

原创性 时效性 就是科研成果的生命力
《计算机应用研究》编辑部致力于高效的编排
为的就是将您的成果以最快的速度
呈现于世

* 数字优先出版可将您的文章提前 8~10 个月发布于中国知网和万方数据等在线平台

车载边缘计算中基于信誉值的计算卸载方法研究

作者 吴振铨, 黄旭民, 余荣, 何昭水

机构 广东工业大学 自动化学院

基金项目 国家自然科学基金优青项目 (61422201); 国家自然科学基金面上项目 (61370159); 广东省中国科学院全面战略合作专项项目 (2013B091100014)

预排期卷 《计算机应用研究》 2018 年第 35 卷第 9 期

摘要 将移动边缘计算 (mobile edge computing, MEC) 引入车载自组网形成车载边缘计算, 从而使服务提供商直接利用 MEC 服务器在网络边缘服务用户, 以提升用户体验质量和丰富用户满意度。随后, 研究在车载边缘计算环境下车辆用户的计算卸载问题。针对此问题, 提出相应的系统模型与使用讨价还价博弈方法以解决 MEC 服务器如何根据不同的任务要求与车辆信誉值分配自身的计算资源以执行不同的卸载任务。最后, 通过实验仿真, 验证了方案的有效性和可靠性。

关键词 车载边缘计算; 计算卸载; 信誉值

作者简介 吴振铨 (1985-), 男, 广东饶平人, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为车联网; 黄旭民 (1990-), 男 (通信作者), 广东普宁人, 博士研究生, 主要研究方向为车联网、移动云计算等 (huangxu_min@163.com); 余荣 (1979-), 男, 广东饶平人, 教授, 主要研究方向为物联网、移动云计算等; 何昭水 (1978-), 男, 湖南郴州人, 教授, 主要研究方向为智能信息处理、机器学习等。

中图分类号 TP391

访问地址 <http://www.arocmag.com/article/02-2018-09-002.html>

发布日期 2017 年 9 月 1 日

引用格式 吴振铨, 黄旭民, 余荣, 何昭水. 车载边缘计算中基于信誉值的计算卸载方法研究[J/OL]. 2018, 35(9). [2017-09-01]. <http://www.arocmag.com/article/02-2018-09-002.html>.

车载边缘计算中基于信誉值的计算卸载方法研究^{*}

吴振铨, 黄旭民[†], 余 荣, 何昭水

(广东工业大学 自动化学院, 广州 510006)

摘 要: 将移动边缘计算 (mobile edge computing, MEC) 引入车载自组网形成车载边缘计算, 从而使服务提供商直接利用 MEC 服务器在网络边缘服务用户, 以提升用户体验质量和丰富用户满意度。随后, 研究在车载边缘计算环境下车辆用户的计算卸载问题。针对此问题, 提出相应的系统模型与使用讨价还价博弈方法以解决 MEC 服务器如何根据不同的任务要求与车辆信誉值分配自身的计算资源以执行不同的卸载任务。最后, 通过实验仿真, 验证了方案的有效性和可靠性。

关键词: 车载边缘计算; 计算卸载; 信誉值

中图分类号: TP391

Reputation-based approach for computation offloading in vehicular edge computing

Wu Zhenquan, Huang Xumin[†], Yu Rong, He Zhaoshui

(School of Automation Guangdong University of Technology, Guangzhou 51006, China)

Abstract: To improve user experience and enrich user satisfaction, this paper proposed mobile edge computing (MEC) to integrate with vehicular ad hoc networks, leading to vehicular edge computing, wherein service providers directly utilize MEC servers to serve users at the network edge. Consequently, it studied a problem about computation offloading in vehicular edge computing. To solve the problem, this paper proposed a system model and used a bargaining game to allocate computation resources of MEC servers for different vehicles, according to their task requirements and reputation values. Numerical results demonstrate the effectiveness and reliability of the proposed schemes.

Key Words: vehicular edge computing; computation offloading; reputation values.

