷达、传感和监控等设备, 建立并认知车辆行驶环境, 进而实现车辆自动操控。面对复杂时变的路网交通环境, 单车车载设备处理能力弱与数据容量低等特点将极大地制约车辆对采集的大规模交通信息进行实时处理与有效存储, 严重影响自动

驾驶的安全性与可靠性。

另一方面, 随着汽车产业与信息通信技术的深度融合, 通过车联网 (IoV, Internet of vehicles) 互联的智能汽车, 为车载应用的开发与应用注入了新活力, 新型应用如道路环境增强现实、交通行为智能导引、基于语音的人车动态交互等不断涌现。这些应用通常需要强大的计算处理与海量数据内容的支持, 其在为用户带来丰富、便利的驾乘体验的同时, 也对智能车辆的计算和存储能力提出了严峻挑战。

网联汽车作为物联网的一种重要表现形态, 可利用边缘网络智能技术来解决车辆自动驾驶和车载应用等面临的相关问题。MEC 可实现交通态势认知及车载应用等计算任务向边缘服务器的卸载与处理, 为事故预警、辅助驾驶、行驶路径优化、智能信息导引等应用提供所需的计算资源。将移动边缘存储应用于车联网通信, 可将交通路况、行驶导引以及热点资讯等大量信息预先缓存于路旁系统, 为道路中行驶的智能车辆提供低时延的内容投递服务。

考虑智能车辆在行驶过程中的快速移动性, 车联拓扑动态变化, 且车间通信具有高度不稳定性。此外, 车—车 (V2V, vehicle-to-vehicle) 通信、车—路 (V2I, vehicle-to-infrastructure) 通信和车—人 (vehicle-to-pedestrian) 通信等多种模式的混合作用, 将进一步增加数据传输过程的复杂性。以上特征将影响计算任务卸载和信息分发过程的传输效率, 制约边缘计算处理和边缘存储内容投递的性能, 给移动边缘智能在车联网中的推广与应用带来新的技术难题和挑战。此外, 边缘网络中的通信、计算和存储资源可以互为补充、相互促进, 这些异构资源间甚至还存在“互换”的可能。例如, 通过协同计算进行交通与通信网络态势预测, 可以大幅减少车联网无线资源的消耗, 缓解车辆高速移动对网络拓扑的影响。在车辆间、车辆与路旁系统间分担复杂的计算任务以及共享存储资源, 可为网联车辆提供更加高效的信息服务。

目前, 网络边缘智能技术已经成为物联网领域的一个研究热点, 并在应用处理、信息投递和资源优化等方面展现了巨大优势。但是, 将边缘智能应用于车联网应用领域的进程才刚刚起步。抓住网络边缘智能化与网联智能交通系统发展的重大机遇, 在边缘智能驱动的车联网体系架构、资源管理及应用开发等方面进行技术创新并发挥引领作用, 将为

我国利用“弯道效应”抢占未来车载互联技术的制高点提供难得的机遇。

针对上述需求,本文就边缘智能驱动车联网的系统架构、资源协同调度及信息安全问题展开研究。首先全面综述了边缘智能技术在车联网领域的国内外研究及应用现状,然后提出了面向智能交通业务需求构建高效车联边缘处理机制所需要解决的核心科学问题,分析了面临的技术挑战并给出了对应的解决思路。

2 国内外研究及应用现状

2.1 基于移动边缘计算的车联应用

针对 MEC 技术在车联网中的应用,国内外学者已开展了广泛研究。文献[1]针对车辆高速移动环境中的车联计算任务卸载问题,设计了基于 SDN 控制的 MEC 架构,提高车联系统的拓展性与灵活性,并利用软件定义控制器简化任务卸载的复杂部署。文献[2-3]提出基于无人机辅助作用的车联边缘计算方案,根据具有计算服务功能的无人机飞行轨迹优化交通导引任务的卸载策略,降低了计算处理时延并减少了车辆行驶能耗。文献[4]考虑任务数据的完整性和任务所属地域的相似性,利用相邻多车辆协同传输,实施分层次数据接入以提高任务卸载过程的数据传输速率。文献[5]则分析了车载应用在云计算与边缘计算两种服务场景中的服务质量指标,提出了云计算资源与边缘计算资源协同的任务卸载策略,并利用博弈论方法实现了任务卸载目标确定与资源调度优化。在应用实施方面,中国香港京信有限公司开发了基于虚拟化移动边缘计算平台的车联网原型系统,该系统可完成低时延车辆监控,并可实现智慧城市的道路安全管理及智能交通导引等功能^[6]。

