

车辆异构网中基于移动边缘计算的任务卸载与资源分配

张海波, 栾秋季, 朱江, 李方伟

(重庆邮电大学移动通信终端与网络控制国家地方联合工程研究中心, 重庆 400065)

摘要: 针对移动边缘计算 (MEC) 提供 IT 服务环境和云计算能力带来的高带宽、低时延优势, 结合 LTE 免授权频谱 (LTE-U) 技术, 研究了车辆异构网络中基于 MEC 的任务卸载模式决策和资源分配问题。考虑链路差异化要求, 即车辆到路边单元 (V2I) 链路的高容量和车辆到车辆 (V2V) 链路的高可靠性, 将用户服务质量 (QoS) 建模为容量与时延的组合形式。首先采用改进的 K-means 算法依据不同的 QoS 对请求车辆进行聚类, 从而确定通信模式, 其次利用基于无竞争期 (CFP) 的 LTE-U, 结合载波聚合 (CA) 技术, 使用分布式 Q-Learning 算法进行信道和功率分配。仿真结果表明, 所提机制可以在保证 V2V 链路可靠性的同时, 使得 V2I 遍历容量最大化。

关键词: 移动边缘计算; LTE-U; 车联网; 任务卸载; 资源分配

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00062

Task offloading and resource allocation in vehicle heterogeneous networks with MEC

ZHANG Haibo, LUAN Qiuji, ZHU Jiang, LI Fangwei

National & Local Joint Engineering Research Center of Mobile Communication Terminal and Network Control,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Based on the advantages of high-bandwidth and low-latency brought by mobile edge computing (MEC), which could provide IT service environment and cloud computing capability, combined with the long-term evolution unlicensed (LTE-U) technology, the task offloading decision and resource allocation issues in vehicle heterogeneous network were studied. Considering the link differentiation requirements, which were the high capacity of vehicle-to-roadside unit (V2I) links and the super reliability of vehicle-to-vehicle (V2V) links, quality of service (QoS) was modeled as the combination of capacity and latency. Firstly, the improved K-means algorithm was used to cluster the request vehicles according to different QoS to determine the communication mode. Secondly, the LTE-U technology based on non-competition period (CFP) which was combined with carrier aggregation (CA) technology, and the distribution Q-Learning algorithm were adopted to allocate the channel and power. The simulation results show that the proposed mechanism can maximize the V2I link traversal capacity while ensuring the reliability of the V2I link.

Key words: mobile edge computing, LTE-U, vehicle network, task offloading, resource allocation

1 引言

车载通信可以提高道路安全和交通效率, 为车辆提供更丰富的信息娱乐体验, 最近得到了学者的

广泛研究^[1-4]。V2V 通信被认为是设备间 (D2D) 通信技术在车联网中的扩展模式^[5], 分为车对基础设施 (V2I) 通信、车对车 (V2V) 通信和基础设施对车 (V2I2V) 通信^[6]。车辆请求任务类型统一

收稿日期: 2018-06-07; 修回日期: 2018-08-10

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划基金资助项目 (No.IRT16R72); 国家自然科学基金资助项目 (No.61771084, No.61601071)

Foundation Items: Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in the University of Ministry of Education of China (No.IRT16R72), The National Natural Science Foundation of China (No. 61771084, No.61601071)

分为商娱类和智能交通类。商娱类任务涉及大量数据交换，需要频繁访问互联网或远程服务器，V2I链路可为该类任务提供高QoS的通信。而智能交通类需要以周期性访问的形式向周围车辆传播安全消息，V2V链路会为其提供较好的支持。

车载单元计算资源和计算能力有限，故可以借助周围的有线或无线泛在网络环境将其计算任务卸载到云服务器。文献[7]联合4G LTE蜂窝网络和车辆自组织网(VANET)提出了基于协作的业务传输算法，评估了车辆可卸载数据的大小，制定了卸载决策，使用V2I和V2V通信来量化最大数据内容。然而，VANET需要更短的等待时间以实现更实时和更可靠的响应。因此，MEC作为一种新的计算范例，通过将MEC服务器部署在路边单元(RSU)侧，为车辆提供高带宽、低时延的高质量服务。文献[8]考虑车辆的移动性，构建V2V和V2I协作通信的任务卸载框架，提出基于时延预测的组合卸载方案，从而降低计算成本、提高任务传输效率。上述文献在任务卸载时，对时延模型的考量大多通过设定阈值来确定，但传统信道模型只是从物理层的角度形成的，很难反映时延的影响。

针对无线资源，IEEE 802.11p标准分配75 MHz频谱供VANET使用，无线网络在给定有限带宽的情况下为车辆提供高质量的服务。考虑通信范围限制，基于车对外界(V2X)通信的LTE(LTE-V)技术被认为是车联网中潜在的通信接入技术^[9]。文献[10]有效结合VANET技术和LTE-V技术，提出了一种基于双资源分配切换机制的新型移动性管理方案，能够很好地支持多个小区环境下的V2X通信。但是考虑LTE网络中的授权频谱资源是有限且昂贵的，3GPP LTE R13版本主张使用Wi-Fi频谱来提高LTE的容量，这被称为非授权频谱(LTE-U)技术^[11]。LTE-U技术可以提供更广泛的覆盖范围和更大的容量，同时允许授权和非授权频谱之间的无缝数据流传输。LTE-U增强了用户体验，提供了更高的数据速率、授权和非授权频段之间的无缝服务连续性、无所不在的移动性以及更高的可靠性。文献[12]研究LTE-U和Wi-Fi共存时的部署与挑战。文献[13]中基于匹配的方法来解决蜂窝用户和非授权用户在LTE-U场景中的共存问题，提出基于载波聚合(CA)的方案，将资源分配框架中的部分移动宽带业务卸载到LTE-U，保证了未授权用户的QoS以及系统的稳定性。上述文献中用户仅通过授权频带与非授权

