

基于多重指标拍卖机制的车联网任务卸载策略^①



韩政珂, 王 辉, 彭 鑫, 徐瑞任, 谢文武

(湖南理工学院 信息科学与工程学院, 岳阳 414006)

通信作者: 彭 鑫, E-mail: pengxin@hnist.edu.cn

摘 要: 在 5G 移动边缘计算 (MEC) 的车联网场景中, 针对车辆任务卸载目标的选择问题, 设计了一种基于任务优先级的服务器选择方案. 综合考虑时间、能耗、成本等因素对卸载位置选择的影响, 提出了基于多重指标拍卖博弈的解决方法. 通过多重指标拍卖机制, 选择最优的 MEC 服务器为车辆提供任务卸载服务, 实现车辆与 RSU 协作的贝叶斯纳什均衡. 仿真结果表明, 该方案能在保障车辆任务卸载时间和能耗的约束条件下, 降低任务卸载的总费用, 满足多个性能指标.

关键词: 移动边缘计算; 多重指标拍卖; 任务卸载; 纳什均衡; 车联网

引用格式: 韩政珂, 王辉, 彭鑫, 徐瑞任, 谢文武. 基于多重指标拍卖机制的车联网任务卸载策略. 计算机系统应用, 2022, 31(8): 17-28. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/8634.html>

Task Offloading Strategy for Internet of Vehicles Based on Multi-index Auction Mechanism

HAN Zheng-Ke, WANG Hui, PENG Xin, XU Rui-Ren, XIE Wen-Wu

(School of Information Science and Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China)

Abstract: In the Internet of Vehicles (IoV) scenario of 5G mobile edge computing (MEC), a server selection scheme based on task priority is designed for the selection of vehicle task offloading targets. Considering the influence of time, energy consumption, costs, and other factors on the choice of offloading locations, a solution based on the multi-index auction game is proposed. Through the multi-index auction mechanism, the optimal MEC server is selected to provide task offloading services for vehicles, which realizes the Bayesian Nash equilibrium of the cooperation between vehicles and RSU. Simulations show that this scheme can reduce the total cost of task offloading and meet multiple performance indicators under the constraints of guaranteeing vehicle task offloading time and energy consumption.

Key words: mobile edge computing (MEC); multi-index auctions; task offloading; Nash equilibrium; Internet of Vehicles (IoV)

1 引言

近年来, 随着硬件设施的日益完善, 硬件与软件的结合预示着互联网+时代的到来. 智能产品不断推陈出新, 万物互联逐渐成为可能. 随着物联网技术与交通领域相结合, 车联网逐渐进入人们的视野. 车联网通过现代信息技术, 实现车辆与其他产品设施的互联, 实现行车监控、智能道路规划、安全控制、自动驾驶等. 车联网不断改进城市交通体系, 造就智慧城市.

在车联网中, 对于 RSU 覆盖范围内的车辆, 车辆发送的内容和时间点都是离散的. 车辆的内容请求可以卸载至 RSU 或者 5G 基站中的 MEC 服务器进行计算, RSU 或 5G 基站在计算完毕后将内容结果下发给车辆, 同时车辆也可从周围车辆直接获取内容请求结果. 因此, 车辆可以动态选择任务卸载目标, 而非某一固定目标^[1-3]. 在选择任务卸载目标时, 不可避免地出现一些问题. 例如, 当车辆未做出最优选择时, 花费

^① 基金项目: 湖南省教育科学十三五规划课题 (XJK17BXX004)

收稿时间: 2021-11-11; 修改时间: 2021-12-13; 采用时间: 2021-12-21; csa 在线出版时间: 2022-06-28

成本过多,时间损耗更多。

根据 802.11p 的通信协议,RSU 对于车辆的内容请求是免费的,但 RSU 最多只能同时与 6 台车辆同时连接^[4-6]。当 RSU 已连接 6 台车辆时,其余车辆与当前 RSU 通信需要先等待已连接车辆完成通信再进行任务请求。本文考虑了超时损失,在车辆排队等待响应 RSU 请求时,车辆可以针对自身不同的内容请求,对 RSU 给予额外报酬来竞争信道。车辆也可通过多跳的方式与 5G 基站或前后的 RSU 进行间接通信。5G 基站计算能力相对于 RSU 更强,但与 RSU 相比需要收取任务计算的费用。

随着生活水平的提高,智能汽车的数目也急剧增加,在基于云计算的智能交通系统中,车载网络成为其关键组成部分^[7]。在车载网络中,面部识别、自动驾驶等应用程序需要低延时的服务,但是对于资源有限车辆的应用的时延问题上仍存在挑战^[8]。MEC 能够应对挑战,并创造出一个高性能、低时延的通信环境。

文献 [9-13] 分别研究单 MEC 与多 MEC 系统时延与能耗之间的平衡。由于车载网络中车辆是运动的,静态的场景不适合动态车载网络的优化分析。文献 [14-19] 分别侧重于能量消耗与任务时延的研究。文献 [14] 将任务统计并划分为本地任务与服务器任务,以最大程度减少能耗。文献 [16] 中提出了一种自适应的任务卸载策略,从而降低移动设备的能耗。文献 [17] 采用贪婪算法最小化任务卸载时延的动态卸载策略。文献 [18] 因对缓存有限的情况,最小化任务计算延迟。

为了提高车载网络的性能,移动边缘计算被合并至车辆网络的车载边缘网络。车载边缘网络能够很好地满足车辆延迟问题要求。文献 [20,21] 研究主要集中在车载边缘网络中的任务卸载时延方面。这些文献通过研究车载边缘网络中的移动性意识与激励从而优化卸载时延,但是忽视了车辆与任务卸载服务器之间来回传输与服务器的计算时延。文献 [22] 提出了一种时间空间混合证书非线性规划方案来最小化时延问题。他们将车载边缘网络系统中的任务卸载到车载边缘网络服务器,通过动态规划算法与决策树算法来解决时延问题。文献 [4] 基于 802.11p 的车载雾计算系统的任务卸载方案提出了一种半马尔科夫决策过程与迭代算法的任务卸载方案,最大化系统收益。文献 [23] 针对车载计算系统中的任务卸载时延提出了一种基于线性规划与二级制粒子群优化的方案来优化特定任务的卸载

时延。文献 [24] 研究了 5G 环境下车辆的计算卸载问题,在保证计算能力和服务时延的基础上,提出了一种基于人工鱼群的启发式算法,解决系统所用实体的能耗最小化问题。但其在为考虑车辆不同计算任务的情况。

在早前研究中主要研究集中于能耗、时延、任务卸载的调度等某一方面,较少综合考虑多方面指标。本文在研究如何选择最优的任务卸载目标时,产生了以下问题。

(1) 任务卸载指标优先选择。不同的内容请求,其重要性差异较大。对于一些关乎生命安全的任务请求,选择顺序是无比重要的,则其必先考虑时间因素。而对于音乐、新闻等娱乐类内容请求,其对时间要求相对较松,故应该优先考虑成本因素。

(2) 任务卸载竞争信道时的出价选择。对于 RSU 已连接 6 台车辆的情况,车辆为了竞争即将空闲的通信信道,会通过给予 RSU 报酬的形式,提高自身的竞争排名。在多重指标拍卖的过程中,需要利用最优出价来提高自身顺位。

针对上述问题,本文提出了一种基于多重指标的任务卸载请求目标的选择方案。该方案综合考虑了任务卸载时间、通信成本、任务卸载能耗等多重指标。在保障车辆任务卸载时间和能耗的约束条件下,本方案可以降低任务卸载的总费用,并满足多重性能指标。