0 引言

车载自组网是移动自组网在智能交通领域的一种实例化, 它通过车辆间 (vehicle-to-vehicle, V2V)、车辆与路侧设施 (vehicle-to-infrastructure, V2I) 的无线多跳通信保证用户具有安全、高效与舒适的驾驶体验^[1]。在车载自组网里, 车辆一般配置有车载单元 (on-board unit, OBU), 从而具有一定的计算与存储能力。然而, 一些新兴的车载服务, 比如增强现实, 需要进行复杂的任务计算与大量的数据存储。现如今, 车辆有限的计算与存储资源难以支撑这一类计算密集型的车载服务。为此, 近年来相关研究学者提议将移动云计算技术引入车载自组网中, 从而形成车载云计算^[2]。车载云计算允许移动的车辆用户将繁琐的计算任务从车载单元卸载至云服务器, 由云服务器利用丰富的计算与存储资源执行任务计算, 并将最终计算结果反馈至对应车辆。车载云计算通过优化云资源配置, 直接减轻了车辆的计算负荷与能量消耗, 同时为各种车载服务提供较高性能保

障。

然而, 随着日益提高的服务质量要求, 车载云计算有着不可避免的缺陷: a) 执行任务计算的云服务器集中部署于唯一的网络中心, 当全网出现大量并发式的任务请求时, 容易造成网络拥塞; b) 云服务器远离车辆用户, 加之用户与其通信的带宽有限, 这使得用户从发出任务请求到接收回传数据有较大的传输时延; c) 另外, 处在远端的云服务器较难实时获取用户的位置、周边环境信息等。云服务器在决策时缺乏详尽考虑, 极大地影响用户体验。

为了解决这个问题, 本文提出将移动边缘计算 (MEC) 技术引入车载自组网中, 从而形成车载边缘计算 (vehicular edge computing, VEC)。移动边缘计算通过广泛部署 MEC 服务器来直接处理部分甚至全部用户的任务请求, 有效地缓解网络中心的计算压力。MEC 服务器位于用户邻近位置, 可以对任务请求进行本地化处理, 极大地降低了通信开销与减少网络时延。处于网络边缘的优势也使得 MEC 服务器易探知用户的周边环境

基金项目: 国家自然科学基金优秀项目 (61422201); 国家自然科学基金面上项目 (61370159); 广东省中国科学院全面战略合作专项项目 (2013B091100014)

作者简介: 吴振铨 (1985-), 男, 广东饶平人, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为车联网; 黄旭民 (1990-), 男 (通信作者), 广东普宁人, 博士研究生, 主要研究方向为车联网、移动云计算等 (huangxu_min@163.com); 余荣 (1979-), 男, 广东饶平人, 教授, 主要研究方向为物联网、移动云计算等; 何昭水 (1978-), 男, 湖南郴州人, 教授, 主要研究方向为智能信息处理、机器学习等。

信息,通过利用这些实时的辅助信息,MEC服务器的决策能力得以加强^[3]。车载边缘计算,即通过将MEC技术与车载自组网相结合,使得服务提供商直接利用MEC服务器服务于本地用户。这保证了服务提供商便捷地将车载服务寄宿于网络边缘,从而提升用户体验质量和丰富用户满意度。车载边缘计算的提出对那些时延敏感、实时性要求高和需要情景感知的新兴车载服务有显著的促进作用和重大意义。

在车载边缘计算中,车载服务的性能保障依赖有效可靠的计算卸载处理。通过将计算任务卸载至其他服务器,车辆用户减少处理能耗并获取高质量的用户体验。因此,计算卸载问题在近些年获得了相关学者的密切关注。文献[4]基于李雅普诺夫优化方法,提出了移动云计算环境下一种动态的、低复杂度的计算卸载算法。此算法既可以减少系统能耗又同时满足不同用户的卸载服务的时延要求。类似地,文献[5]则借用博弈论的方法建模并分析解决了多个不同用户同时决策是否将自身计算任务卸载至云服务器的问题。此文献还创新性地提出了用户在计算卸载时的代价函数为所消耗时延与能量的权值代数和。近些年,计算卸载问题也延伸至车载云计算领域。文献[6]设计了一个在不打扰车辆用户正常使用车载服务情况下同时又可以实现无缝卸载计算任务的系统框架。此框架为服务导向型框架,系统自动获取不同时刻的网络信息并动态地帮助用户作出卸载决策,最终提高车载服务的响应时间。有时,车载云计算存在多余的计算资源,从而可以被利用起来向其他装置(比如智能手机)提供计算任务卸载至此的渠道。文献[7]提出一种新颖的场景:网络中存在强大的中心云,就近的微云与动态的车载云,均可以向智能手机提供计算卸载服务。通过综合考虑响应时间与能量消耗,一种灵活的卸载策略被提出以指示智能手机的计算任务应该被卸载至何处。