频带的统筹划分来分配资源，从而改善用户QoS，却很少考虑为用户提供因自身需求不同的差异化服务。

基于以上讨论，本文首先考虑如何为不同车辆提供差异化服务进而确定通信模式；其次，考虑频谱资源的有限性，如何为车辆高效分配资源，保证系统顽健性，本文主要工作如下。

1) 构建一个部署有多个MEC和多个请求车辆的网络场景，其中服务节点(MEC和车辆)都配备有限的无线和计算资源。

2) 引入有效容量的概念^[14]，并将用户QoS要求建模为容量和时延因子，组合这两个物理量为判定标准并采用K-means算法对QoS较低的车载单元进行聚类从而确定任务卸载方案。

3) 为了减轻授权频谱上的同频干扰，并保证与LTE-U上的Wi-Fi用户共存，结合无竞争期(CFP)的LTE-U模式，制定了联合频谱分配、功率控制和频谱共享策略，利用Q-learning算法实现无线资源最优分配，使得V2I链路遍历容量最大化，并保证V2V链路的可靠性。

2 系统模型和问题规划

考虑RSU与Wi-Fi节点共存的V2X异构网络场景，MEC服务器部署于RSU侧，系统模型如图1所示。采用正交频分多址(OFDMA)来支持由RSU控制的授权频带中的车辆多路访问。对于非授权频带，采用载波侦听多址接入和冲突避免(CSMA/CA)机制实现与Wi-Fi共存的模式。车辆密集部署且服从泊松分布，任务类型不同的车辆通信模式不同，这里将

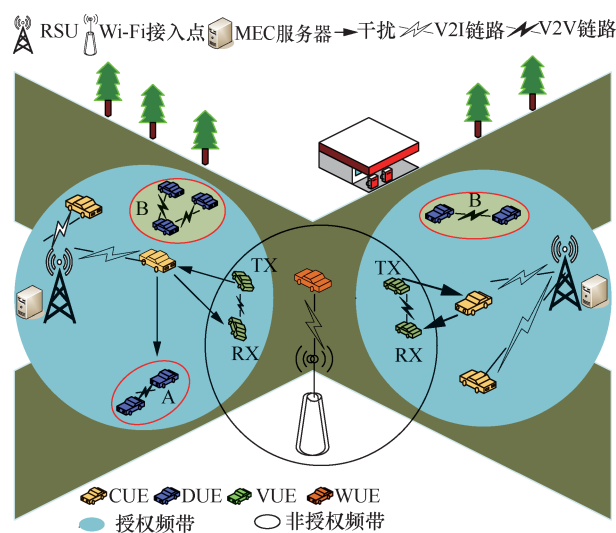


图1 系统模型

车辆分为 4 种类型。授权频带中存在需要高容量 V2I 通信的 M 个车辆 (CUE), 表示为 $\mathbf{C} = \{1, 2, \dots, M\}$, 以及对时延要求高的 K 个 V2V 车辆 (DUE), 用 $\mathbf{D} = \{1, 2, \dots, K\}$ 表示。在 Wi-Fi 节点与 LTE-U 共同部署的通信范围内, 有 U 个 Wi-Fi 用户 (WUE) 将任务卸载到 Wi-Fi 节点, Wi-Fi 用户集合为 $\mathbf{W} = \{1, 2, \dots, U\}$, 在 Wi-Fi 与 RSU 覆盖范围重叠区域的 L 个 V2V 车辆 (VUE) 表示为 $\mathbf{V} = \{1, 2, \dots, L\}$ 。

CUE 因计算能力有限, 所以计算任务 n_i 需要通过 RSU 卸载到 MEC 服务器, 由 MEC 服务器计算后将结果回传, 任务上传需要 RSU 调度正交的资源块 RB, RSU 总的频率资源表示为 $\mathbf{R} = \{1, 2, \dots, F\}$ 。DUE 能有效利用 V2V 链路的可靠性优势, 将任务卸载到周边车辆进行计算。离 CUE 较远的 DUE 复用 CUE 的 RB, 因此与 CUE 存在一定的同层干扰, 如图 1 中 A 处所示。而距离 CUE 较近的 DUE 使用与 CUE 正交的 RB, 如图 1 中 B 处所示。由文献[15]可知, 关于 LTE-U 技术, 接入信道间隙可分为竞争期 (CP) 和静默期 (CFP)。在 CP 期间, VUE 通过 LTE-U 技术与 WUE 竞争非授权频谱。然而, 在 CFP 期间, VUE 可以充分利用基于 LTE-U 技术的非授权频谱。本文主要对基于 CFP 的 LTE-U 模式进行分析, VUE 使用 CA 技术复用授权频谱和 LTE-U, 从而提供系统容量。不难得出, VUE 任务类型对时延有较高的容忍度。