2.2 基于移动边缘存储的车联信息投递

在基于边缘存储技术的车联信息投递研究中,文献[7]提出了一种十字路口场景下智能车辆节点间的分布式数据缓存机制,并设计内容动态流行度判定算法,改善了缓存过程中的内容重复率、资源利用率和内容投递时延等性能指标。为了保证内容传递的及时性和可靠性,文献[8-9]设计了一种基于优先级的车联内容存储策略,依据信息优先级高低实行内容分发排序,并结合缓存车辆的移动性特征优化数据存储方案,提升了网内缓存内容的命中率。文献[10]研究了车联视频应用中的自适应比特

流存储问题,以全网视频清晰度与回程通信链路性能为变量,采用李雅普诺夫优化方法使系统效用最大化。根据车辆的内容请求,文献[11]利用 RSU 存储多个内容的副本来提升内容访问命中率,并设计了基于交叉熵的动态内容存储算法,有效保证了车联内容的低时延访问。文献[12-13]研究了 5G 车联自组网场景中通过车间协作进行的内容共享与分发,并利用图论机制优化内容存储决策。文献[14]提出基于车辆行驶路线的文件存储机制,根据车辆的当前行驶路径预测短期未来车辆的位置,根据预测结果对车辆请求的内容进行选择性的存储,显著缩短了内容投递时延。文献[15-16]采用 SDN 车联网络模型,研究时延容忍的数据存储问题,根据车辆的移动性和当前路段路况信息构建马尔可夫决策优化数据流的存储方式,提升了系统吞吐率。在边缘存储的工程应用实践中,中国联合网络通信集团有限公司与中兴通讯股份有限公司在 2016 年世界移动通信大会上展示了基于 5G 架构的移动边缘存储解决方案,将内容缓存应用于仓储运输、智能驾驶、交通导引、信息分发等领域。

2.3 边缘计算与存储协同的智能车联网

车联应用性能的提升需要不断整合并利用异构边缘资源,边缘计算与存储协同的智能车联系统正成为研究热点。文献[17]探讨了未来 5G 场景中,智能车辆的低时延、高效率通信需求与 MEC 及存储服务的关联,指出了边缘计算存储协同调度的必要性。文献[18]采用深度增强学习的方式整合车联网中的边缘计算和存储资源,设计多目标优化算法,提升系统运行效率。文献[19]提出基于智能车辆辅助的云端与边缘协同机制,将智能车辆与基站作为资源协同节点,对网络中的计算与存储进行共同调度。文献[20]设计车联网中的主动式内容投递策略,通过将车辆的计算能力与边缘节点的存储能力进行有机结合,实现无线网络内容的高效投递。文献[21]针对全双工车联网中的差异化应用服务需求,在分析高数据率服务和高计算需求服务特性的基础上,对车辆能耗及计算通信等异构资源进行联合优化,提升系统效用。文献[22]结合车辆的移动性特征与车联应用服务的时延要求,通过构建车辆与边缘节点效用的博弈模型,优化边缘计算与存储资源的调度策略。在应用实践中,中国移动通信集团有限公司率先布局移动边缘系统平台,对计算和存储基础设施进一步优化,以提供增强现实、虚拟

现实、超清视频以及移动云等多项车联应用服务。

边缘智能网络与车联网密切相关，为新型车联应用的开发提供了通信、计算、存储等资源的服务支持，被广泛认为是未来智能交通系统发展的重要技术组成部分。虽然国内外已经针对边缘智能在车联网中的应用进行了相关研究，但是边缘服务与交通路网行为特征的智能匹配以及异构资源的深度融合问题尚未被深入探讨，边缘资源调度策略实施过程中的诸多关键问题还有待解决。

3 边缘智能车联系统中的核心科学问题

在将网络边缘智能技术应用于车联网的过程中，其计算处理速度和内容投递效率将受车辆个体行为及网联车系统特征等因素的影响。为了有效提升车联网边缘资源的利用效率与运行性能，需要解决如下4个核心科学问题。