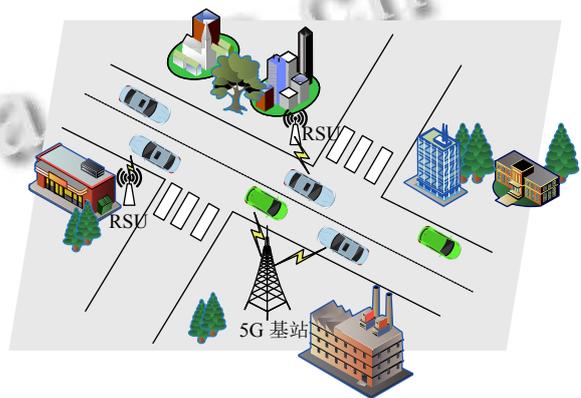


图1 车辆内容交互图

2 系统模型

本文在不同任务的卸载优先指标的基础上,在车辆将任务卸载至 RSU 时,通过多重指标拍卖方案,实现全局统筹最优化。下面分别从网络模型、交通模型、通信模型和效用模型 4 个层面进行描述。

2.1 网络模型

在车联网中, 车辆发送内容请求时, 可以通过多种方式向周围车辆、当前 RSU、前后 RSU 或 5G 基站发送内容请求, 然后接受计算完毕的内容. 图 1 展示了车辆内容交互图.

(1) 车辆相关参数. 当车辆在 RSU 的覆盖范围内时, 该区域内的车辆可以在任意地方向 5G 基站和该 RSU 发送内容请求服务. 网络中的所有车辆的集合表示为 $N = \{1, 2, 3, \dots, N\}$, N 表示网络中车辆总数. 对于网络中车辆可能发送的请求内容 q_i , 按照内容的优先级定义集合为 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$, n 越大代表优先级越高, 请求内容 q_i 的大小为 S_{q_i} . 一般而言, 内容请求按照其优先级的访问次数遵循 80/20 原则, 即 20% 的内容, 会占有 80% 的访问量. 在车联网中, 车辆内容请求也是符合近似 zipf 分布^[25-27]. 车辆请求内容 q_i 的概率如式 (1):

$$p_{q_i} = \left(\sum_{l=1}^n \frac{1}{l^\varpi} \right)^{-1} / \chi_{q_i}^\varpi \quad (1)$$

其中, ϖ 为分布参数, χ_{q_i} 为内容 q_i 的请求频率排名.

对于不同优先级的内容 q_i , 其时间限制也不同. 访问概率越高的内容, 优先级较低, 其要求完成的时间限制也会相对较长. 本文对于内容 q_i 的计算完成的时间限制与单位时间的超时损失如式 (2) 和式 (3) 所示:

$$t_{q_i} = \alpha p_{q_i} \quad (2)$$

$$\xi_{q_i} = \frac{\beta}{p_{q_i}} \quad (3)$$

其中, α, β 为比例系数.

对于内容 q_i 的计算完成限制时间 t_{q_i} 而言, 根据不同的 t_{q_i} 可知其优先级也不同, 则车辆考虑的侧重点也会不同, 因此可根据分隔节点将问题分解成最小化时延和最小化成本两个子问题, 表示如式 (4) 所示:

$$g = \begin{cases} \min t, & t_{q_i} > t' \\ \min u, & t_{q_i} < t' \end{cases} \quad (4)$$

其中, t 和 u 分别表示发送任务卸载请求到任务接受完毕所用时间与所用成本. 当 $t_{q_i} > t'$, 车辆优先考虑成本, 反之车辆优先考虑时间, 故可以把时间 t 与成本 u 分别计算. 在下文会对成本与时延有详细的描述.

对于一个 CPU 周期而言, 能够处理的数据量而言是固定, 因而对于内容 q_i 而言, 其所需的 CPU 周期数 c_{q_i} 与内容 q_i 的大小 S_{q_i} 成正比, 故 c_{q_i} 如式 (5) 所示:

$$c_{q_i} = \lambda S_{q_i} \quad (5)$$

车辆与车辆间的传输速率如式 (6) 所示:

$$r_{i,i'} = w_1 \log_2 \left(1 + \frac{p_{i,i'} g_{i,i'}}{I_{i,i'} + \sigma^2} \right) \quad (6)$$

其中, w_1 为车辆 i 与车辆 i' 之间的带宽, $p_{i,i'}$ 为车辆 i 与车辆 i' 之间的信道传输功率, $g_{i,i'}$ 为车辆 i 与车辆 i' 之间的信道增益, $I_{i,i'}$ 为车辆 i 与车辆 i' 之间的信道干扰, σ^2 为噪声功率.

(2) RSU 相关参数. 网络中的 RSU 的集合表示为 $J = \{1, 2, 3, \dots, J\}$, J 表示网络中 RSU 的总个数. 第 j 个 RSU 的直径定义为 d_j . 第 j 个 RSU 的总资源为 $Re_{j,used}$, 已用资源为 $Re_{j,used}$. 车辆与 RSU 间的传输速率如式 (7):

$$r_{i,j} = w_2 \log_2 \left(1 + \frac{p_{i,j} g_{i,j}}{I_{i,j} + \sigma^2} \right) \quad (7)$$

(3) BS 相关参数.

$$r_{i,k} = w_3 \log_2 \left(1 + \frac{p_{i,k} g_{i,k}}{I_{i,k} + \sigma^2} \right) \quad (8)$$

其中, w_3 为车辆 i 与 5G 基站 k 之间的带宽, $p_{i,k}$ 为车辆 i 与 5G 基站 k 之间的传输功率, $g_{i,k}$ 为车辆 i 与 5G 基站 k 之间的信道增益, $I_{i,k}$ 为车辆 i 与 5G 基站 k 之间的信道干扰, σ^2 为噪声功率.

车辆发送一次内容 q_i 所消耗的能耗如式 (9) 所示:

$$e_i = \frac{S_{q_i}}{r_{i,x}} P_{i,x} \quad (9)$$

其中, $r_{i,x}, p_{i,k}$ 分别对应为 3 种不同方式的传输速率和传输功率, 其中 $x \in \{i', j, k\}$.

2.2 交通模型

在车辆进入 RSU 覆盖范围内时, 车辆可以向 RSU 发送内容请求. RSU 是否能为车辆提供完整的服务取决于车辆发送请求时刻到车辆离开 RSU 服务范围的时间, 车辆 i 的这段时间记为 t_i , t_i 取决于车辆速度 v_i . 车辆的速度 v_i 与 RSU 服务范围内车辆数相关. 把第 j 个 RSU 内的车道数记为 l , 第 l 车道最多容纳的车辆数记为 $N_{l,max}$, 则 RSU 内的最多容纳车辆数 N_{max} . 式 (10) 表示最多容纳车辆数:

$$N_{max} = N_{l,max} l \quad (10)$$

车辆越密集, 车辆的速度就越小^[28-30]. 车辆 i 速度 v_i 如式 (11) 所示:

$$v_i = \max \left\{ v_{min}, v_{max} \left(1 - \frac{N_l}{N_{l,max}} \right) \right\} \quad (11)$$

其中, v_{\min} , v_{\max} 分别为车辆的最慢速度和最快速度.

车辆*i*从发送内容请求到离开第*j*个RSU覆盖范围的时间段 t_i 如式(12)所示:

$$t_i = \frac{d_j}{v_i} - t_{i,j} \quad (12)$$

其中, d_j 为第*j*个RSU的覆盖直径, $t_{i,j}$ 为车辆从进入第*j*个RSU的覆盖范围至其发送内容请求的时间.