2.1 通信模型

假设本文中的所有车辆都配备单个天线, 为了提高频谱利用率, DUE 复用部分 CUE 上行链路的 RB f , 因此 DUE 与 CUE 之间存在干扰。而 VUE 在基于 CFP 的 LTE-U 技术支持下, 复用授权频带 CUE 的 RB f' , 因此 CUE 与 VUE 之间也存在干扰。因为 RSU 集中调度正交 RB, 所以假设 VUE 与 DUE 之间不存在干扰。

考虑基于瞬时信道统计信息 (CSI) 进行资源管理时无法及时跟踪快速变化的无线信道, 本文考虑缓慢衰落参数和 CSI, 定义 CUE m 与 RSU 之间信道增益 $h_{B,m}$ 如下

$$h_{B,m} = g_{B,m} \beta_{B,m} A L_{B,m}^{-\alpha} \quad (1)$$

其中, $g_{B,m}$ 表示小尺度快速衰落功率参数, 服从指数分布, $\beta_{B,m}$ 是标准偏差为 ζ 的对数正态阴影衰落随机变量, A 是路径损耗常数, $L_{m,B}$ 是第 m 个 CUE

与 RSU 之间的距离, α 为衰减指数。第 k 个 DUE 到 RSU 的信道增益 $h_{B,k}$ 以及从第 m 个 CUE 到第 k 个 DUE 的干扰信道增益 $h_{k,m}^{C,D}$ 的定义表达式与 $h_{B,m}$ 类似。假设信道的大尺度衰落分量在 RSU 处是已知的, 因为它们通常取决于用户的位置^[16]。基站可以预测 V2I 车辆衰落参数, V2V 车辆的衰落参数在接收车辆处检测得到并定期报告给 RSU。

对于资源块 f , CUE m 在 RSU 侧接收信干噪比 (SINR) $\gamma_{m,f}^C$ 表示为

$$\gamma_{m,f}^C = \frac{P_{m,f}^C h_{B,m}}{\sigma^2 + \sum_{k=1}^K \rho_{k,m} P_{k,f}^D h_{k,m}^{C,D}} h_{k,m}^{C,D} \quad (2)$$

其中, $P_{m,f}^C$ 与 $P_{k,f}^D$ 分别表示 CUE m 与 DUE k 的发射功率, σ^2 为噪声功率, $\rho_{k,m} = 1$ 表示第 k 个 DUE 复用第 m 个 CUE 的 RB, 否则为 0。同理, 可类似定义 DUE k 在 RSU 侧接收 SINR $\gamma_{k,f}^D$, 以及非授权频带中 V2V 链路的 VUE l 复用 CUE m' 的资源块 f' 时的接收 SINR $\gamma_{l,f'}^V$ 。

因此, 用 b_0 表示授权频带每个 RB 的带宽, b_1 表示非授权频带每个 RB 的带宽, 则 CUE m 、DUE k 、VUE l 的容量 $R_{m,f}^C$ 、 $R_{k,f}^D$ 、 $R_{l,f'}^V$ 分别表示为

$$R_{m,f}^C = b_0 \log_2(1 + \gamma_{m,f}^C) \quad (3)$$

$$R_{k,f}^D = b_0 \log_2(1 + \gamma_{k,f}^D) \quad (4)$$

$$R_{l,f'}^V = (b_0 + b_1) \log_2(1 + \gamma_{l,f'}^V) \quad (5)$$

本文没有考虑 VUE 与 WUE 之间的干扰, 只考虑 VUE 复用 CUE 资源时两者之间的干扰。

2.2 容量与时延因子联合建模

现有的物理层信道模型无法明确度量 QoS, 因此结合时延因子形成有效容量 (EC) 的链路层信道模型来量化 QoS, 用累积量生成函数表示容量与时延如下^[14]

$$EC(\psi) = \log E \{ e^{-\psi Q(t)} \} \quad (6)$$

其中, ψ 为时延因子, $Q(t) = \int_0^t R(t) dt$ 表示帧持续时间 t 内容量 $R(t)$ 的累积和, 考虑信道系数在 t 内保持不变并且对于每个帧独立变化的情况, 在持续时间 t 内容量为一常量 R 。EC 可表示为

$$EC(\psi) = \log E \{ e^{-\psi t R} \} \quad (7)$$

因为信道是缓慢变化的, 因此定义车辆可容忍的时延满足式(8)

$$\Pr(E(\infty) > E_{\max}) \approx e^{-\psi E_{\max}} \quad (8)$$

其中, E_{\max} 表示车辆可以容忍的最大时延。从式(8)可以看出, ψ 越大表示链路质量越好, 当 $\psi \approx 0$ 时, EC 收敛于遍历容量。

2.3 问题形成

针对不同类型链路的差异化需求, 即大容量的 V2I 链路和高可靠性的 V2V 链路需求, 制定有效策略来实现 V2I 总遍历容量最大化, 同时保证每个 V2V 链路的可靠通信。本文通过控制中断概率来保证 V2V 链路的可靠性, 设置接收 SINR 低于预定阈值概率的门限值。系统的遍历容量是通过快衰落的长期平均值来计算的, 这意味着在慢衰落的时间范围内码字长度跨越几个相干周期^[17]。应该指出, 系统性能与遍历容量的接近程度取决于车载信道的时间变化快慢以及可容忍的时延大小。在给定的时间段内, 更快的变化会导致更多的信道状态, 这使得系统性能更快地接近计算的遍历容量, 因为码字需要遍历大部分 (如果不是全部的话) 信道状态来平均衰落效应。为此, 将车载网络中的无线资源分配问题表述为