3.1 交通流与边缘网络资源的动态匹配机理

在边缘智能驱动的车联网中，提供边缘计算和存储节点的服务能力通常受制于单台服务设备的计算资源能力及信息存储容量。同时，边缘服务节点大多基于接入网段的蜂窝网络基站或路旁单元（RSU, roadside unit）并利用无线方式进行数据传输，接入节点无线覆盖区域的有限性将进一步约束各边缘节点的服务范围。因此，车联应用服务过程需要不同区域多边缘节点的协同支持。交通路网中车辆的快速移动性将引发网络拓扑的动态改变以及车联应用业务的时空迁移，从而改变对不同路段、不同服务节点群组提供的边缘资源需求。由此可见，网络边缘资源与交通路网状态具有紧密的耦合关系，只有将车联边缘网络的通信、计算和存储资源管理与车辆在路网交通中的行为特征紧密结合，从宏观上实现跨区域、多节点异构边缘资源与智能车辆交通流在时空维度上的动态匹配，才能最大限度地利用车联网资源，达到保障服务质量、提升交通运营效率的目的。考虑城市路网的分布特征及上下游路段交通流的相互关联，在实现边缘网络资源与各路段交通流进行动态匹配的过程中，可充分利用车辆移动的可预测性和交通流的时空相关性，将网络边缘异构资源进行自组融合并随车联业务变化实施随动迁移。

3.2 针对车联应用的边缘异构资源协同融合机理

边缘智能网络虽然能为车联应用提供计算与存储支持，但在严重拥堵的交通路网场景下，仍然

无法承载大规模车辆的海量接入和并行计算卸载，也难以保障大量自动驾驶车辆间的交通信息实时传输需求。研究表明，车联网络中的通信、计算、存储资源可以互为补充、相互促进。例如对数据的计算处理能减少其对通信传输的需求，利用智能车辆的“存储—携带—转发”机制可大幅度降低信道带宽的占用，增加机会网络的传输容量。可见，挖掘边缘网络异构资源间的相互作用机理，研究多资源紧密协同的资源调度与互补机制，将有助于减少车联网无线资源的消耗，缓解车辆高速移动行为对网络拓扑的影响，并且能在车辆间、车路间分担复杂的计算任务，更高效地使用存储资源为车联内容服务。在边缘资源融合的过程中，服务节点资源容量限制、服务区域分布、异构资源在不同车联应用场景中的互换补充效用等因素都将影响并制约边缘网络的业务性能。因此，针对车联应用需求的边缘异构资源协同调度是一个动态复杂的优化问题。

3.3 边缘网络资源调度的驱动式实施机制

车联网中的车辆从属于不同用户个体，并且车联应用大多可独立执行。用户的个人理性和逐利性特征通常促使其追求更强大的应用功能和更迅捷的处理响应，这就会引发更多的资源需求。虽然动态协同的异构资源调度策略可以有效提升边缘网络运营效率，但在实施过程中将受用户逐利性的影响，难以保证车载应用无条件地遵从资源调度指令，从而造成车辆对边缘资源的无序争用与低效耗散。因此，急需提出一种对智能车联实体具有内在驱动能力的边缘网络资源协同管理机制。该机制需要引入车联应用的资源需求、服务质量约束等自有特征以及用户个体在使用边缘资源过程中的获取效用和支付代价等潜在因素，探究决定应用资源需求量的核心驱动要素。基于该核心要素，实现区分智慧车联应用并且优化系统整体性能的边缘资源调度。

3.4 车联网络中边缘资源调度的安全保障机制

车联边缘网络中的应用计算任务卸载以及内容获取都需要在智能车辆与边缘服务器间进行资源的调度与使用。从服务供需的角度来看，边缘资源的配给与使用可视为车联应用与服务节点间的交易行为。如何保障资源交易过程的安全与公平，已成为边缘网络高效运行的必备前提。考虑车联应用与边缘服务节点通常归属于具有不同利益的用户实体，各实体在资源交易过程中均力图使自身效用最大化，因此，急需建立一种满足车联边缘网络

应用需求且能够真实反映交易事实的公平资源调度机制。此外，车联网作为一种具有泛在无线接入能力的开放式物联网，不可避免地会受到恶意节点的信息干扰或数据攻击。恶意节点可能会篡改甚至伪造真实交易记录，破坏正常边缘资源调度进程。因此，在边缘智能网络应用中，既需要针对车联网业务需求的时空分布实施精准资源调度，也需要对边缘资源调度指令、交易记录等敏感信息进行保护与验证。