3 问题建模与求解方法

在本节中, 通过构建通信模型与效用模型, 并在车辆排队等待向RSU获取内容请求时构建一个多重指标拍卖模型. 本节首先给出模型描述, 然后分析多辆车辆和第*j*个RSU共同决定的内容交付服务的估值. 之后研究了车辆*i*和第*j*个RSU的最佳拍卖策略, 以实现贝叶斯纳什均衡.

3.1 通信模型

在本节中, 将研究车辆在向不同目标执行任务卸载的成本. 当车辆*i*在RSU覆盖范围内发送内容请求时, 其首先会向周围车辆发送请求, 如果存在有请求相同内容的车辆, 则请求车辆直接从周围车辆获取请求内容. 否则, 车辆向RSU或5G基站发送任务卸载请求. 当车辆在向RSU发送请求时, 会根据当前RSU的情况与车辆离开当前RSU的时间选择是否从当前RSU获取内容请求. 此外车辆还可以从5G基站获取内容请求. 由于计算完成的内容请求大小较小, 本文不考虑请求内容回传至车辆的能耗与时间.

3.1.1 以车辆为任务卸载目标

当车辆*i*发送内容请求时, 首先向周围车辆发送请求, 寻找是否存在与所请求内容相同的车辆*i'*. 如果内容存在, 车辆*i*可以直接向车辆*i'*发送内容请求. 对于车辆*i'*存在两种可能状态, 如图2所示.

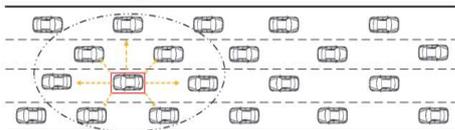


图2 车辆向周围车辆内容请求图

(1) 车辆*i'*已经通过其他方式获取了内容请求.

此时对于车辆*i*而言只需考虑车辆*i'*发送请求的时间, 无需在考虑请求内容的计算时间. 故总时间如式(13):

$$t_{i,i',total} = \frac{S_i}{r_{i,i'}} \quad (13)$$

(2) 车辆*i'*正在通过其他方式请求内容.

相对于(1)而言, 在时间上需要额外考虑车辆*i'*完成内容请求的时间. 故总时间与总成本如式(14):

$$t_{i,i',total} = \frac{S_i}{r_{i,i'}} + w_{i'} \quad (14)$$

如若总时间大于限制时间则超时时间如式(15):

$$t_{over} = t_{i,i',total} - t_i \quad (15)$$

车辆总成本如式(16):

$$u_{i,i'} = \begin{cases} \eta \frac{S_i}{r_{i,i'}}, & t_{i,i',total} < t_i \\ \eta \frac{S_i}{r_{i,i'}} + \xi_{q_i} t_{over}, & t_{i,i',total} \geq t_i \end{cases} \quad (16)$$

其中, η 为车辆*i*在单位时间内的传输费用, ξ_{q_i} 为请求内容 q_i 的单位时间的超时成本.

车辆*i*在这两种不同的情况下, 车辆*i*总能耗如式(17):

$$e_i = \frac{S_{q_i}}{r_{i,i'}} P_{i,i'} \quad (17)$$

3.1.2 车辆*i*与5G基站*k*之间通信

在车辆高速行驶时, 当任务紧急或所在路边单元及相邻的路边单元所需处理的请求都比较繁重时, 车辆可以选择与5G基站进行通信. 如图3所示.

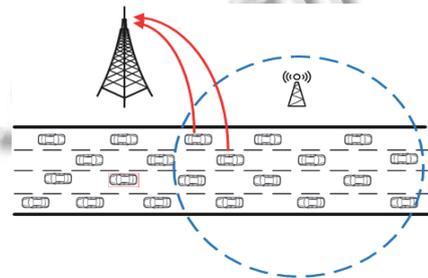


图3 车辆向5G基站请求通信图

车辆*i*传输请求内容至5G基站的时间 $t_{i,k}$ 如式(18):

$$t_{i,k} = \frac{S_i}{r_{i,k}} \quad (18)$$

通过5G基站*k*的计算能力可以得出基站计算时间如式(19):

$$t_{i,k,com} = \frac{C_i}{f_k} \quad (19)$$

其中, f_k 为5G基站*k*的计算能力.

由式(19)和式(20)可以计算总时间 $t_{i,k,total}$ 如式(20):

$$t_{i,k,\text{total}} = \frac{S_i}{r_{i,k}} + \frac{C_i}{f_k} \quad (20)$$

车辆通过向 5G 基站发送请求的成本如式 (21):

$$u_{i,k} = \begin{cases} \eta \frac{S_i}{r_{i,k}} + l_k \frac{C_i}{f_k}, & t_{i,k,\text{total}} < t_i \\ \eta \frac{S_i}{r_{i,k}} + l_k \frac{C_i}{f_k} + \xi_{qi} t_{\text{over}}, & t_{i,k,\text{total}} > t_i \end{cases} \quad (21)$$

车辆*i*总能耗如式 (22):

$$e = \frac{S_{qi}}{r_{i,k}} P_{i,k} \quad (22)$$

3.1.3 车辆*i*与路边单元之间通信

对于车辆*i*与路边单元之间通信存在以下几种情况.

1) 车辆*i*在路边单元*j*的覆盖范围内发送内容请求,且路边单元*j*连接的车辆数小于 6 台,此时,车辆*i*可以直接与路边单元*j*通信.

其总时间与总成本如式 (23) 和式 (24):

$$t_{i,j,\text{total}} = \frac{S_i}{r_{i,j}} + \frac{C_i}{f_j} \quad (23)$$

$$u_{i,j} = \begin{cases} \eta \frac{S_i}{r_{i,j}}, & t_{i,j,\text{total}} < t_i \\ \eta \frac{S_i}{r_{i,j}} + \xi_{qi} t_{\text{over}}, & t_{i,j,\text{total}} > t_i \end{cases} \quad (24)$$

2) 车辆*i*在路边单元*j*的覆盖范围内发送内容请求,此时第*j*个 RSU 连接的车辆数已满 6 台,且车辆*i*完成内容时仍在路边单元*j*的覆盖范围内.那么车辆*i*需要等待 6 台中请求内容接受完毕后,将空余的通信信道交由其他等待车辆.如图 4 所示.

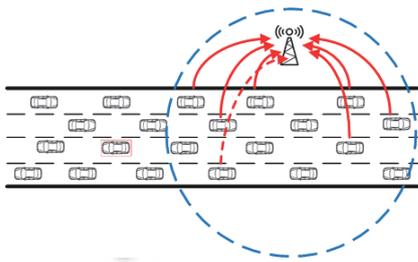


图 4 车辆向 RSU 请求内容等待图

即将向 RSU 发送内容请求的车辆,可以通过给予 RSU 一些额外的报酬从而提高自己的顺位,额外的报酬记为 x_i .

其等待时间如式 (25):

$$t_{\text{wait}} = t_{i-1,\text{wait}} + \min\{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_{i-1}\} \quad (25)$$

其中, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 为车辆与第 j 个 RSU 连接时,其他 5 台与第 j 个 RSU 连接的车辆接受完毕任务的时间.

总时间如式 (26):

$$t_{i,j,\text{total}} = \frac{C_i}{f_j} + \frac{S_i}{r_{i,j}} + t_{\text{wait}} \quad (26)$$

由于本文中,车辆在完成自身内容请求后,会将与路边单元断开连接,将空位让给与其连接的下一个车辆.故如果车辆*i*在回传完成时仍在路边单元*j*的覆盖范围内时,车辆*i*可以直接与路边单元连接,获取计算完成的请求内容.其成本如式 (27):

$$u_{i,j} = \begin{cases} \eta \frac{S_i}{r_{i,j}} + x_i, & t_{i,j,\text{total}} < t_i \\ \eta \frac{S_i}{r_{i,j}} + \xi_{qi} t_{\text{over}} + x_i, & t_{i,j,\text{total}} > t_i \end{cases} \quad (27)$$

这两种情况下,车辆能耗如式 (28):

$$e = \frac{S_{qi}}{r_{i,j}} P_{i,j} \quad (28)$$

3) 车辆*i*在路边单元*j*的覆盖范围内,但路边单元*j*内请求的车辆数或请求内容过多,则车辆*i*通过一跳的方式间接与基站第 $j-1$ 个 RSU 或第 $j+1$ 个 RSU 通信,分别如图 5 和图 6 所示.

