

基于移动边缘计算的V2X任务卸载方案

张海波^{①②} 栾秋季^{*①②} 朱江^{①②} 贺晓帆^③

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

^③(美国德克萨斯州拉玛尔大学电子工程系 美国 77710)

摘要: 移动边缘计算(MEC)通过在移动网络边缘提供IT服务环境和云计算能力带来高带宽、低时延优势,从而在下一代移动网络的研究中引起了广泛的关注。该文研究车载网络中车辆卸载请求任务时搜寻服务节点为其服务的匹配问题,构建一个基于MEC的卸载框架,任务既可以卸载到MEC服务器以车辆到基础设施(V2I)形式通信,也可以卸载到邻近车辆进行车辆到车辆(V2V)通信。考虑到资源有限性、异构性,任务多样性,建模该框架为组合拍卖模式,提出一种多轮顺序组合拍卖机制,由层次分析法(AHP)排序、任务投标、获胜者决策3个阶段组成。仿真结果表明,所提机制可以在时延和容量约束下,使请求车辆效益提高的同时最大化服务节点的效益。

关键词: 车载网络; 移动边缘计算; 组合拍卖模型; 层次分析法

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)11-2736-08

DOI: 10.11999/JEIT180027

V2X Task Offloading Scheme Based on Mobile Edge Computing

ZHANG Haibo^{①②} LUAN Qiuji^{①②} ZHU Jiang^{①②} HE Xiaofan^③

^①(College of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^③(Department of Electronic Engineering, Lamar University, TX 77710, USA)

Abstract: Mobile Edge Computing (MEC) draws much attention in the next generation of mobile networks with high bandwidth and low latency by enabling the IT and cloud computation capacity at the Radio Access Network (RAN). Matching problem between requesting nodes and servicing nodes is studied when a vehicle wants to offload tasks, a MEC-based offloading framework in vehicular networks is proposed, Vehicle can either offload task to MEC sever as V2I link or neighboring vehicle as V2V link. Taking into account the limited and heterogeneous resources, and the diversity of tasks, offloading framework is established as combination auction model, and a multi-round sequential combination auction mechanism is proposed, which consists of Analytic Hierarchy Process (AHP) ranking, task bidding and winners decision. Simulation results show that the proposed mechanism can maximize the efficiency of service nodes while increasing the efficiency of requesting vehicles under the constraints of the delay and the capacity.

Key words: Vehicular networking; Mobile Edge Computing (MEC); Combination auction moddle; Analytic Hierarchy Process (AHP)

1 引言

联网的车辆可以利用车辆到基础设施(V2I)和

车辆到车辆(V2V)通信形式来构成车辆自组织网络(VANET),大规模移动应用通常在车载单元(OBU)的协助下完成服务。然而,OBU的计算能力有限,利用无线访问将计算任务卸载到云被认为是一种在解决这个问题方面很有前景的方法^[1]。

最近有大量关于云计算车载网络的研究,文献^[2]中,作者利用车辆接入网络中的认知无线电和软数据融合,提出基于认知云的分布式流量卸载方案。在文献^[3]中,作者研究车辆云中的资源管理技术,

收稿日期: 2018-01-09; 改回日期: 2018-05-02; 网络出版: 2018-06-20

*通信作者: 栾秋季 yimuxiaolian@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771084, 61601071), 长江学者和创新团队发展计划基金(IRT16R72)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771084, 61601071), The Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (IRT16R72)

并显示了基于强化学习的资源调度技术的好处。移动云计算(MCC)虽然可以将计算任务卸载到集中控制的云计算数据中心服务器来增强车载终端的容量,但因远距离部署带来的骨干网络与回程网络的容量限制和延迟波动,导致车辆服务质量(QoS)严重下降。

为了给车辆提供更可靠的服务,业界提出了移动边缘计算(MEC)^[4,5],使计算任务能够卸载到部署在无线接入网边缘的MEC服务器,既满足终端设备计算能力的扩展需求,同时也弥补核心云计算时延较长的缺点。文献[6]研究在多通道无线干扰环境下的移动边缘计算的多用户计算卸载问题,并设计一个分布式算法实现高效计算卸载。为了尽量减少MEC卸载系统的能量消耗,文献[7]作者提出一种节能计算分流方案,该方案同时优化卸载决策和无线资源分配策略。车载网络场景下对于MEC的研究,文献[8]提出一种基于合同的卸载和计算资源分配方案,该方案最大限度地提高MEC服务提供商的利益,同时提高车载终端的效用。文献[9]研究一种车载网络中基于MEC的卸载框架,提出一种基于预测的V2X组合方案,大大降低计算成本,提高任务传输效率。文献[10]引入一个邻近备份服务器来弥补MEC服务器资源有限问题,采用Stackelberg博弈理论方法来设计一个最优多层卸载方案,最大限度地提高车辆和计算服务器的效用。