高效的计算卸载处理对于保障用户服务的性能有重大促进意义。本文提出了车载边缘计算的概念,并研究车辆用户的计算卸载问题。文献[8]做了类似的工作。文献[8]同样将MEC引进车载网络中,并用契约理论的方法解决了车辆用户与服务提供商之间的关于计算卸载的契约问题。但此文献旨在最大化服务提供商的利益,而本文则着重于从用户的角度去优化解决计算卸载问题。

两者重要的区别可以总结为以下几点:a)文献[8]假定不同的车辆用户具有相同数量的计算资源,而本文出于实际考虑,在系统建模时认为不同的车辆具备数量不同的计算资源;b)本文还建模刻画车辆用户决策是否将自身的计算任务卸载至对应MEC服务器,而文献[8]则默认所有的车辆用户都愿意把计算任务卸载至MEC服务器,实际应用中不同车辆从消耗时间和能量的角度考虑,未必都会选择上传卸载计算任务;c)本文在优化分配MEC服务器计算资源时,目标函数是基于车辆用户信誉值最大化用户自身效益,而文献[8]的目标函数则以经济角度最大化服务提供商利益。

具体地,在本文方案中,移动的车辆用户可以将计算任务

直接卸载至邻近的MEC服务器。MEC服务器再根据不同的任务要求与车辆信誉值分配自身的计算资源以执行不同的卸载任务。为了规范车辆的正确行为,车载自组网引入信誉值以衡量车辆对网络的贡献程度^[9]。车辆存在动态变化的信誉值,其值的大小指示车辆是否行为规范。当车辆热心于协助网络内其他车辆和促成实现网络功能,比如协助转播信息包,这些车辆的信誉值在此行为后得以提高。当车辆故意影响甚至阻碍其他车辆的正常服务时,其行为将被监测并给予信誉值降低的处罚。作为奖励,本文设定当提交计算卸载任务请求后,信誉值高的车辆在竞争MEC服务器的计算资源被赋予更高的决策因子,从而被分配获得更多的计算资源。

1 系统模型

如图1所示,车辆用户在车载边缘计算环境下进行计算卸载,收到计算任务的MEC服务根据不同任务要求与车辆的信誉值分配自身资源以执行不同的计算卸载任务。整个车载边缘计算网络由车辆用户、路侧设施(roadside unit, RSU)、MEC服务器和可信机构所组成。这些网络组成要素的具体功能如下所述:

a)车辆用户。车辆在出厂时配备有OBU, GPS和无线通信模块等装置^[10]。OBU可以执行一些必要的简易任务计算。GPS使车辆实时获取目前所在位置。通过利用无线通信模块,车辆可以与周边的车辆以及与RSU进行通信。移动的车辆行驶在路上,当需要运行一些新兴的车载服务程序,如增强现实,图像处理等,车载OBU无法承担由此带来的复杂计算和数据存储,故发起计算卸载需求。相应的计算任务经多跳V2V/V2I通信,被传递至最近的RSU。RSU收集一段时间内的用户需求并打包经有线通信递交至指定MEC服务器。此外,车辆在入网时便有初始信誉值,其大小随着它对网络的贡献程度的积累变化而变化。当其协助实现网络功能时,信誉值增加;当其作出违规行为时,信誉值便相应减小。

b)MEC服务器。分布式的MEC服务器部署在车辆用户的邻近位置,并通过有线方式连接RSU。与计算卸载相关的服务提供商以定期或者按需的方式租借MEC服务器,从而向车辆用户提供服务。收集上来的计算卸载需求有不同的任务要求和对应车辆存在不同的信誉值,MEC服务器根据这些不同要素分配自身的计算资源以执行不同的计算卸载任务。MEC服务器利用RSU监控,实时掌握车辆的动态位置。完成任务计算后,MEC服务器再把回传数据经RSU发送至对应车辆。

c)可信机构。可信机构属于后台运行的一个独立的组织,可以由当地的车管等权威机构所承担。所有的网络实体都必须在可信机构注册合法身份并取得安全通信所需的公私钥对与证书等。取得合法身份的车辆具有有效的信誉值。可信机构作为网络管理者,负责信誉值数据库的基本管理:事件纪录与信誉值更新。事件纪录旨在如实地刻画每个车辆用户在网络中的持续行为。由此,可信机构通过车辆在不同时刻的行为纪录而实