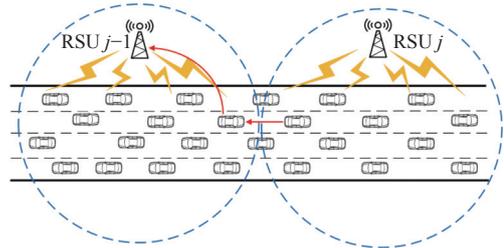


图 5 车辆向第 $j-1$ 个 RSU 请求内容

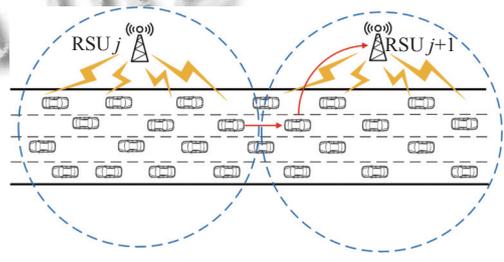


图 6 车辆向第 $j+1$ 个 RSU 请求内容

此时车辆*i*在接收内容请求时也只能通过多跳的方式接收.以选择第 $j-1$ 个 RSU 为例,其总时间如式 (29):

$$t_{i,j-1,\text{total}} = \frac{C_i}{f_{j-1}} + t_m + \frac{S_i}{r_{i,j-1}} + \frac{S_i}{r_{i,i'}} \quad (29)$$

其中, t_m 为车辆*i*与第 $j-1$ 个 RSU 间接通信的中间车辆完成其任务所需时间.

其成本如式 (30):

$$u_{i,j-1} = \begin{cases} \eta \left(\frac{S_i}{r_{i,k}} + \frac{S_i}{r_{i,i'}} \right), & t_{i,j,\text{total}} < t_i \\ \eta \left(\frac{S_i}{r_{i,k}} + \frac{S_i}{r_{i,i'}} \right) + \xi_{q_i} t_{\text{over}}, & t_{i,j,\text{total}} > t_i \end{cases} \quad (30)$$

其能耗如式 (31):

$$e = \frac{S_{q_i}}{R_{i,i'}} P_{i,i'} + \frac{S_{q_i}}{R_{i',j-1}} P_{i',j-1} \quad (31)$$

3.2 效用模型

(1) 5G 基站效用

5G 基站效用如式 (32):

$$u_k = \sum_{i=1}^n \phi(l_k - p_k) \frac{C_i}{f_k} \quad (32)$$

其中, ϕ 取值为 0 或 1. 当 $\phi = 0$ 时, 表明车辆未向 5G 基站发送内容请求, 反之则表明车辆向 5G 基站发送内容请求. l_k 为 5G 基站向车辆单位计算时间收取的计算费用, p_k 为 5G 基站单位时间的计算成本.

(2) RSU 效用

RSU 基站效用如式 (33):

$$u_j = \sum_{i=1}^n \rho m_i - \sum_{i=1}^n \tau p_j \frac{C_i}{f_k} \quad (33)$$

其中, τ 取值为 0 或 1, 当 $\tau = 0$ 时, ρ 必然为 0, 表明车辆 i 未向第 j 个 RSU 发送内容请求; 当 $\tau = 1$ 时, ρ 的取值为 0 或 1. 当 $\tau = 1, \rho = 0$ 时, 表明车辆 i 与第 j 个 RSU 进行了通信, 但未给予第 j 个 RSU 额外报酬; 当 $\tau = 1, \rho = 1$ 时, 表明车辆 i 与第 j 个 RSU 进行了通信, 并给予了第 j 个 RSU 额外报酬. p_i 为 5G 基站单位时间的计算成本.

3.3 模型分析

在第 2.2 节中, 描述了车辆任务卸载花费的成本与时间, 但当一个 RSU 已经与 6 台车辆进行通信时, 其余想要与 RSU 通信的车辆只能进行等待. 如果等待时间过长, 还会存在超时损失. 而车辆可以给予 RSU 一定的额外报酬, 提高自己与 RSU 通信的顺位, 减少时延. 本节主要研究车辆给予 RSU 的最佳报酬, 希望车辆收益与 RSU 收益最大化, 同时使两者之间实现纳什均衡. 多台车辆排队等待向 RSU 获取内容请求这一场景, 可以视作一个多重指标拍卖模型. 本节首先给出模型描述, 然后分析多辆车辆和第 j 个 RSU 共同决定的内容交付服务的估值. 最后, 我们研究了车辆 i 和第 j 个 RSU 的最佳拍卖策略, 以实现贝叶斯纳什均衡.

假定有 n 台车辆在排队等待, 用 N 表示这 n 台车辆构成的集合, 即 $I = \{1, \dots, i\}$. 假定车辆 i 对于自身请求

内容的价值估计为 $m_i, \forall m_i \in [a_i, b_i]$, 其密度函数为 $f_i(m_i)$, 且 $f_i(m_i)$ 是 $[a_i, b_i]$ 上的连续函数. 故其分布函数如式 (34):

$$F_i(m_i) = \int_{a_i}^{m_i} f_i(y_i) dy_i \quad (34)$$

则所有车辆对于自身请求内容的价值估计向量记为 M 如式 (35):

$$M = (m_1, \dots, m_n) \quad (35)$$

车辆 i 之外的其他车辆对于自身请求内容的价值估计向量记为 M_{-i} 如式 (36) 所示:

$$M_{-i} = (m_1, \dots, m_{i-1}, m_{i+1}, \dots, m_n) \quad (36)$$

由于 I 台车辆对于请求内容的价值估计是相互独立的, 因此 I 台车辆给予 RSU 的额外报酬的联合密度函数如式 (37):

$$f(M) = f_1(m_1) f_2(m_2) \dots f_n(m_n) = \prod_{j \in n} f_j(m_j) \quad (37)$$

车辆 i 其余车辆给予 RSU 的额外报酬的联合密度函数如式 (38):

$$f_{-i}(M_{-i}) = f_1(m_1) \dots f_{i-1}(m_{i-1}) f_{i+1}(m_{i+1}) \dots f_n(m_n) = \prod_{j \in n, j \neq i} f_j(m_j) \quad (38)$$

Myerson 定理: 一个卖者打算将其拥有的一件物品卖给 n 个打算购买的买者, 但卖者对于 n 个打算购买的买者所出的最高价并不知情, 对于卖者而言, 如何设计一个拍卖模型, 使得在其拍卖模型下达到纳什均衡并获得最高收益^[31-33].

在拍卖机制中, 我们选取一类特别的拍卖机制: 直接显示机制. 在直接显示机制中, 买者们同时向卖者揭示其估价, 卖者决定谁将买到物品. 在排队的车辆, 在排队的时间点虽然不同, 但在与第 j 个 RSU 连接的 6 台车辆中某一台车辆完成内容请求前, 这些等待的车辆可以视作同一起跑线, 故直接显示机制适用于此.