然而,上述文献大部分考虑到资源的有限性,而忽略资源的异构性。资源异构性定义为用户之间的需求差异。例如,车辆对于车载导航等业务有非常严格的信息可靠性和时效性要求,而对交互类如网络游戏等业务有较高吞吐量以及公平性要求。为了给车辆提供更好的用户体验质量(QoE),应该考虑如何得到提供服务节点与请求车辆之间的最优匹配,使请求车辆和服务节点在满足预算均衡的基础上,保证请求车辆经济效益增加的同时服务节点经济效益达到最大。

本文的主要工作如下:

(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)将卸载问题建模为组合拍卖模型,请求车辆作为买家购买相应的资源来执行任务,卖家为拥有一定资源的服务节点。(3)基于层次分析法确定请求车辆对服务节点优先级序值,提出多轮顺序组合拍卖机制,分为层次分析法排序、任务投标、获胜者决策3个阶段。

2 系统模型

2.1 系统分析

考虑一个车辆自组织网络,其中车辆可以通过

蜂窝系统与邻近车辆、路边单元(RSU)进行通信来接收最新的道路信息,部署有 L 个服从泊松分布的请求车辆,表示为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_L\}$,由于提供服务的车辆和RSU具有相同的通信性质,统一定义为服务节点,表示为 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_M\}$,每个服务节点 g_i 都配备有限计算资源和无线资源,资源状态为 $\{C_i, B_i\}$, C_i 和 B_i 分别表示服务节点 g_i 所具有的计算资源和带宽资源。在服务节点通信范围内的请求车辆可以卸载任务到服务节点来为其服务,模型中没有核心调度器,任务卸载的调度由服务节点来完成。系统模型如图1所示。

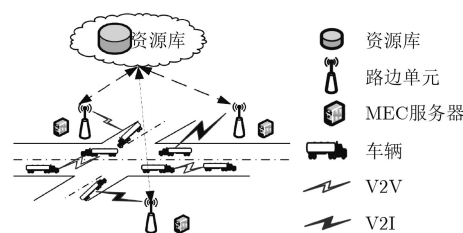


图1 系统模型图

计算任务可以由车辆利用自身资源进行本地执行,也可以以V2I形式通过RSU卸载到MEC服务器执行,或者以V2V形式卸载到周边车辆,共分为 S 类,表示为 $N = \{n_1, n_2, \dots, n_s\}$,请求车辆发布第 k 种任务的概率为 ρ_k ,且满足 $\sum_{k=1}^S \rho_k = 1$,每种任务请求的资源组合不同,任务 n_i 表示为 $T_i = \{c_i, b_i\}$, c_i 表示完成任务所需要的CPU周期数, b_i 表示传输任务所需带宽。

每一辆车请求的任务对于每一个因素(如价格、误码率、平均重传次数)的重视程度不同,而服务节点提供资源时也会受到这些因素影响。为了得到最优选择,需要确定请求任务对于每个因素的权重系数,进而确定请求节点对于服务节点优先级序值(定义为“满意度”),请求车辆 v_i 对服务节点的满意度表示为 $W^i = \{w_1^i, w_2^i, \dots, w_M^i\}$ 。

车辆和服务节点都满足理性和利己主义。每辆车可以将一些计算任务卸载到服务节点上,并付给服务节点相应的费用。因此,为了使其收入最大化,服务节点分配给请求车辆最佳计算资源(表征为CPU周期数)并确定相应的支付费用。这些服务信息通过无线资源(表征为带宽)与道路上行驶车辆进行通信。

2.2 通信模型

假设分配给每对V2X车辆 (v_i, g_j) b_{ij} 个子载波用于传输。干扰 σ_{ij} 随着 v_i 和 g_j 而变化,为了满足节点的要求,V2X对 b_{ij} 的QoS要求定义为信噪比 γ_{ij} ,表

示为

$$\gamma_{ij} = x_{ij} \frac{p_i h_{ij}}{\sigma_{ij}^2} \quad (1)$$

其中, x_{ij} 为连接变量, 当请求车辆 v_i 与服务节点 g_j 之间建立连接时 $x_{ij} = 1$, 否则为0; p_i 和 h_{ij} 分别表示请求车辆 v_i 发射功率和 v_i 与 g_j 之间信道增益, $h_{ij} = \alpha \beta_{ij} \varsigma_{ij} d_{ij}^{-\varphi}$, 其中 α 为常量系统参数, β_{ij} 为快衰落增益, ς_{ij} 为慢衰落增益, φ 为路径损耗指数, d 表示服务节点和请求车辆之间的距离。