4 边缘智能车联网的技术挑战及解决思路

4.1 异构资源智能匹配的车联边缘网络架构

在车联网中，通信环境受异构接入方式、无线信道质量、带宽资源状态以及网络拓扑等多种因素影响，对智能车辆节点数据传输行为的调度具有较高的复杂性。另一方面，无线网络基础设施覆盖区域的有限性限制了单台计算或存储边缘设备的服务路段，车辆高速移动将造成其应用在多个服务节点间的动态切换。在切换过程中，需要进行计算任务迁移、内容来源变更等操作，这将进一步加剧边缘资源管理的复杂度并带来额外的资源开销。面对复杂多变的车联网场景，如何针对车联网应用需求实施低开销资源动态调度与匹配是边缘服务面临的

一个重要挑战。

为了应对该挑战，本文提出了一种异构资源智能动态匹配的车联边缘网络系统架构，如图 1 所示。该架构引入资源虚拟化的概念，将数据通信、计算处理、内容存储、信息路由、车联业务调度等抽象为可动态迁移的虚拟化资源。在对车联网应用需求和边缘网络环境进行充分认知的条件下，采用机器学习方法提取需求与边缘资源特征，并利用神经网络实施业务调度、路由选择、资源分配的跨层联合优化决策。

该架构依照车联网边缘功能划分为 3 层，其中，核心层（core level）基于 5G 核心网（NGCN, next generation core network），其主要功能是为车联网用户提供数据连接，对车辆、行人和传感设备的管理以及差异化服务的承载，还包含业务的感知调度功能。

智能决策层（intelligent decision level）包含环境信息处理和智能控制决策功能。在环境信息处理阶段，通过基础设施和车载感知模块如传感器、摄像头、RFID 接收机等，获取无线信道增益、网络拓扑结构、业务负载状态、边缘资源利用率等多种车联网环境信息。在智能控制决策阶段，基于人工智能方法对车联网环境感知数据进行特征提取，构建

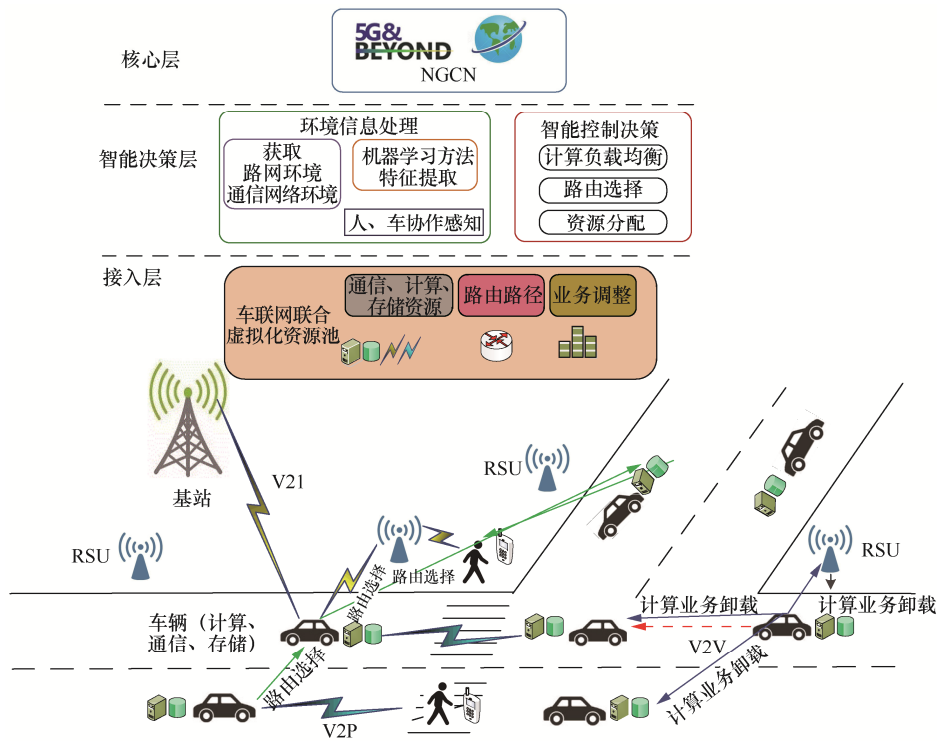


图 1 车联边缘网络系统架构

深度神经网络决策功能实体, 为跨层的多维虚拟化资源管理提供决策。

在靠近智能车辆实体的接入层 (access level) 包含车联网基础设施和接入节点。考虑车联网的应用需求, 接入节点不仅被服务, 还可作为服务的提供者如在交通环境信息处理阶段, 除路旁基础设施外, 车辆也可向网络提供感知数据并利用自身计算能力提供一定的计算服务。在接入层将基础设施和接入节点统一抽象和统一表征, 构建车联网虚拟资源池, 通过智能控制决策实体实现多维虚拟化资源的动态重构。