时更新相应的信誉值。作为奖励, 可信机构提倡服务提供商在服务车辆用户时考虑其信誉值, 并向服务提供商赋予全网信誉值数据库的带权限访问。通过合法的访问, 本文的计算卸载服务提供商在优化分配其计算资源时可以获取对应服务车辆当前的信誉值。

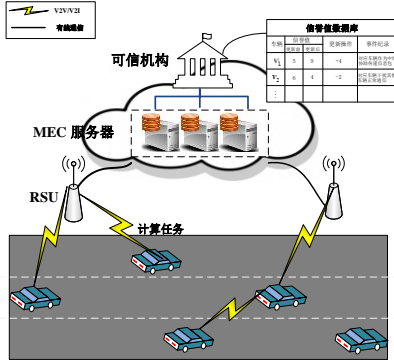


图 1 车载边缘计算中的基于信誉值的计算卸载场景

2 计算卸载任务的要求

执行不同车载服务的车辆有着不同的计算卸载任务要求。假定某车辆 i 正在执行某类程序 j , 其有关计算卸载任务要求的参数如下: $[D_{i,j}^m, D_{i,j}^{out}, W_i^j]$ 。 $D_{i,j}^m$ 表示车辆提交的计算卸载任务的输入数据大小, $D_{i,j}^{out}$ 表示 MEC 服务器应回传的数据大小, 而 W_i^j 是此任务的计算负荷 (常用需要执行的总 CPU 周期数表示)。计算负荷由以下公式推导而出:

$$W_i^j = h_j D_{i,j}^m \quad (1)$$

其中: h_j 表示与车载服务种类相关的系数^[11]。

对于请求车辆, 它可以将此任务留在本地 (即由 OBU 执行), 也可以将其卸载至 MEC 服务器。假如留在本地执行, 所需要的时间为

$$t_{i,j}^L = W_i^j / f_i \quad (2)$$

其中: f_i 表示车辆的计算能力, 即单位时间内能够执行的 CPU 周期数, 单位赫兹(Hz)。能耗方面, 车辆在本地执行此程序所需要的能量为

$$e_{i,j}^L = (\alpha + \beta f_i^3) \frac{W_i^j}{f_i} \quad (3)$$

其中: α 和 β 表示静态功率系数和动态功率系数, 其取值可参考文献[12]。假如请求车辆将此任务卸载至 MEC 服务器, 则所需要的时间为

$$t_{i,j}^O = \frac{D_{i,j}^m}{\gamma_i} + \frac{W_i^j}{f_i^o} + \frac{D_{i,j}^{out}}{\gamma_i} \quad (4)$$

包含上传数据时间, 处理时间和接收输出数据时间。 γ_i 为车辆 i 与就近 RSU 通信的传输速率, f_i^o 为 MEC 服务器为对应车辆分配计算资源, 即每秒 CPU 周期数。MEC 服务器一般为多核处理器, 可以同时执行多个计算卸载的任务。当将计算任务卸载至 MEC 服务, 请求车辆的能耗为

$$e_{i,j}^O = p_i^t \frac{D_{i,j}^m}{\gamma_i} + p_i^r \frac{D_{i,j}^{out}}{\gamma_i} \quad (5)$$

包含发送输入数据能耗和接收输出数据能耗。车辆通信时的发射与接收功率分别为 p_i^t 和 p_i^r 。

类似于文献[5], 本文定义车辆在使用车载服务的代价函数为消耗的时间与能量的权值代数和。其中权值系数指示了用户的偏好, 即对所消耗时间与能量的不同程度的意愿。故在本地化处理与卸载至 MEC 服务器两种情况下, 车辆对应的代价函数可以表示为

$$\begin{cases} C_{i,j}^L = \eta_i t_{i,j}^L + (1 - \eta_i) e_{i,j}^L \\ C_{i,j}^O = \eta_i t_{i,j}^O + (1 - \eta_i) e_{i,j}^O \end{cases} \quad (6)$$