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{m \in C} \sum_{k \in D} \sum_{l \in V} \sum_{f \in F} E \left[R_{m,f}^C + R_{k,f}^D + R_{l,f}^V \right] \\ \text{s.t. C1: } & \Pr \{ \gamma_{m,f}^C \leq \gamma_0^C \} \leq p_0 \\ \text{C2: } & \Pr \{ \gamma_{k,f}^D \leq \gamma_0^D \} \leq p_1 \\ \text{C3: } & 0 \leq P_{m,f}^C \leq P_{\max}^C \\ \text{C4: } & 0 \leq P_{k,f}^D \leq P_{\max}^D \\ \text{C5: } & 0 \leq P_{l,f}^V \leq P_{\max}^V \\ \text{C6: } & \sum_{m \in C} \sum_{l \in V} \rho_{m,l} \leq 1, \rho_{m,l} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (9)$$

优化目标第一部分表示 V2I 链路没有复用 RB 的 CUE 容量, 第二部分表示授权频带 DUE 复用 V2I 链路 RB 的容量, 第三部分表示频带重叠区域 D2D 用户即 VUE 复用 V2I 链路 CUE 的 RB 的容量; C1 (C2) 通过控制 CUE (DUE) 的 SINR 低于设定阈值 γ_0^C (γ_0^D) 的中断概率 p_0 (p_1) 来保证车辆的 QoS; C3、C4 和 C5 分别表示 CUE、DUE 和 VUE 的发射功率限定, P_{\max}^C (P_{\max}^D) 表示 V2I (V2V) 链路上行最大发射功率; C6、C7 为通信模式的数学模型, $\rho_{m,l}$ 表示一个资源块至多可以同时被一个 CUE 和一个 VUE 复用, $\rho_{m,k}$ 表示一个资源块至多可以同时被一个 CUE 和一个 DUE 复用。

3 基于 V2X 模式选择的 Q-learning 资源分配

当车辆部署密度增加时, 会有越来越多的 D2D

对复用 CUE 资源, 随之产生强烈的同层干扰。本节将优化问题分解为模式选择和资源分配两部分。首先联合建模容量和时延因子作为 K-means 算法的特征输入进行分簇, 从而确定车辆通信模式; 其次基于分簇结果, 采用 Q-learning 算法作为增强型解决方案, 合理、高效地配置资源实现系统性能最大化。

3.1 基于改进 K-means 算法的通信模式选择

K-means 作为一种无监督的机器学习算法, 广泛应用于聚类问题, 在 RSU 覆盖范围内结合车辆任务请求类型, 依据联合建模后的 QoS 量化因子 EC 进行聚类, 聚类形成 V2I 簇与 V2V 簇。对于 V2V 簇, 建模车辆任务卸载从而为匹配模型选择邻近车辆形成 D2D 对^[18], 下面详细介绍基于改进 K-means 算法的通信模式选择机制。

基于建立的通信模型进行特征提取, 然后将每个请求车辆 EC 归一化后组合成数据集 X 作为均值算法的输入

$$X = U^1 \cup U^2 \cup U^3 \dots \cup U^E, U^i \cap U^j = \emptyset, i \neq j \quad (10)$$

其中, U^j 表示第 j 个簇, E 表示最大簇数。num(U^j) 表示簇 j 中的车辆数目, U^j 的簇心 u^j 可由式(11)得到

$$u^j = \frac{\sum_{x' \in U^j} x'}{\text{num}(U^j)} \quad (11)$$

两车辆基于欧氏距离判断两者之间的特征差

$$\text{tr} = \sqrt{\sum_{d=1}^E (x^{id} - x^{jd})^2} \quad (12)$$

其中, x^{id} 、 x^{jd} 表示 d 维欧氏空间中的两车辆。算法目标是得到最小化的目标函数平方误差和 (SSE), 由式(13)给出

$$\text{SSE} = \sum_{x' \in U^j} \sum_{d=1}^{d=E} (x^{id} - u^{jd})^2 \quad (13)$$

利用 K-means 进行模式选择算法的时间复杂度接近线性, 为 $O(MET)$, 其中 M 表示车辆的数量, E 代表簇的数量, T 表示迭代次数。设置最大迭代次数为 it , 则算法 1 伪代码如下