直接显示机制 (P, x) , $p_i(M)$ 是车辆 i 在其他车辆出价情况下与第 j 个 RSU 优先通信的概率, $x_i(M)$ 是车辆 i 给予第 j 个 RSU 的真实额外报酬. 因此, 对于给定车辆对于自身请求内容的价值估计为 m_i 在这特定的拍卖机制 (P, x) 的收益期望如式 (39):

$$U_i(P, x, m_i) = E_{M_{-i}} [m_i P_i(M) - x_i(M)] = \int_{a_1}^{m_1} \dots \int_{a_{i-1}}^{m_{i-1}} \int_{a_{i+1}}^{m_{i+1}} \dots \int_{a_n}^{m_n} [m_i P_i(M) - x_i(M)] f_{-i}(M_{-i}) dM_{-i} \quad (39)$$

其中, $dM_{-i} = dm_1 \cdots dm_{i-1} dm_{i+1} \cdots dm_n$.

同理, 第 j 个 RSU 在给定的这一拍卖机制中获取的收益期望如式 (40):

$$U_0(P, x) = E_M \left[\sum_{i=1}^n x_i(M) \right] = \sum_{i=1}^n E_M [x_i(M)] \\ = \int_{a_1}^{m_1} \cdots \int_{a_n}^{m_n} \left[\sum_{i=1}^n x_i(M) f(M) \right] dM \quad (40)$$

其中, $dM_i = dm_1 \cdots dm_n$.

但是并不是每一对函数 (P, x) 都能够表达为一种可行的拍卖机制. 必须满足 3 个条件:

(1) 函数 P 满足条件概率如式 (41):

$$\sum_{j \in N} p_j(m) \leq 1 \text{ 且 } p_j(m) \geq 0, \forall i \in I, \forall m \in M \quad (41)$$

(2) 车辆 i 收益期望约束如式 (42):

$$U_i(P, x, m_i) \geq 0, \forall i \in I, \forall m_i \in [a_i, b_i] \quad (42)$$

(3) 根据直接显示机制假定可知, 车辆 i 对于自身请求内容的真实的价值估计为 m_i , 对于车辆而言即最优. 换言之, 车辆对于自身请求内容的真实的价值估计才会达到纳什均衡. 假如车辆 i 对于自身请求内容的真实的价值估计为 m_i , 其宣称的对于自身请求内容的价值估计为 s_i , 则车辆 i 在自身请求内容的价值估计 s_i 情况下与第 j 个 RSU 通信的概率如式 (43):

$$\vartheta_i(s_i) = E_{M_{-i}} [P_i(s_i, M_{-i})] \\ = \int_{a_1}^{m_1} \cdots \int_{a_{i-1}}^{m_{i-1}} \int_{a_{i+1}}^{m_{i+1}} \cdots \int_{a_n}^{m_n} P_i(s_i, M_{-i}) f_{-i}(M_{-i}) dM_{-i} \quad (43)$$

其中, $dM_{-i} = dm_1 \cdots dm_{i-1} dm_{i+1} \cdots dm_n$.

此时车辆 i 在自身请求内容的价值估计 s_i 情况下的收益期望如式 (44):

$$E_{M_{-i}} [m_i P_i(s_i, M_{-i}) - x_i(s_i, M_{-i})] \\ = \int_{a_1}^{m_1} \cdots \int_{a_{i-1}}^{m_{i-1}} \int_{a_{i+1}}^{m_{i+1}} \cdots \int_{a_n}^{m_n} [m_i P_i(s_i, M_{-i}) \\ - x_i(s_i, M_{-i})] f_{-i}(M_{-i}) dM_{-i} \quad (44)$$

其中, $dM_{-i} = dm_1 \cdots dm_{i-1} dm_{i+1} \cdots dm_n$.

约束条件如式 (45):

$$U_i(P, x, m_i) \geq \int_{a_1}^{m_1} \cdots \int_{a_{i-1}}^{m_{i-1}} \int_{a_{i+1}}^{m_{i+1}} \cdots \\ \int_{a_n}^{m_n} [m_i P_i(s_i, M_{-i}) - x_i(s_i, M_{-i})] f_{-i}(M_{-i}) dM_{-i} \quad (45)$$

其中, $\forall i \in I, \forall m_i \in [a_i, b_i], \forall s_i \in [a_i, b_i], dM_{-i} = dm_1 \cdots dm_{i-1} dm_{i+1} \cdots dm_n$.

故对于车辆给予第 j 个 RSU 的最优额外报酬可以转换成第 j 个 RSU 的最大收益.

通过上述对可行拍卖机制分析可知, 车辆给予第 j 个 RSU 的最优额外报酬可以转换成第 j 个 RSU 的最大收益. 第 j 个 RSU 的预期获取的期望支付为式 (40), 可将目标函数改写如式 (46):

$$U_0(P, x) = \sum_{i=1}^n E_M [x_i(M)] \\ = \sum_{i=1}^n E_M [x_i(M) - m_i P_i(M) + m_i P_i(M)] \\ = \sum_{i=1}^n E_M [x_i(M) - m_i P_i(M)] \\ + \sum_{i=1}^n E_M [m_i P_i(M)] \quad (46)$$

通过 Myerson 定理中的引理可知:

$$\begin{cases} x_i(M) = P_i(M) m_i - \int_{a_i}^{m_i} P_i(s_i, M_{-i}) ds_i \\ \forall i \in I, \forall m_i \in M \end{cases} \quad (47)$$

且对于任何可行的 (P, x) 有:

$$E_M [x_i(M) - m_i P_i(M)] \\ = - \int_{a_i}^{m_i} \cdots \int_{a_n}^{m_n} (x_i(M) - m_i P_i(M)) f(M) dM \\ = -U_i(P, x, a_i) - E_M \left[\frac{1 - F_i(m_i)}{f_i(m_i)} P_i(M) \right] \quad (48)$$

将式 (47) 和式 (48) 代入式 (46) 得:

$$U_0(P, x) = \sum_{i \in N} E_M \left[\left(m_i - \frac{1 - F_i(m_i)}{f_i(m_i)} P_i(M) \right) \right] \\ - \sum_{i \in N} U_i(P, x, a_i) \quad (49)$$

RSU j 期望获取的最大额外报酬在式 (41)–式 (43) 的约束下最大化式 (49).

在式 (49) 中, x 仅出现在最后一项. 式 (41) 和式 (42) 可重写成:

$$\int_{a_1}^{m_1} \cdots \int_{a_{i-1}}^{m_{i-1}} \int_{a_{i+1}}^{m_{i+1}} \cdots \int_{a_n}^{m_n} [P_i(M) m_i \\ - \int_{a_i}^{m_i} p_i(s_i, M_{-i}) ds_i - x_i(M)] f_{-i}(M_{-i}) dM_{-i} \\ = U_i(P, x, a_i) \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall m_i \in [a_j, b_j] \quad (50)$$

若第 j 个 RSU 根据式 (50) 选择通信车辆, 则:

$$U_i(P, x, a_i) = 0, \quad \forall i \in I, \forall m_i \in [a_j, b_j]$$

此时拍卖是可行的.