$\eta_i (0 \leq \eta_i \leq 1)$ 为权值系数, 当用户更强调消耗时间时, 其值更大。反之, 其值则变小。

作为一个理性的用户, 只有当 $C_{i,j}^L > C_{i,j}^O$ 时, 用户才会选择将计算任务卸载至 MEC 服务器。MEC 服务器为车辆分配的计算资源 f_i^o 成为关键。为了更贴近现实, 本文引入一个意愿裕度值 $k_i (k_i \geq 1)$, 即当 $C_{i,j}^L > k_i C_{i,j}^O$, 用户不会将计算任务留在本地处理。对应地, 对于每个用户, 总存在一个阈值参数 $f_{i,min}^o$ (最小计算资源需求), 使得 $C_{i,j}^O < C_{i,j}^L / k_i$ 成立, 从而促使车辆选择将计算任务卸载至 MEC 服务器。

3 基于信誉值的计算资源分配

本文将用一个讨价还价博弈模型来描述 MEC 服务器在车载边缘计算下的计算资源分配问题。假设一个 MEC 服务器在一个工作周期内接收到 M 份计算卸载任务请求。每一份请求的任务要求如下: $[D_{i,j}^m, D_{i,j}^{out}, W_i^j, f_{i,min}^o]$ 。MEC 服务器的计算能力为每秒可执行 F 个 CPU 周期, 在此假设 MEC 服务器计算资源充分, 易满足 $\sum_{i=1}^M f_{i,min}^o \ll F$ 。每辆车通过讨价还价的博弈过程竞争 MEC 服务器上的计算资源, 而且信誉值高的用户在此竞争过程中更具优势。故设此博弈模型的目标函数如下:

$$\begin{aligned} \max_{f_i^o} & \prod (f_i^o - f_{i,min}^o)^{\rho_i} \\ s.t., & \sum_{i=1}^M f_i^o \leq F \end{aligned} \quad (7)$$

其中 ρ_i 为车辆对 MEC 服务器计算资源的决策权威因子, 与其当前信誉者 r_i 相关。定义如下:

$$\rho_i = r_i / \sum_{i=1}^M r_i \quad (8)$$

上述目标函数也是不同信誉值车辆用户的效益函数。为了最大化用户的效益, 本文采用拉格朗日乘数法解决上述基于车辆用户信誉值的博弈模型。对目标函数取对数并引入拉格朗日因子 λ , 可构造出以下的拉格朗日函数:

$$U = \sum \rho_i \ln(f_i^o - f_{i,min}^o) + \lambda (\sum f_i^o - F) \quad (9)$$

对 U 关于 f_i^o 求一、二次偏导, 可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial f_i^o} &= \frac{\rho_i}{(f_i^o - f_{i,min}^o)} + \lambda \\ \frac{\partial^2 U}{\partial (f_i^o)^2} &= -\frac{\rho_i}{(f_i^o - f_{i,min}^o)^2} < 0 \end{aligned} \quad (10)$$

利用 $\partial U / \partial f_i^o = 0$, 可求得

$$f_i^o = f_{i,\min}^o - \rho_i / \lambda \quad (11)$$

将上式代入 U 可得

$$U = \sum \rho_i \ln(-\rho_i / \lambda) + \lambda(\sum (f_{i,\min}^o - \rho_i / \lambda) - F) \quad (12)$$

对 U 关于拉格朗日因子 λ 求一、二次偏导, 可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial \lambda} &= -\frac{1}{\lambda} + \sum f_{i,\min}^o - F \\ \frac{\partial^2 U}{\partial \lambda^2} &= \frac{1}{\lambda^2} > 0 \end{aligned} \quad (13)$$