4.2 基于雾化机制的异构边缘资源融合

多样化的智能交通业务需要充足的通信、计算、存储资源的支撑, 以提供更高的性能和可靠性保证。在车联应用中, 智能车辆对采集信息的存储以及内容信息的获取, 需要与周边车辆及路旁设施进行频繁的数据交互。这些信息的作用范围通常局限于相邻行驶车辆或车与周边路旁单元之间。此外, 为了获得更低的计算处理时延, 车载任务的卸载也通常发生在任务车辆的邻近区域。这种边缘智能行为的局部性特征为资源的小范围优化调度带来了灵活性和便利性。但是, 由于不同区域间甚至不同车辆间可能存在通信、计算和存储能力的差异性, 当某一区域的某种类型资源短缺时, 将影响相关边缘行为的实施且制约车联业务的整体性能。例如当某路段中存在大规模密集车辆行驶与通信接入时, 车联网通信资源将难以保证任务卸载过程严苛的传输时延要求。即使该路段存在大量空闲的计算与存储资源, 也难以得到充分利用。因此, 异构边缘资源在时空维度的不均匀性与其导致的瓶颈效应成为资源协同调度过程中面临的挑战。

针对该挑战, 本文提出雾化边缘资源协同融合机制, 通过将边缘资源在区域间动态调度配置以及异构资源在服务过程中的性能互补, 实现面向车联应用的资源泛在互补。图2给出了雾化边缘资源协同构建的主要模式。资源雾是一种由异构资源根据应用需求动态构成的资源服务虚拟实体, 其组成元素不受限于局部区域, 也不拘泥于特定服务节点。边缘资源雾的构成基于对交通态势、边缘网状态和车辆应用需求的预测, 利用邻近区域间资源的借调合作甚至是不同形式服务节点间资源的耦合协同, 实现针对车联应用的资源自适应供给。在雾资源的调度过程中, 应充分考虑异构资源与同一车联应用

指标达成存在的互补关系, 实现异构边缘资源跨类型融合, 弥补特定资源短缺问题。例如, 针对高实时性通信应用, 可利用计算资源开销替换通信资源需求的策略, 降低智能交通系统对车联网通信资源的依赖度。此外, 车队行驶是一种新的道路交通组织方式, 车队本身具有较强的信息处理和通信能力, 也可以作为一种特殊的雾资源融入雾化车辆网中。

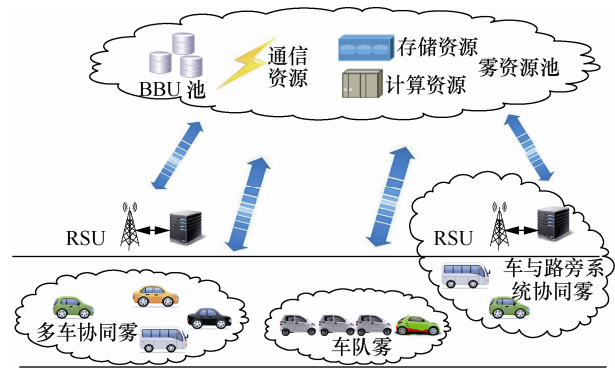


图2 雾化边缘资源协同构建

4.3 基于主动式远程卸载的跨区域边缘资源协同

除了上述利用异构资源间的耦合互补关系实现边缘资源的融合外, 本文还提出了针对车辆移动性特征的跨区域边缘资源协同机制。在智能边缘网络中, 借助边缘服务节点的辅助作用, 虽然可以提供车联应用所需的部分计算资源, 但是单个边缘节点计算能力的有限性, 导致其处理某些复杂的卸载任务时, 仍需花费较长时间。考虑边缘计算服务器通常配置于RSU设备中, 并依靠RSU向车辆提供任务卸载所需的数据传输服务。RSU无线覆盖区域的有限性, 将制约其配备的边缘计算服务器的服务区间。对于车辆密度高且计算任务繁重的部分路段, V2I卸载任务的慢速数据传输以及计算服务器中的任务排队等候, 均会延长任务处理时延。在道路中快速移动的智能车辆, 其卸载任务尚未在边缘服务器中处理完成, 该车辆可能已离开该RSU覆盖路段, 这就需要将大量计算结果远程投递至车辆当前所在路段的RSU节点。对于RSU间采用无线回程方式连接的路网场景, 处理结果的多跳投递将带来较大的通信开销。如何针对边缘服务资源区域分布的不均匀特征并结合车辆的快速移动性, 充分协调与利用不同路段的服务资源以满足车联应用的时延约束, 成为任务卸载机制设计的重要挑战。