算法 1 改进的 K-means 算法

输入 请求车辆 QoS 数据集为 $\{EC_1, EC_2, \dots, EC_{\max}\}$, 最大簇为 E

输出 簇集合 $\{U^1, U^2, \dots, U^E\}$, 且

$$U^i = \{x^1, x^2, x^3, \dots\}$$

所有数据集分为一个簇

for $r = 1 : it$

while $\text{num}(U) \leq E$

for $i = 1 : E$

随机选择 u^i 作为初始簇心

while u^i

根据式(12)计算从车辆 j 到 u^i

之间的 tr , 并划分 j 到 tr 最短的

簇, 重新计算每个簇的簇心

end while

根据式(13)计算 E 个簇两两之间的

SSE

end for

选择最小的 SSE 作为划分的簇

end while

end for

3.2 基于分布式无状态 Q-learning 的资源分配

基于用户 QoS 的分簇结果, 提出频谱和功率分配方案以改善车载通信性能。同时考虑支持 D2D 车载网络的独特性, 所提出的方案仅依赖于缓慢变化的大规模信道参数, 并且仅需要每隔几百毫秒更新一次, 从而与在车辆网络中直接应用传统的资源分配方案相比, 显著降低了信令开销。借助 Q-learning 算法来实现最优资源调度, 算法模型由以下参数构成: $\mathbf{S} = \{s_1, s_2, s_3, \dots\}$ 表示个体状态集合; 行为集合为 $\mathbf{A} = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$; Q 函数 $Q(s, a)$ 矩阵中元素代表状态与行为一一对应的值; 折扣因子 θ 反映未来回报相对当前回报的重要性且满足 $0 < \theta < 1$; 学习速率 δ ($0 < \delta < 1$) 定义为当前学习知识对先前学习知识的影响; 策略 π ; 回报函数 $r(s, a)$ 。每个个体与环境交互得到 $s \in \mathbf{S}$, 按照策略 π 选择行为 $a \in \mathbf{A}$ 并继续与环境交互, 随之更新 $s' \in \mathbf{S}$, 同时产生回报函数 $r(s, a)$ 反馈给学习个体, 个体据此更新 π 和 Q 函数, 经过多次学习后收敛, 个体可以找到最优策略 π^* 使优化目标达到最大。预期累计奖励函数 $J^\pi(s, a)$ 由式(14)给出

$$J^\pi(s) = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left(\sum_{t=1}^N r_t^\pi(s, a) \right) \quad (14)$$

其中, $r_t^\pi(s, a)$ 表示 t 时刻采用策略 π 得到的回报, 最优策略 $\pi^*(s) = \arg \max J(s, \pi)$ 。假设在 s_t 状态下采取行为 a_t 后, 状态变为 s_{t+1} , 则依据贝叶斯最优准则, 矩阵 $Q(s, a)$ 可更新如下

$$Q^*(s, a) = E \{ r_{t+1} + \theta \max_{a'} Q^*(s_{t+1}, a') | s_t = s, a_t = a \} \quad (15)$$

根据 t 时刻状态对 $\{s_t, a_t\}$ 得到的回报函数 r_t , 预测 $t+1$ 时刻状态 s_{t+1} , 并更新 Q 矩阵如式(16)所示

$$Q(s_t, a_t) = (1 - \delta)Q(s_t, a_t) + \delta \left[r(s_t, a_t) + \theta \max_{a_{t+1}} Q(s_{t+1}, a_{t+1}) \right] \quad (16)$$

在这里讨论一个分布式场景, 每个车辆无从得知其他车辆的信息, 系统经过学习来更新行为和回报函数以使性能资源配置最佳。为了在兼顾效率的同时遍历所有 (s, a) , 在迭代过程中本文采用 ε 贪婪算法来选择行为。用信道与功率矩阵表示每个车辆 i 的行为, 即 $a_i = [a_{i, \text{channel}}, a_{i, \text{power}}]$, 定义行为函数

$$a_i = \begin{cases} \arg \max_{i=1,2,\dots,L,1} Q^*(a_i), 1 - \varepsilon \\ a_i : u(1, I), \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可知, 车辆以 $1 - \varepsilon$ 的概率选择使 Q 矩阵值最大的行为, 而选择其他行为时服从均匀分布。将每次车辆选择的行为索引为状态矩阵, 以此得出 t 时刻的回报函数 $r_{i,t}$, 将 $r_{i,t}$ 定义为车辆当前吞吐量与最大吞吐量比值

$$r_{i,t} = \frac{R_{i,t}}{R_{i,t}^*} \quad (18)$$

其中, $R_{i,t}^* = B \log_2(1 + \text{SNR}_i)$ 是车辆发射功率为 P_{\max} 且无干扰状态下的吞吐量。分布式无状态 Q 学习详细步骤如算法 2 所述, 算法 2 工作在物理层, 允许操作当前的 MAC 层协议, 在 IEEE 802.11 中, 信道访问由 CSMA/CA 机制来控制, 因此算法 2 可以促进物理层资源复用, 提高系统性能。

算法 2: 分布式无状态 Q-learning 算法

输入: 可用信道 channel , 可用功率 power , SINR, $\{U^1, U^2, \dots, U^E\}$, $U^i = \{x^1, x^2, x^3, \dots, x^G\}$