令 $c_i(m_i) = m_i - \frac{1 - F_i(m_i)}{f_i(m_i)}$ 是 m_i 的严格递增函数. 当 $c_i(m_i) = c_j(m_j) = \max_{k \in N} [c_k(m_k)]$ 时, 第 j 个 RSU 选择与排

队等待中最先发送请求的车辆进行通信. $z_i(M_{-i})$ 是车辆 i 在估价向量 M_{-i} 与 RSU j 通信的概率为正的估计中的下确定界. 在此本文忽略 $c_i(s_i) = c_j(m_j)$ 的情形, 则有:

$$P_i(s_i, M_{-i}) = \begin{cases} 1, & \text{若 } s_i \geq z_i(M_{-i}) \\ 0, & \text{若 } s_i < z_i(M_{-i}) \end{cases} \quad (51)$$

故:

$$\int_{a_i}^{m_i} P_i(s_i, M_{-i}) ds_i = \begin{cases} m_i - z_i(M_{-i}), & \text{若 } m_i \geq 2z_i(M_{-i}) \\ 0, & \text{若 } m_i < z_i(M_{-i}) \end{cases} \quad (52)$$

最终, $x_i(M)$ 如式 (53) 所示:

$$x_i(M) = P_i(m) m_i - \int_{a_i}^{m_i} P_i(s_i, M_{-i}) ds_i = \begin{cases} z_i(M_{-i}), & \text{若 } P_i(m) = 1 \\ 0, & \text{若 } P_i(m) = 0 \end{cases} \quad (53)$$

$x_i(M)$ 的最终取值如式 (54) 所示:

$$x_i(M) = \begin{cases} \max \left\{ c_i^{-1} \left(m_0, \max_{j \neq i} m_j \right) \right\}, & P_i(m) = 1 \\ 0, & P_i(m) = 0 \end{cases} \quad (54)$$

其中, $c_i^{-1}(m_0)$ 可以视作第 j 个 RSU 作为一台车辆给予第 j 个 RSU 的额外报酬.

4 实验结果

在本节中, 将评估所提出方案的性能. 我们首先介绍基于多重指标的服务器选择策略的仿真场景, 然后详细介绍仿真结果和讨论.

4.1 模拟设置

在模拟中, 基于多重指标的服务器选择策略中有 1 个 5G 基站和 10 个 RSU 被 5G 基站覆盖, 其中 RSU 随机部署在该区域中. 在每个 RSU 的覆盖范围中, 到达其覆盖范围的到达车辆的数量由泊松分布确定. 在车辆发送请求时, 其首先会向周围 25 m 以内的车辆发送广播, 当有相同请求内容车辆时, 则直接从该目标车辆获取请求; 否则车辆根据请求内容的重要性, 选择向 RSU 或 5G 基站发送卸载请求. 当车辆向 RSU 请求内容且 RSU 已经与 6 台车辆同时相连时, 车辆可以通过请求内容的重要性, 给予 RSU 不同的额外费用来提高自己的顺位. 表 1 给出了仿真中的参数说明.

通过改变路边单元内的车辆数, 不改变车辆内容请求比例, 通过 30 次循环运算, 在改变内容发送时间点的基础上, 通过其均值进行比较. 我们通过以下方式评估 5G 基站、RSU 和车辆的效用, 将我们的策略与

以下常规方案进行比较.

实验结果通过车辆完成请求内容的所需的时间和成本, 路边单元的效用和 5G 基站的效用进行比较. 比较方案如下:

- (1) 车辆请求内容仅向路边单元发送, 不向周围车辆和 5G 基站发送请求.
- (2) 车辆请求内容仅向 5G 基站发送, 不向周围车辆和 RSU 发送请求.

表 1 仿真参数说明

参数	说明
k	5G基站个数, $k=1$
j	RSU个数, $j=10$
i	RSU覆盖范围下的车辆数目, $i \in \{20, 40, 60, 80, 100, 120, 140\}$
Q	内容优先级定义集合
q_i	车辆发送的一个内容请求
s_{q_i}	车辆发送的内容请求 q_i 大小
s_{\min}, s_{\max}	10 MB, 50 MB
ω	Zipf分布的分布参数
α	时间阈值与车辆发送内容请求概率的比例系数, $\alpha=2$
β	单位时间超时损失与车辆发送内容请求概率的比例系数, $\beta=5$
η	车辆传输内容请求时的单位通信成本
ξ_{q_i}	内容请求 q_i 单位时间超时成本
$N_{l, \max}$	第 j 个 RSU 覆盖范围内第 l 车道通行时最大容纳车辆数
N_{\max}	第 j 个 RSU 覆盖范围内最大容纳车辆数
l	第 j 个 RSU 覆盖范围内车道数, $l=4$
d_j	第 j 个 RSU 的覆盖直径
m_i	车辆 i 对其内容请求的估价
M	排队等待车辆对其内容估价组合
M_{-i}	其他排队等待车辆对内容估价的组合

4.2 仿真结果

图 7 显示了 RSU 中车辆在选择请求内容的目标所占比例. 从图中可以看出随着车辆数的变多, choice_1 即车辆向周围车辆获取内容请求, 其比例不断升高, choice_2 即车辆向 RSU 获取内容请求, 其比例不断下降, choice_3 即车辆向 5G 基站获取内容求, 其轻微下降. 随着车辆密度变大, 请求车辆四周的车辆数不断变多, 具有相同请求内容的车辆出现概率不断提高, 故请求车辆优先向周围车辆获取内容请求比例上升, 从而导致向 RSU 获取内容请求比例下降.

图 8 描述了在不同车辆密度下, RSU 覆盖范围内每辆车辆内容请求的平均耗时. 从图中可以看出仅通过 RSU 获取内容请求所耗时间不断上升, 而本文所使用的策略与仅与 5G 基站获取内容请求的时间很接近, 甚至在车辆密度达到一定程度时, 比从 5G 基站获取内

容的耗时更短一些. 这是由于车辆密度的升高, 仅向 RSU 获取内容请求的方式, 导致排队等待的车辆数大大增加, 从而导致平均每辆车花费的时间不断增加. 而仅向 5G 基站获取内容请求的方式, 虽然 5G 基站会进行收费, 但车辆向其发送内容请求时, 不必等待, 故对于每辆车而言, 其平均耗时比较平稳, 只有轻微的浮动. 而本文采用的基于多重指标的卸载策略, 随着车辆密度的提高, 四周车辆数变多, 车辆请求内容通过周围车辆获取的概率变大, 大大节省了部分车辆的传输时间和计算时间, 故当车辆密度达到一定程度时, 其平均耗时会低于仅向 5G 基站获取内容请求的方式.

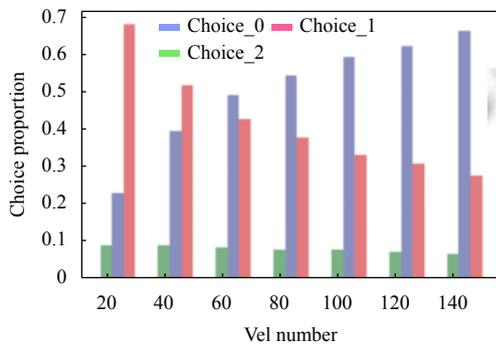


图7 车辆获取内容请求选择对象比例

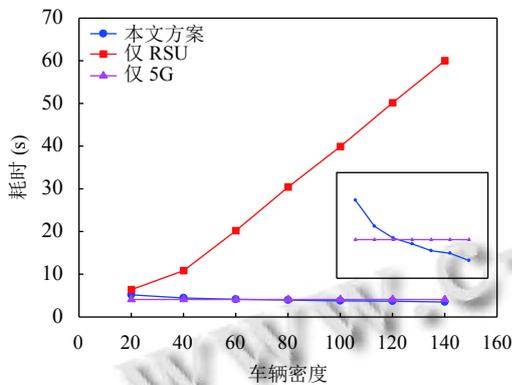


图8 不同车辆密度下的平均耗时

图9显示了具有不同车辆密度下的RSU覆盖范围内每辆车内容请求的平均费用. 从整体趋势来看, 由图8可知, 仅向5G基站获取内容请求的方式其平均耗时整体是比较平稳的, 故其平均费用也会稳定在一定范围内并根据不同重要性的内容请求在一定程度上波动. 由图8分析知, 仅向RSU获取内容请求的方式中, 随着车辆密度变大, 排队等待的车辆数增加, 从而使得产生超时损失的车辆数增多, 导致平均费用不断

升高. 而本文使用策略由图7可知, 会随着车辆密度变大, 选择从周围车辆获取内容请求的概率变大, 向RSU获取内容请求的概率降低, 从而传输成本与计算成本不断降低, 从而平均费用整体趋势不断下降.