为了解决上述问题, 本文提出了一种基于智能预测的主动式车联计算任务卸载方案, 利用V2V

传输的远程任务卸载如图 3 所示。在该方案中, 车辆可以通过多跳 V2V 方式将计算任务预先卸载至前行路段中的某个边缘计算服务器。在车辆向前行驶的过程中, 该服务器同时对任务进行计算处理。当车辆抵达目标服务器所在 RSU 覆盖范围时, 直接从服务器获取计算结果, 从而避免了数据结果在多个 RSU 间的无线转发。这种主动式远程卸载方式有效利用了车辆的高速移动特征, 缓解了不同路段中的通信、计算等边缘资源配置不均的问题, 实现了多区域系统边缘资源的高效协同与利用。在远程卸载的过程中, 车辆需要对任务数据传输时间、任务执行时间和路网交通状态等进行智能预测, 从而判断与车辆行驶位置动态变化所匹配的卸载目标计算服务器。此外, 对于具有大量辅助信息需求的计算任务, 其所需数据需要预先存储于卸载目标区域的边缘缓存服务器中。因此, 目标区域的边缘缓存能力也是设计主动式卸载方案需要考虑的重要因素。

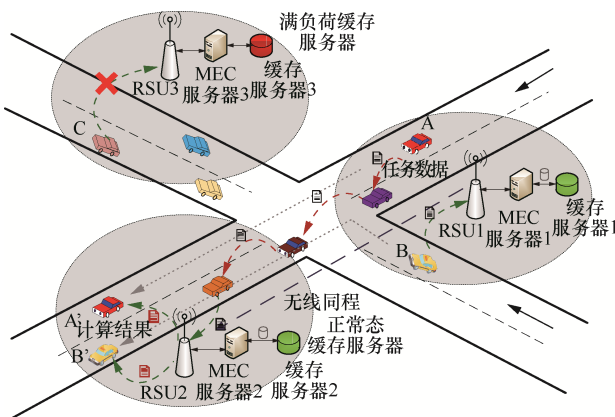


图 3 利用 V2V 传输的远程任务卸载

4.4 基于合同理论的边缘资源激励式调度

在智能交通系统中, 智能车辆所有者及车联应用用户可以独立地选择边缘资源的使用方案。由于用户个体的个人理性, 其方案的选择通常以最大化个体收益为最终目标, 这就与实现系统效用最优的全局性优化思想存在差异, 从而导致边缘资源调度策略难以被有效地实施。利用价格机制为边缘资源的使用定义所需付出的代价, 可以在一定程度上驱动用户的资源使用行为, 但是单纯的全网统一式定价方式不能实现对不同特征用户的不同车载应用需求的有效区分, 且难以提供差异化的资源调度激励。此外, 用户的逐利性还会使其隐瞒自身应用类型并假借其他类型身份获取更大的利益。因此, 边

缘智能在车联网中的应用急需制定一种具有车联应用类型识别能力且能够进行区分激励的边缘资源调度机制。

将边缘资源调度基于合同理论进行设计与实施, 可以有效解决以上问题。合同理论作为微观经济学的一种重要工具, 可以在信息不对称的场景中, 利用对合同条款的优化设置, 促使交易参与者根据其自身的真实类型选择并执行对应合同。通过建立车联应用资源需求与所获效用的对应关系, 对系统应用进行精准类型划分。在此基础上, 对不同应用制定差异化的边缘资源供给及代价合同。遵循合同理论原则, 使得某一类型应用业务不能通过采用另一类型业务合同所定义的资源使用方案获取比遵循本类型合同更高的效用。从而, 激励各应用用户严格遵循系统制定的边缘资源优化调度策略, 实现边缘网络系统总体效用最优。