输出: 每个车辆吞吐量 $R_{i,t}$

初始化: $t = 1$; 折扣因子 θ ; 学习率 δ ; 探索速率 ε ; $Q = 0$; 最大迭代次数 $\text{max_convergence_time}$

for $e = 1 : 1 : E$

while $t < \text{max_convergence_time} + 1$

顺序排列每一个车辆。

for $g = 1 : 1 : G$

根据式 (17) 为车辆 x^g 选择行为 $a_g = [a_{g, \text{channel}},$

$a_{g, \text{power}}]$, 更新状态矩阵 S

$$\text{更新 } \varepsilon = \frac{\varepsilon}{\sqrt{t}}$$

根据式(18)计算回报函数

根据式(16)更新 Q 矩阵

end for

计算车辆 x^s 的遍历吞吐量

$t = t + 1$

end while

end for

在基于分布式无状态 Q-learning 的资源分配策略中, 假设每个车辆按顺序选择行为, 以便在每次学习迭代时, 以有序的方式进行资源分配, 因此每次迭代时首先选择行为的顺序, 并在其开始时随机选择, 车辆根据初始化参数决定当前所有可能行为以及下一刻行为 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$, 得出状态矩阵 S , 更新 $Q(s, a)$ 矩阵。基于此, 车辆以 $1 - \varepsilon$ 的概率在所有可能状态中选择使 Q 值达到最大的行为, 计算即刻回报函数, 更新探索速率 ε , 继续执行下一次学习, 直至收敛或达到最大收敛次数。

3.3 Q-learning 收敛性分析

由式(17)变形可知: $Q_{t+1} = (1 - \delta)Q_t + \delta[p_t Q_t]$, p_t 为状态转移函数。如果满足

1) 回报函数有最大值, 即 $|r(s, a)| \leq r_{\max}$;

2) $0 \leq \delta < 1, \sum_{t=0}^{\infty} \delta = \infty, \sum_{t=0}^{\infty} \delta^2 < \infty$ 。假设 $Q_{t+1} = (1 - \delta)Q(t) + \delta[p_t Q^*]$ 产生的序列 $\{Q_t\}$, 当 $t \rightarrow \infty$ 时以概率 1 收敛到 Q^* , 证明过程如下。

定义 $p_t Q_t(s, a) = r(s, a) + \theta \max Q_t(s', a')$, 结合式(14), 定义 $Q_t^* = r(s, a) + \theta \sum_{s' \in S} p_t J_i(s', \pi^*)$, 有 $\|p_t Q_t - p_t Q_t^*\| \leq \max_{s \in S} |p_t Q_t - p_t Q_t^*|$, 而 $p_t Q_t^* = r(s, a) + \theta \max Q_t^*(s', a')$, 则存在

$$\begin{aligned} & |p_t Q(s, a) - p_t Q_t^*(s, a)| \\ &= \theta |\max Q_t(s', a') - \max Q_t^*(s', a')| \\ &\leq \theta |Q(s', a) - Q_t^*(s', a)| \end{aligned} \quad (19)$$

已知

$$\begin{aligned} Q_t^* &= r(s, a) + \theta \sum_{s' \in S} p_t J_i(s', \pi^*) \\ &= r(s, a) + \theta E\{r(J(s', \pi^*))\} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} E\{p_t Q_t^*(s, a)\} &= E\{r(s, a) + \theta \max Q_t^*(s', a')\} \\ &= r(s, a) + \theta E\{\max Q_t^*(s', a')\} \end{aligned} \quad (21)$$

因为

$$J^\pi(s) = \lim_{N \rightarrow \infty} E\left(\sum_{t=1}^N r_t^\pi(s, a)\right) \quad (22)$$

所以

$$Q_t^* \approx E\{p_t Q_t^*\} \quad (23)$$

因此, $\{Q_t\}$ 收敛到 Q^* , $\forall s \in S, a \in A$ 成立。

4 仿真分析

在本节中, 通过 MATLAB 仿真平台验证所提资源分配机制在基于 MEC 的车载网络中的高效性能。遵循 3GPP TR 36.885 中描述的公路参数设置并按照 MEC 白皮书相关规定构建系统模型。其中, RSU 部署于公路侧, 通信半径为 250 m, MEC 服务器部署于 RSU 侧, 并为车辆提供服务。随机生成车辆数目和位置, 分簇成若干个 V2V 链路和 D2D 对, 其中 D2D 对总是在相邻车辆之间形成, 具体仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	值
最大发射功率 P_{\max}^C / P_{\max}^V	24 dBm/17 dBm
系统带宽	10 Mbit/s
载波频率	2 GHz
阴影衰落标准差 V2I/V2V	8 dB/4 dB
路径损耗 V2I	$128.1 + 37.6 \log d$
路径损耗 V2V	Los in winner + B1
D2D 用户 SINR 门限 γ_0^C	5 dB
噪声功率 σ^2	-100 dBm
V2V 链路可靠性	0.999 9
中断概率 p_0 / p_1	0.1/0.1

图 2 显示通过 K-means 算法决定哪些车辆将任务通过 RSU 卸载到 MEC 服务器, 哪些车辆通过 V2V 链路卸载任务到临近车辆。从图 2 可知, 距离 RSU 近的车辆 (CUE) 因容量需求从而选择 V2I 通信方式, 部分车辆 (DUE) 因对时延要求相比容量要求较高, 因此选择 V2V 通信方式, DUE1 与 DUE2 复用不同 CUE 资源, 两者之间不存在干扰。而距离 RSU 较远车辆 (VUE) 为保证通信质量, 通过 RSU 集中调度, 在授权频带与非授权频带共存技术支持下感知并同时复用两种无线资源。