类似地, 利用 $\partial U / \partial \lambda = 0$, 可求得

$$\lambda = -1 / (F - \sum f_{i,\min}^o) \quad (14)$$

将式(14)重新代入式(11)则

$$f_i^o = f_{i,\min}^o + \rho_i (F - \sum f_{i,\min}^o) \quad (15)$$

最终, MEC 服务器按照式(15)的结果分配其计算资源, 以对应执行不同的计算卸载任务, 执行后将计算结果经 RSU 反馈至对应的车辆。

4 仿真与结果分析

设置必要的实验仿真参数, 如表 1 所示, 参数均在指定范围内服从均匀分布。假设某个工作周期内, 某 MEC 服务器接收到 10 个计算卸载任务请求。

表 1 仿真参数及数值列表

仿真参数	数值范围
车辆自身计算能力 f_i	[1,2] GHz
车辆通信发射功率 p_i^t \ 接收功率 p_i^r	[1,2] W
计算卸载服务的输入数据长度 $D_{i,j}^{\text{in}}$	[400,500] KB
计算卸载服务的输出数据长度 $D_{i,j}^{\text{out}}$	[100,200] KB
车载服务种类系数 h_j	[0.02,0.04] GHz/KB
车辆通信传输速率 γ_i	[1,2] Mbps
车辆当前信誉值 r_i	[1,10]
静态功率系数 α	0.5
动态功率系数 β	1
代价函数权重系数 η_i	[0,1]
意愿裕度值 k_i	[1,3]

图 2 所示为本文方案与现有方案的性能比较。从用户角度分配计算资源的现有方案包括以下两种: a) 出于用户公平, 均匀分配计算资源; b) 出于用户优先, 按任务量大小级别分配计算资源。本文考虑车辆用户在系统中具有不同信誉值, 故其要求在计算卸载环境下能够得到相应的用户效益, 如式(7)所示。不同的方案会导致用户获得不同的用户效益。由图 2 可知, 当 MEC 服务器计算资源越多, 用户分配所得的计算资源也越多, 故最终用户可获得更高的效益。而本文基于信誉值分配的方案较于现有两种方案, 在最大化用户效益方面具有优势。当 MEC 服务器计算能力为 $F=100$ GHz 时, 本文方案中的所有用户总体效益较现有的两种方案分别提高 23% 和 38%。

图 3 所示为车辆要求的最低计算资源 $f_{i,\min}^o$ 与车辆平均意愿

裕度值 k 和车辆平均通信功率 p (不妨令 $p_i^t = p_i^r$) 的关系。在相同的通信开销下, 当车辆平均意愿裕度值 k 增大, 这意味着车辆要求需要更多的计算资源, 故平均 $f_{i,\min}^o$ 也随之增大; 在相同意愿度下, 当通信功率增大, 必然导致车辆将任务卸载至 MEC 服务器的能耗增大, 此时车辆从抑制总体代价的角度希望任务处理时间缩短从而导致要求的最低计算资源 $f_{i,\min}^o$ 增大。

接着, 在随机抽取一辆车 (不妨第 5 号车) 条件下, 观察其分配所得的计算资源随不同信誉值变化情况, 如图 4 所示。易知, 当 MEC 服务器的总计算资源 F 增加, 车辆也可以对应获取更多的计算资源。并且, 当车辆拥有更高的信誉度时, 其最终分配所得的计算资源更多。当 $F=100$ GHz 时, 第 5 号车的信誉值若从 5 提高至 10, 最终分配的计算资源数量可以提高近 50%。