4.5 基于区块链的边缘网络安全保障

在智能边缘网络中, 计算、存储等服务资源既可能来源于路旁基础设施, 也可能来自于资源富裕的智能车辆。这些资源提供实体可能归属于不同用户。为了激励用户分享自身闲置的资源, 通常采用资源货币化的策略进行资源交易。然而采用博弈论和合同理论的资源定价交易必须依赖于一个受信的集中化应用平台负责交易的安全性, 在这种控制模式下, 存在交易不透明和容易发生单点故障的问题。

区块链技术的出现很好地解决了集中式应用平台单点故障以及去中心化边缘网络用户间的信任问题。区块链的引入将传统的激励机制以计算脚本的形式嵌入区块链中, 从而形成智能合约。当用户有车联应用计算或存储需求时, 可以根据供需双方资源状态自行制定智能合约, 并通过计算、存储等交易格式触发智能合约的自动执行。整个过程不需要人工干预, 提高了交易的可靠性并降低了交易成本。但是对于资源有限的车联边缘设备, 无法直接运用传统区块链中 PoW 共识算法进行资源交易的共识和审计, 同时也无法直接运用 PoS 或 DPoS 等需要全网节点共同参与的共识算法。

针对边缘节点资源受限特征及交通业务应用的时延约束需求, 本文提出基于联盟区块链的整体架构, 利用扩散共识的概念应对车联应用场景的挑战, 基于区块链的边缘资源调度如图 4 所示。通过联盟区块链的方式, 预先选取网络中通信、计算存

储能力较强的大型节点, 对网络中的交易进行打包成块, 可以有效解决智能车辆节点因计算、存储能力不足导致系统性能下降的问题, 同时可以更高效地部署针对车联网场景下独特的共识算法, 使其具有更强的拓展性与灵活性。其中, RSU 和基站等预先认证节点负责对网络中的区块进行打包认证, 智能车辆的计算、存储资源交易通过智能合约来保证资产的自动转移, 整个过程不需要人工干预, 并且以区块方式存储在区块链系统中, 保证了交易本身以及存储内容的不可篡改性。网络共识方式利用扩散共识算法, 对于具有时延约束的交易信息, 采用部分认证节点处理, 降低认证开销与耗时。当网络内全部认证节点通过共识后, 由“奖励币”发放中心将“奖励币”通过智能合约补偿的方式提供给初步共识的认证节点。由于初步认证中“奖励币”的发放由预选节点所垫付, 交易的低时延性得到了保证, 同时也在一定程度上降低了初步共识中认证节点伪造信息的可能性。

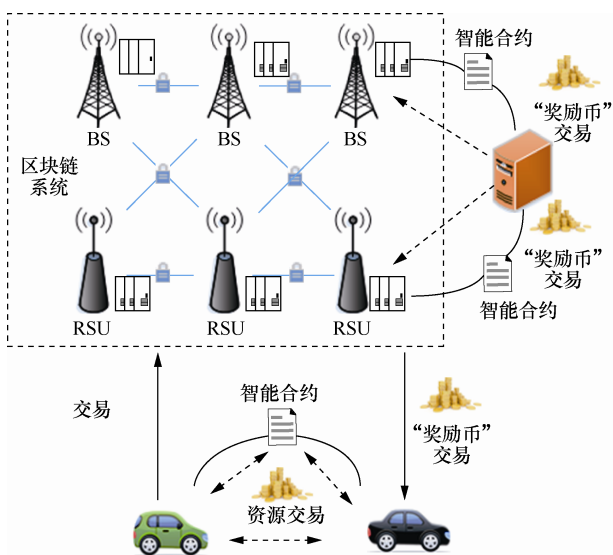


图4 基于区块链的边缘资源调度

5 结束语

本文针对边缘智能技术在车联网中的应用展开研究。在总结移动边缘计算与边缘存储在智能交通系统中的研究应用现状的基础上, 指出了设计高效边缘智能车联网络急需解决的资源智能匹配、异构资源协同融合、调度机制驱动式实施和资源交易安全保障等关键科学问题。分析了解决这些问题过程中面临的技术挑战, 并给出了对应的解决思路。

总之, 边缘智能技术的出现, 促使车联应用从车辆个体向区域局部、从利用单一资源向异构资源融合纵深发展, 为车联网进一步演进提供新机遇。

参考文献:

- [1] HUANG C, CHANG M, DAO D, et al. V2V data offloading for cellular network based on the software defined network (SDN) inside mobile edge computing (MEC) architecture[J]. IEEE Access, 2018(6): 17741-17755.
- [2] CHENG N, XU W, SHI W, et al. Air-ground integrated mobile edge networks: architecture, challenges and opportunities[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(8):26-32.
- [3] ZHANG L, ZHAO Z, WU Q, et al. Energy-aware dynamic resource allocation in UAV assisted mobile edge computing over social Internet of vehicles[J]. IEEE Access, 2018.
- [4] QIAO G, LENG S, ZHANG K, et al. Collaborative task offloading in vehicular edge multi-access networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(8):48-54.
- [5] KLAIMI J, SENOUCI S, MESSOUS M. Theoretical game approach for mobile users resource management in a vehicular fog computing environment[C]//2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), June 25-29, 2018, Limassol, Cyprus. Piscataway: IEEE Press, 2018:452-457.
- [6] 李佐昭, 刘金旭. 移动边缘计算在车联网中的应用[J]. 现代电信科技, 2018, 47(3):37-41.
LI Z Z, LIU J X. Application of mobile edge computing in Internet of vehicles[J]. Modern Science & Technology Telecommunications, 2018, 47(3):37-41.
- [7] 王紫薇. 车联网数据内容分发与缓存技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
WANG Z W. Research on data content distribution and caching technology in vehicle networking[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [8] IRFANULLAH K. 内容中心车联网中基于优先级的内容分发和缓存策略研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
IRFANULLAH K. Research on priority-based content distribution and caching strategy in content-centered vehicle networking[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [9] YU S, LANGAR R, FU X, et al. Computation offloading with data caching enhancement for mobile edge computing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018(99):1.
- [10] GUO Y, YANG Q, YU F R, et al. Cache-enabled adaptive video streaming over vehicular networks: a dynamic approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(6):5445-5459.
- [11] SU Z, HUI Y, XU Q, et al. An edge caching scheme to distribute content in vehicular networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(6):5346-5356.
- [12] LUO G, YUAN Q, ZHOU H, et al. Cooperative vehicular content distribution in edge computing assisted 5G-VANET[J]. China Communications, 2018, 15(7):1-17.
- [13] JIAO J, HONG X, SHI J. Proactive content delivery for vehicles over cellular networks: the fundamental benefits of computing and caching[J]. China Communications, 2018, 15(7):88-97.
- [14] ZHAO Z, GUARDALBEN L, KARIMZADEH M, et al. Mobility

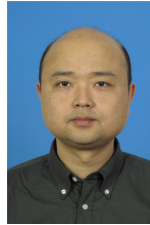
prediction-assisted over-the-top edge prefetching for hierarchical VANET[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018.

- [15] LI M, YU F R, SI P, et al. Software-defined vehicular networks with caching and computing for delay-tolerant data traffic[C]//2018 IEEE International Conference on Communications (ICC), May 20-24, 2018, Kansas City, USA. Piscataway: IEEE Press, 2018:1-6.
- [16] LI M, SI P, ZHANG Y. Delay-tolerant data traffic to software-defined vehicular networks with mobile edge computing in smart city[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10):9073-9086.
- [17] SHAH S A A, AHMED E, IMRAN M, et al. 5G for vehicular communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 111-117.
- [18] HE Y, ZHAO N, YIN H. Integrated networking, caching and computing for connected vehicles: a deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(1): 44-55.
- [19] ZHANG K, LENG S, HE Y, et al. Cooperative content caching in 5G networks with mobile edge computing[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(3):80-87.
- [20] YANG Q, GÜNDÜZ D. Coded caching and content delivery with heterogeneous distortion requirements[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2018, 64(6):4347-4364.
- [21] TAN Z, YU F R, LI X, et al. Virtual resource allocation for heterogeneous services in full duplex-enabled SCNs with mobile edge computing and caching[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(2):1794-1808.
- [22] LE T T, HU R Q. Mobility-aware edge caching and computing in vehicle networks: a deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018:10190-10203.

[作者简介]



张彦, 男, 博士, 挪威奥斯陆大学教授、博士生导师, 全球“高被引科学家”, 主要研究方向为物联网和边缘智能网络。



张科, 男, 博士, 电子科技大学讲师, 主要研究方向为物联网、车联边缘计算与存储。



曹佳钰, 女, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为车联网和移动边缘计算。