图 3 评估了学习速率 δ 、折扣因子 θ 、探索速率 ε 三者对系统遍历容量的影响。运行 10 000 次迭代, 并将每次迭代重复 100 次取平均结果。图 3 上方虚线表示网络最优遍历容量(无干扰情况下)。从图 3 可知, 当 $\theta=0.95$ 、 $\delta=1$ 、 $\varepsilon=0.9$ 时, 网络性能最好, 意味着为实现性能最优, 则必须考虑给定动作的直接回报($\delta=1$), 而不是以前的信息。 $\theta=0.95$ 表明最佳行动与当前行动之间要有足够的差额, 另外, 当 $\theta \approx \delta$ 并且 $\varepsilon > 0.5$ 时有较好的系统性能。

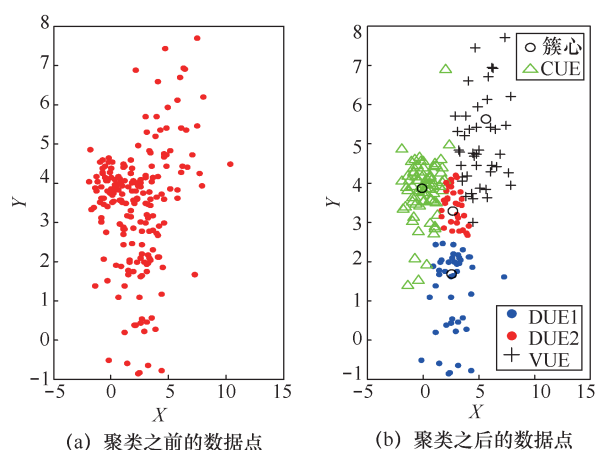


图 2 基于 K-means 模式选择

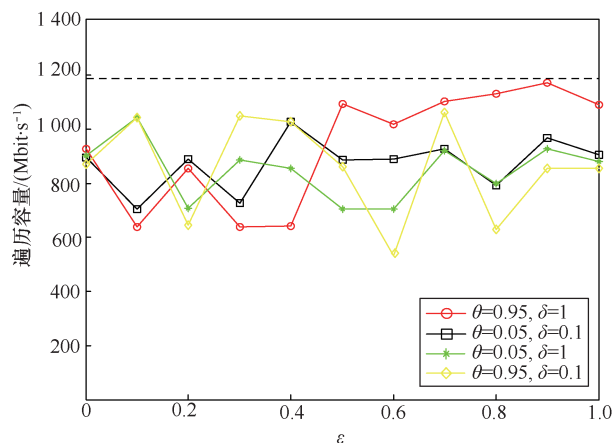


图 3 参数 δ 、 θ 、 ε 对网络性能影响

图 4 将本文所提分布式 Q-learning (QLRA) 算法与随机资源分配算法 (RRA)^[19]、穷举资源分配算法 (EARA) 进行性能比较。EARA 算法通过牺牲运行时间去遍历所有情况找到最优的分配解, 因此在每次迭代中收敛到几乎最优。QLRA 算法可在车辆密集部署无线网络中改善资源复用机制, 通过利用最有益的分配行为来提高性能, 随着迭代次数的增加接近并收敛到最优。而 RRA 算法随机分配资源, 因此存在干扰, 从而导致性能最差。

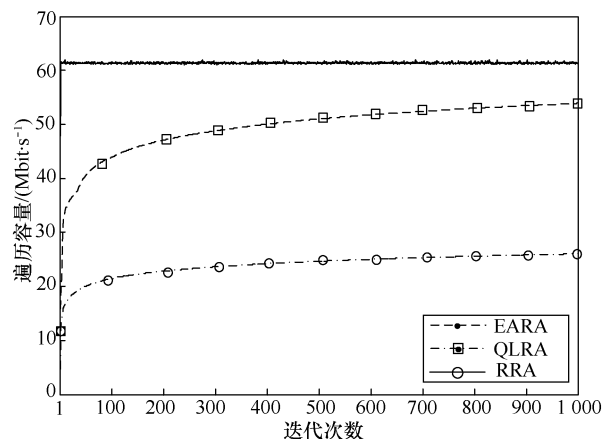


图 4 迭代次数与遍历容量关系

假设某时刻有 T 个车辆位于 LTE 与 LTE-U 技术重合区域, 定义 VUE 在基于 CFP 的 LTE-U 模式下运行, 运行比例为 β , 即有 βT 个车辆基于 CA 技术复用两种无线资源, 有 $(1-\beta)T$ 个车辆运行于 CP 的 LTE-U 模式下。图 5 表明, 当 β 固定时, 由于复用频谱造成的同频干扰, 总和速率随着车辆数量的增加而减少。当 β 从 0.2 增加到 0.4 时, 性能大幅度增加, 因为基于 CFP 的 LTE-U 模式中存在更多的 VUE 以实现更高的吞吐量。RRA 没有有效的资源调度, 因此性能最差。所提 QLRA 算法不仅有较优的性能, 而且与 EARA 相比, 具有更低的计算复杂度且没有显著的性能损失。