传输速率表示为

$$r_{ij} = b_{ij} \lg(1 + \gamma_{ij}) \quad (2)$$

2.3 计算模型

(1)本地执行: 请求车辆自身具有计算资源 c_0 , 可以在本地执行其计算任务。车辆计算能力用 a_i^l 表示, 本地计算任务执行时间为

$$t_i^l = \frac{c_i}{a_i^l} \quad (3)$$

计算能耗 $E_i^l = \xi c_i$, ξ 代表每单元计算任务所消耗的能量。

(2)远端执行: 车辆将任务卸载到邻近车辆或MEC服务器的计算过程中, 车载终端会产生一定的成本, 包括时延和能耗。时延包括任务输入时延, 任务计算时延, 计算结果回传时延(计算结果数据量很小, 通常忽略^[11]), 表示为

$$t_i^c = \frac{d_{ta}}{r_{ij}} + \frac{c_i}{a_i^c} + \frac{d_{re}}{r_{ij}} \quad (4)$$

a_i^c 表示远端服务节点的计算能力, 能量消耗 $E_i^c = d_{ta} p_{up} + c_i p_c + d_{re} p_{dn}$, d_{ta} 和 d_{re} 表示任务数据大小和结果数据大小, p_{up} , p_c 和 p_{dn} 分别表示上传请求数据、远端执行、接收计算结果时单位能耗。在本文中, 默认任务本地计算时延大于卸载到远端执行时延, 即 $t_i^l > t_i^c$, 因此车辆的任务全部进行卸载。

3 基于层次分析法(AHP)组合拍卖模型

3.1 层次分析法

根据车辆所处环境和请求任务类型, 本文选择价格、误码率、平均重传次数作为评判因素, 层次可以依据请求任务对于每个因素的权重系数, 确定请求节点对于服务节点优先级序值(“满意度”), 达到最优化选择。下面详细描述基于AHP的满意度分析过程。

(1)建立层次结构模型: 通过将问题分解为目标层, 准则层, 方案层来解决具有多个指标复杂决策问题。本文建立的层次结构模型如图2所示。

(2)构造判断矩阵: 首先, 将指标之间相互比较, 判断其对于目标层重要程度, 即各个标准的权

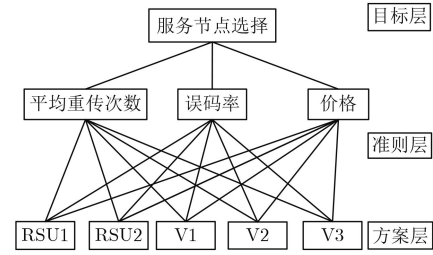


图2 层次分析法结构模型图

重。之后, 对于每个指标, 方案层之间进行两两比较, 得到指标的局部权重。准则层判断矩阵 $M = \{m_{ij}\}$, 元素 m_{ij} 表示第 i 个指标相比于第 j 个指标的重要程度。关于 m_{ij} 通常以1~9作为标度得到最优结果, 见表1。

(3)计算权重: 本文使用特征向量法求解权重, 计算判断矩阵最大特征值 λ_{max} 以及最大特征值对应特征向量, 将特征向量归一化就得到各个权重。通过将每个元素的局部权重与相应指标权重相乘, 就得到最终权重, 即满意度。

(4)一致性检验: 由于判断矩阵主观性, 通常不全满足一致性, 因此使用一致性比率CR检测判断错误, CR为一致性指数CI与平均随机一致性指标RI比值。

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n - 1) \quad (5)$$

$$CR = CI/RI \quad (6)$$

其中, n 是指标数量。RI的值如表2所示。

表1 判断矩阵中标度及含义

	相等	较强	强	很强	绝对强
m_{ij}	1	3	5	7	9

表2 平均随机一致性指标RI

n	1	2	3	4	5	...
RI	0	0.58	0.90	1.12	1.24	...