图10描述在3种不同情况下, 平均每辆车在传输至选择目标时的传输时间. 由于车辆与车辆间的距离较近, 相对而言传输速率相对较快, 其次是与RSU, 与5G基站的由于平均距离相对较远, 故其速率排在最后. 由于本文设定, 车辆发送内容请求的比例不变, 故仅通过RSU或5G基站的传输时间是不变的. 而本文方案会随着车辆向周围车辆发送内容请求概率的提高而逐渐降低传输时间.

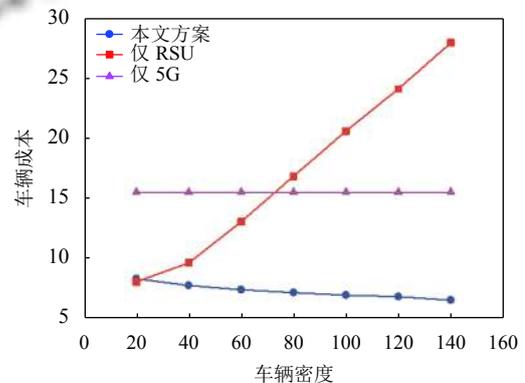


图9 不同车辆密度下的平均费用

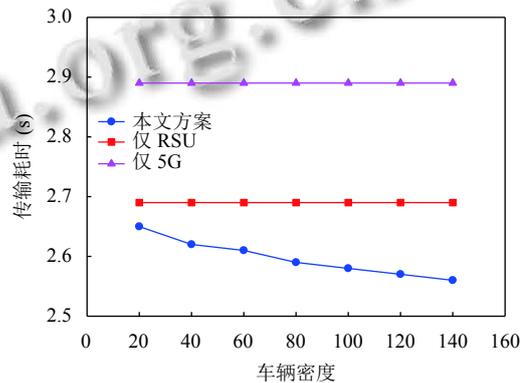


图10 不同车辆密度下的车辆平均能耗

图11展示了在3种不同情况下, 第 j 个RSU的计算时间, 但车辆仅选择向5G基站获取内容请求时, 对于RSU而言, 其始终未进行任务运算, 故其计算时间一直为0; 而仅向第 j 个RSU获取内容请求时, 由于第 j 个RSU覆盖范围下车辆发送内容请求的比例始终未发生变化, 故其计算时间始终不变. 而由图7可知, 本

文策略中,随着车辆密度变大,选择向RSU获取内容请求的比例在降低,所以本文策略中,RSU的计算时间呈下降趋势。

类似的,图12展示了在3种不同情况下5G基站的计算时间。当车辆仅选择向RSU获取内容请求时,5G基站的计算时间一直为0;而仅向5G基站获取内容请求时,由于第j个RSU覆盖范围下车辆发送内容请求的比例始终未发生变化,故其计算时间始终不变。而由图7可知,随着车辆密度变大,向5G基站获取内容请求的比例只是轻微下降。因此本文策略中,RSU的计算时间呈下降趋势但不是很显著。

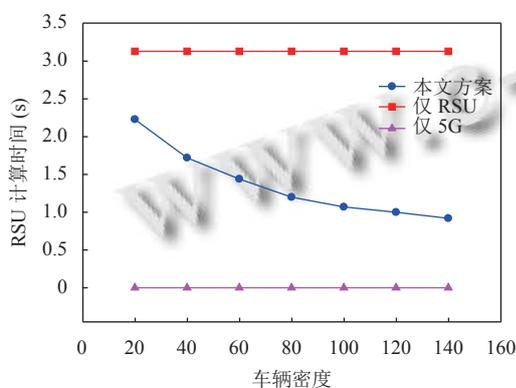


图11 不同车辆密度下RSU平均计算时间

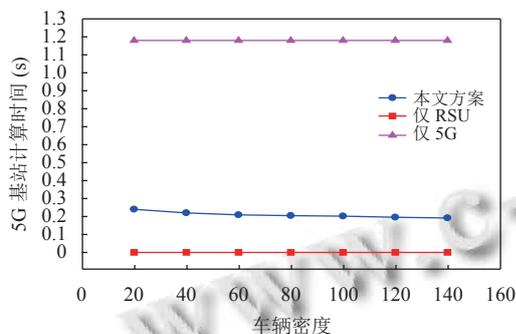


图12 不同车辆密度下的5G基站平均计算时间

图13描述了3种不同策略下获取内容请求时,RSU基站的效用。由于RSU的服务是免费的,本文针对RSU执行任务卸载时的效用,不考虑其余途径对RSU计算内容请求时的补贴。图中可以看出,在初始车辆密度低时,本文策略中RSU效用为负数,在车辆密度慢慢上升后,车辆会产生排队模式。随着车辆给予RSU的额外报酬,RSU效用不断提高并趋近于0,这是由于并非所有向RSU发送内容请求的车辆都需要排

队等待,而可以与RSU直接通信的车辆,其不会给予RSU额外报酬。而由于免费,仅向RSU获取内容请求的方式,RSU效用一直为负。

图14描述了3种不同策略下获取内容请求时5G基站的效用。从5G基站效用来看,进项5G基站获取内容请求时,5G基站的效用远远领先。虽然本文策略中5G基站的效用远低于仅向5G基站获取内容请求时的5G基站效用,但在车辆费用,非均耗时、车辆能耗和5G基站能耗方面都要低。

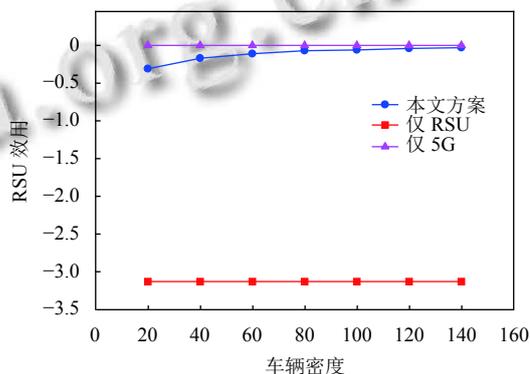


图13 不同车辆密度下的RSU平均效用

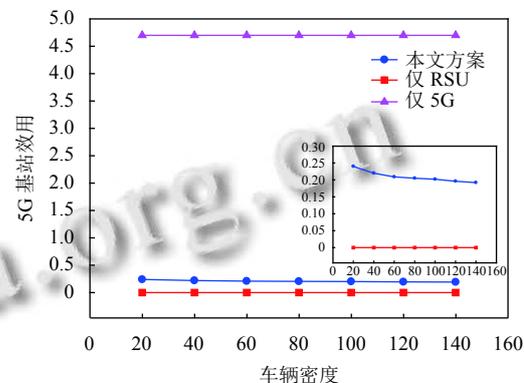


图14 不同车辆密度下的5G基站平均效用

5 总结

在本文中,提出了一种基于任务优先级的多重指标服务器选择方案,车辆能够与RSU和5G基站通信,RSU与5G基站之间并未存在通信协作,在车辆与RSU通信过程中,就其排队等待时对于RSU的额外报酬采用多重指标拍卖方案,通过直接显示机制,将问题转换成RSU获取最优收益同时车辆给予RSU的额外报酬最小情况下的最优拍卖机制,实现贝叶斯纳什均衡。最后,通过仿真对提出的方案进行了评估,结果表