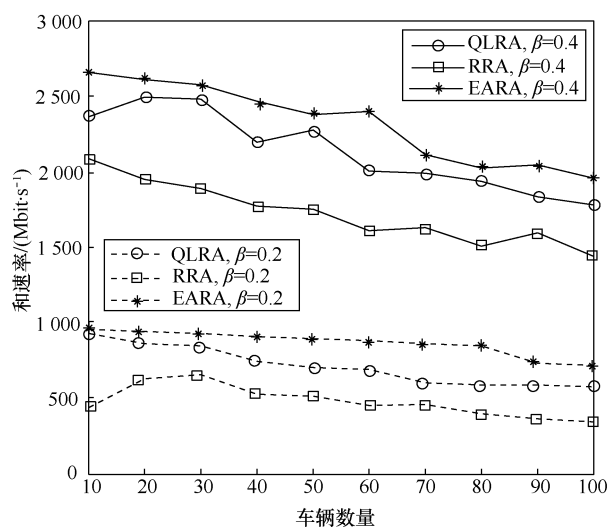


图 5 不同 β 下车辆数目与系统性能关系

5 结束语

本文在 MEC 有效部署的车辆异构网络下, 研究了基于分簇的 V2X 任务卸载和资源分配问题。

首先建模 QoS 要求为容量和时延, 采用 K-means 分簇确定卸载决策; 然后在基于 CFP 的 LTE-U 模式下, 运用分布式无状态 Q-learning 算法学习当前无线环境信息, 实现资源高效分配, 在保证 V2V 链路 QoS 的同时, 最大化 V2I 遍历容量。仿真结果显示, 所提出的资源分配机制能够进一步优化系统性能、提高服务质量。

参考文献:

- [1] ARANITI G, CAMPOLO C, CONDOLUCI M, et al. LTE for vehicular networking: a survey[J]. Communications Magazine IEEE, 2013, 51(5):148-157.
- [2] KARAGIANNIS G, ALTINTAS O, EKICI E, et al. Vehicular networking: a survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(4):584-616.
- [3] CHENG H T, SHAN H, ZHUANG W. Infotainment and road safety service support in vehicular networking: from a communication perspective[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2011, 25(6):2020-2038.
- [4] PAPADIMITRATOS P, ARNAUD L F, EVENSEN K, et al. Vehicular communication systems: enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation[J]. Communications Magazine IEEE, 2012, 47(11):84-95.
- [5] WANG L, WU H. Fast pairing of Device-to-Device link underlay for spectrum sharing with cellular users[J]. Communications Letters IEEE, 2014, 18(10):1803-1806.
- [6] HUANG C M, CHIANG M S, DAO D T, 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(99):17741-17755.
- [7] EI M Z G, LABIOD H, TABBANE N, et al. VANET inherent capacity for offloading wireless cellular infrastructure: an analytical study[C]//International Conference on New Technologies, Mobility and Security. 2014:1-5.
- [8] ZHANG K, MAO Y, LENG S, et al. Predictive offloading in cloud-driven vehicles: using mobile-edge computing for a promising network paradigm[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2017, PP(99):1-1.
- [9] 3GPP TR 22.885 v1.0.0. Study on LTE support for V2X services (release 14) [S]. 2015.
- [10] YE C, WANG P, WANG C, et al. Mobility management for LTE-based heterogeneous vehicular network in V2X scenario[C]//IEEE International Conference on Computer and Communications. IEEE, 2017: 2203-2207.
- [11] 3GPP-TSG-RAN-Meeting65. Study on licensed assisted access using LTE[S]. 2014.
- [12] AL-DULAIMI A, AL-RUBAYE S, NI Q, et al. 5G communications race: pursuit of more capacity triggers LTE in unlicensed band[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, 10(1):43-51.
- [13] GU Y, ZHANG Y, CAI L X, et al. Exploiting student-project allocation matching for spectrum sharing in LTE-unlicensed[C]//IEEE Global Communications Conference. IEEE, 2015:1-6.
- [14] WU D, NEGI R. Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(4):630-643.
- [15] CHEN Q, YU G, DING Z. Optimizing unlicensed spectrum sharing for LTE-U and Wi-Fi network coexistence[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(10):2562-2574.
- [16] SUN W, STRÖM E G, BRÄNNSTRÖM F, et al. Radio resource management for D2D-Based V2V communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8):6636-6650.
- [17] TSE D, VISWANATH P. Fundamentals of wireless communication[M]. England: Cambridge University Press, 2009.
- [18] WU D, ZHOU L, CAI Y, et al. Physical-social-aware D2D content sharing networks: a provider-demonder matching game[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, PP(99):1-1.
- [19] CHEN M, HUA Y, GU X, et al. A self-organizing resource allocation strategy based on Q-learning approach in ultra-dense networks[C]//IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content. IEEE, 2016:155-160.

[作者简介]



张海波 (1979-), 男, 博士, 重庆邮电大学副教授、硕士生导师、移动通信终端与网络控制国家地方联合工程研究中心成员, 主要研究方向为车联网及移动边缘计算。



栾秋季 (1995-), 女, 重庆邮电大学硕士生、移动通信终端与网络控制国家地方联合工程研究中心成员, 主要研究方向为车联网资源分配。



朱江 (1977-), 男, 博士, 重庆邮电大学教授、硕士生导师、移动通信终端与网络控制国家地方联合工程研究中心成员, 主要研究方向为移动边缘计算。



李方伟 (1960-), 男, 博士, 重庆邮电大学教授、博士生导师、移动通信终端与网络控制国家地方联合工程研究中心主任, 主要研究方向为移动通信传输理论与安全技术。