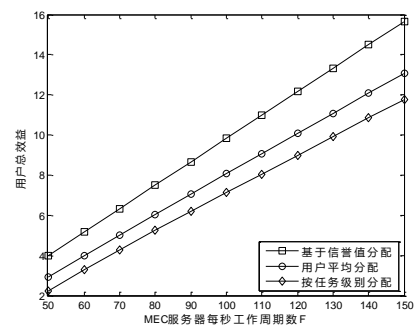


图 2 本文与现有两种方案的性能比较

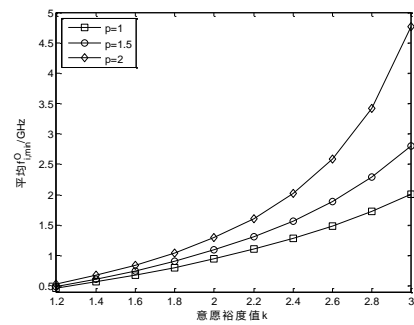


图 3 不同通信功率和意愿裕度值, 车辆平均 $f_{i,\min}^o$ 变化情况

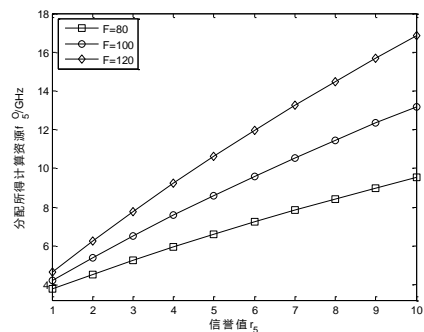


图 4 不同信誉值和总计算资源, 某车辆 $f_{i,\min}^o$ 变化情况

另外, 某辆车信誉值的提高, 也会影响其他车辆分配所得的计算资源, 如图 5 所示。当第 5 号车的信誉值提高, 其所获计算资源数量提高, 但也导致其他车辆分配所得的计算资源出

现不同程度的下降。这意味着, MEC 服务器在分配计算资源时总优先于那些信誉值高的车辆用户。以上实验仿真可以说明本文所提的基于信誉值的计算卸载方案是有效可靠的。

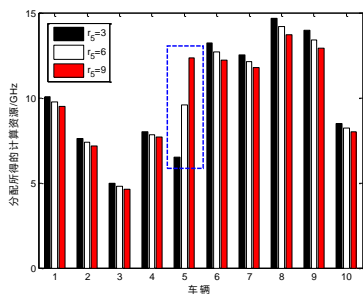


图 5 不同信誉值分布, 各车辆 f_i^o 变化情况

5 结束语

为了满足低时延、能耗小和需要情景感知的新兴车载服务要求, 本文提出了车载边缘计算的概念。随后, 本文研究在此环境下车辆用户的计算卸载问题。不同信誉值的车辆可以将不同的计算任务卸载至指定的 MEC 服务器。MEC 服务器根据不同的任务要求与车辆信誉值分配自身的计算资源以执行不同的卸载任务。最后, 通过实验仿真验证了本文方案的有效性和可靠性。

参考文献:

- [1] Hartenstein H, Laberteaux L P. A tutorial survey on vehicular Ad hoc networks [J]. IEEE Communications magazine, 2008, 46 (6) .
- [2] Whaiduzzaman M, Sookhak M, Gani A, et al. A survey on vehicular cloud computing [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 40: 325-344.
- [3] Patel M, Naughton B, Chan C, et al. Mobile-edge computing introductory technical white paper [R]. [S. l.] : Mobile-edge Computing (MEC) Industry

Initiative, 2014.

- [4] Huang D, Wang P, Niyato D. A dynamic offloading algorithm for mobile computing [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2012, 11 (6): 1991-1995.
- [5] Ma X, Lin C, Xiang X, et al. Game-theoretic analysis of computation offloading for cloudlet-based mobile cloud computing [C]// Proc of the 18th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. 2015: 271-278.
- [6] Ashok A, Steenkiste P, Bai F. Enabling vehicular applications using cloud services through adaptive computation offloading [C]// Proc of the 6th International Workshop on Mobile Cloud Computing and Services. 2015: 1-7.
- [7] Zhang H, Zhang Q, Du X. Toward vehicle-assisted cloud computing for smartphones [J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2015, 64 (12): 5610-5618.
- [8] Zhang K, Mao Y, Leng S, et al. Delay constrained offloading for mobile edge computing in cloud-enabled vehicular networks [C]// Proc of the 8th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling. 2016: 288-294.
- [9] Ding Q, Li X, Jiang M, et al. Reputation-based trust model in vehicular ad hoc networks [C]// Proc of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. 2010: 1-6.
- [10] 杨放春, 王尚广, 李静林, 等. 车联网综述 [J]. 中国通信, 2014, 11 (10): 1-15.
- [11] Miettinen A P, Nurminen J K. Energy efficiency of mobile clients in cloud computing [C]// Proc of the 2nd USENIX Conference on Hot Topics in Cloud Computing, 2010.
- [12] Xu R, Zhu D, Rusu C, et al. Energy-efficient policies for embedded clusters [J]. ACM SIGPLAN Notices, 2005, 40 (7): 1-10.