明可以很大程度上降低了车辆成本, 能耗以及时延, 同时一定程度上保证了 5G 基站和 RSU 的效用, 并可以提高网络的效率。

为了将来的工作, 我们计划研究在异构车联网中对车辆内容进行划分并将其分配给不同的任务卸载对象。另外, 我们打算通过考虑时延与任务卸载对象能耗占比, 更好的选择任务卸载对象。

参考文献

- 1 Sun SL, Gong L, Rong B, *et al.* An intelligent SDN framework for 5G heterogeneous networks. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(11): 142–147. [doi: [10.1109/MCOM.2015.7321983](https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7321983)]
- 2 He ZJ, Zhang DQ, Liang JB. Cost-efficient sensory data transmission in heterogeneous software-defined vehicular networks. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(20): 7342–7354. [doi: [10.1109/JSEN.2016.2562699](https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2562699)]
- 3 Zheng K, Hou L, Meng HL, *et al.* Soft-defined heterogeneous vehicular network: Architecture and challenges. *IEEE Network*, 2016, 30(4): 72–80. [doi: [10.1109/MNET.2016.7513867](https://doi.org/10.1109/MNET.2016.7513867)]
- 4 Wu Q, Liu HX, Wang RH, *et al.* Delay-sensitive task offloading in the 802.11p-based vehicular fog computing systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 7(1): 773–785.
- 5 Yao Y, Rao L, Xue L. Performance and reliability analysis of IEEE 802.11p safety communication in a highway environment. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(9): 4198–4212.
- 6 Fernandez JA, Borries K, Cheng L, *et al.* Performance of the 802.11p physical layer in vehicle-to-vehicle environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(1): 3–14.
- 7 Khabazian M, Aissa S, Mehmet-Ali M. Performance modeling of message dissemination in vehicular ad hoc networks with priority. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(1): 61–71. [doi: [10.1109/JSAC.2011.1110107](https://doi.org/10.1109/JSAC.2011.1110107)]
- 8 Gerla M, Kleinrock L. Vehicular networks and the future of the mobile Internet. *Computer Networks*, 2011, 55(2): 457–469. [doi: [10.1016/j.comnet.2010.10.015](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.10.015)]
- 9 Zhao TC, Zhou S, Song LQ, *et al.* Energy-optimal and delay-bounded computation offloading in mobile edge computing with heterogeneous clouds. *China Communications*, 2020, 17(5): 191–210. [doi: [10.23919/JCC.2020.05.015](https://doi.org/10.23919/JCC.2020.05.015)]
- 10 Bonomi F, Milito R, Zhu J, *et al.* Fog computing and its role in the Internet of Things. *Proceedings of the 1st Edition of the MCC Workshop on Mobile Cloud Computing*. Helsinki: ACM, 2012. 13–16.
- 11 Zhang K, Mao YM, Leng SP, *et al.* Energy-efficient offloading for mobile edge computing in 5G heterogeneous networks. *IEEE Access*, 2016, 4: 5896–5907. [doi: [10.1109/ACCESS.2016.2597169](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2597169)]
- 12 Stojmenovic I, Wen S. The fog computing paradigm: Scenarios and security issues. *Proceedings of 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. Warsaw: IEEE, 2014. 1–8.
- 13 Luan TH, Gao LX, Li Z, *et al.* Fog computing: Focusing on mobile users at the edge. *arXiv: 1502.01815*, 2015.
- 14 Olariu S, Eltoweissy M, Younis M. Towards autonomous vehicular clouds. *ICST Transactions on Mobile Communications and Applications*, 2011, 11(7–9): e2.
- 15 Li YZ, Wang SG. An energy-aware edge server placement algorithm in mobile edge computing. *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Edge Computing (EDGE)*. San Francisco: IEEE, 2018. 66–73.
- 16 Whaiduzzaman M, Sookhak M, Gani A, *et al.* A survey on vehicular cloud computing. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, 40: 325–344. [doi: [10.1016/j.jnca.2013.08.004](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2013.08.004)]
- 17 Abraham TS, Narayanan K. Cooperative communication for vehicular networks. *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*. Ramanathapuram: IEEE, 2014. 1163–1167.
- 18 Shiraz M, Gani A, Khokhar RH, *et al.* A review on distributed application processing frameworks in smart mobile devices for mobile cloud computing. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2013, 15(3): 1294–1313.
- 19 Zhu HZ, Li ML, Fu LY, *et al.* Impact of traffic influxes: Revealing exponential intercontact time in urban VANETs. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2011, 22(8): 1258–1266. [doi: [10.1109/TPDS.2010.176](https://doi.org/10.1109/TPDS.2010.176)]
- 20 Huang DJ, Xing TY, Wu HJ. Mobile cloud computing service models: A user-centric approach. *IEEE Network*, 2013, 27(5): 6–11. [doi: [10.1109/MNET.2013.6616109](https://doi.org/10.1109/MNET.2013.6616109)]
- 21 Fernando N, Loke SW, Rahayu W. Mobile cloud computing: A survey. *Future Generation Computer Systems*, 2013, 29(1): 84–106. [doi: [10.1016/j.future.2012.05.023](https://doi.org/10.1016/j.future.2012.05.023)]
- 22 Tang D, Zhang XF, Tao XF. Delay-optimal temporal-spatial

- computation offloading schemes for vehicular edge computing systems. Proceedings of 2019 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Marrakesh: IEEE, 2019. 1–6.
- 23 Zhu C, Tao J, Pastor G, *et al.* Folo: Latency and quality optimized task allocation in vehicular fog computing. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 4150–4161. [doi: [10.1109/JIOT.2018.2875520](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2875520)]
- 24 Huo XS, Lv C, Pei P, *et al.* Smart grid communication network traffic anomaly detection based on entropy analysis. Proceedings of the 2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu: IEEE, 2016. 1082–1086.
- 25 Su Z, Hui YL, Yang Q. The next generation vehicular networks: A content-centric framework. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(1): 60–66. [doi: [10.1109/MWC.2017.1600195WC](https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1600195WC)]
- 26 Breslau L, Cao P, Fan L, *et al.* Web caching and Zipf-like distributions: Evidence and implications. Proceedings of the Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York: IEEE, 1999. 126–134.
- 27 Su Z, Hui YL, Guo S. D2D-based content delivery with parked vehicles in vehicular social networks. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(4): 90–95. [doi: [10.1109/MWC.2016.7553031](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7553031)]
- 28 Hui YL, Su Z, Luan TH, *et al.* A game theoretic scheme for optimal access control in heterogeneous vehicular networks. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(12): 4590–4603. [doi: [10.1109/TITS.2019.2894716](https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2894716)]
- 29 Zhuang YY, Pan JP, Viswanathan V, *et al.* On the uplink MAC performance of a drive-thru Internet. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(4): 1925–1935. [doi: [10.1109/TVT.2012.2189424](https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2189424)]
- 30 Tan WL, Lau WC, Yue OC, *et al.* Analytical models and performance evaluation of drive-thru Internet systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(1): 207–222. [doi: [10.1109/JSAC.2011.110120](https://doi.org/10.1109/JSAC.2011.110120)]
- 31 Myerson RB. Incentive compatibility and the bargaining problem. Econometrica, 1979, 47(1): 61–74. [doi: [10.2307/1912346](https://doi.org/10.2307/1912346)]
- 32 Myerson RB. Optimal auction design. Mathematics of Operations Research, 1981, 6(1): 58–73. [doi: [10.1287/moor.6.1.58](https://doi.org/10.1287/moor.6.1.58)]
- 33 Myerson RB, Satterthwaite MA. Efficient mechanisms for bilateral trading. Journal of Economic Theory, 1983, 29(2): 265–281. [doi: [10.1016/0022-0531\(83\)90048-0](https://doi.org/10.1016/0022-0531(83)90048-0)]

(校对责编: 牛欣悦)