注: 当判断矩阵小于等于15阶时, 平均随机一致性指标RI可由查表得到; 当阶数大于15时, RI可由参考文献^[12]中乘法得到。

3.2 问题形成

服务车辆周期性广播其状态, 请求车辆通过无线广播掌握服务节点信息。请求车辆发布请求信息给可以增加其效益的服务节点, 定义请求车辆 v_i 卸载任务到服务节点 g_j 时效益如式(7):

$$u_i = w_k^i \left\{ \mu \frac{c_i}{c_0} \ln(\tau D_{ij} + \theta) + (1 - \mu) e_0 D_{ij} - p_{ij} \right\} \quad (7)$$

其中, w_k^i 表示请求车辆效益与满意度有关。括号里第1项表示卸载任务所节约的计算资源效益, 第2项表示在远端执行计算任务所节约的计算资源效

益增益, $p_{ij} = p_{ij}^c + p_{ij}^b$ 表示 v_i 支付给 g_j 的费用。 μ 为卸载因子, 且 $0 < \mu < 1$, τ 和 θ 为系数, e_0 为请求车辆定义的单位资源价格, 表示请求车辆对请求资源的喜好程度。 $D_{ij} = c_i + b_i$ 表示车辆 v_i 在服务节点 g_j 处得到的资源总和。 在这里, 因为CPU周期数与带宽属于不同数量级, 因此我们采用数据均一化的形式将其大小表示为所占各自总资源百分比的形式, 然后进行求和。

优化目标是在系统需求和时延约束下, 提高请求车辆效益的同时, 最大化服务节点的效益。 规划问题如式(8):

$$\begin{aligned} \max U_j = & \sum_{v_i \in V, g_j \in G, \rho_k \in N} \sum_{i=1}^L \rho_k (p_{ij} - \varphi D_{ij}) \\ \text{s.t. C1: } & \sum_{i=1}^L x_{ij} c_i \leq C_j, v_i \in V, g_j \in G \\ \text{C2: } & \sum_{i=1}^L x_{ij} b_i \leq B_j, v_i \in V, g_j \in G \\ \text{C3: } & r_{ij} \geq \varepsilon \\ \text{C4: } & t \leq t_{\max}^c \\ \text{C5: } & \sum_{i=1}^L x_{ij} \leq 1, v_i \in V, g_j \in G \\ \text{C6: } & \mu \frac{c_i}{c_0} \ln(\tau D_{ij} + \theta) + (1 - \mu) e_0 D_{i,j} \\ & \geq p_{ij}, v_i \in V, g_j \in G \end{aligned} \quad (8)$$

其中, φ 表示服务节点定义的单位资源价格, ρ_k 表示接入第 k 种类型请求任务的概率。 约束条件C1和C2分别表示服务节点 g_j 可提供的计算资源和无线资源有限; C3为传输速率要求, ε 为传输速率最低门限; C4为时延要求, 整个卸载过程总时延不可大于 t_{\max}^c ; C5表示一个请求车辆最多由一个服务节点服务, 一个服务节点可以服务多个车辆; C6保证车辆卸载任务到服务节点时效益不会降低。

3.3 估价和投标价格

每个请求车辆对自己请求的资源有一个估值, 反映车辆对资源的偏好。 定义计算资源和无线资源的估值函数为CPU周期数和带宽的线性函数。

$$\left. \begin{aligned} \frac{z_i^c(x)}{x} = \frac{z_i^c(y)}{y}, \quad \forall v_i \in V \\ \forall x, y \in \{1, 2, \dots, C_i\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中, $z_i^c(x)$, $z_i^c(y)$ 分别表示请求车辆 v_i 对 x 和 y CPU周期的估值。 为了更加理性地表示出估值函数, 加入满意度, 因此请求车辆 v_i 对第 k 种任务的计算资源估值为

$$z_i^c(x) = w_k^i e_{\max}^c x \quad (10)$$

其中, e_{\max}^c 为请求车辆 v_i 愿意支付的最大单位计算资源价格。 同理, 请求车辆 v_i 对第 k 种任务的无线资源估值为

$$z_i^b(x) = w_k^i e_{\max}^b x \quad (11)$$

其中, $z_i^b(x)$ 表示请求车辆 v_i 对 x 带宽估值, e_{\max}^b 为请求车辆 v_i 愿意支付的最大单位无线资源价格。

综上所述, 请求车辆 v_i 发布第 k 种任务请求时, 对请求资源 $\{x, y\}$ 的估值为

$$z_i(x, y) = w_k^i (e_{\max}^c x + e_{\max}^b y) \quad (12)$$

本文采用增价拍卖, 最初投标价格为资源估值的一半。

4 多轮顺序组合拍卖机制

建模系统模型为组合拍卖模式, 主要由4个因素构成: 卖家、商品、买家、决策者。 在这里, 卖家为拥有一定资源的服务节点, 买家为请求车辆, 打算购买商品——组合资源执行任务, 决策者为服务节点, 决定获胜车辆以及获胜车辆需要支付给服务节点的金额。 组合拍卖模型如图3所示。

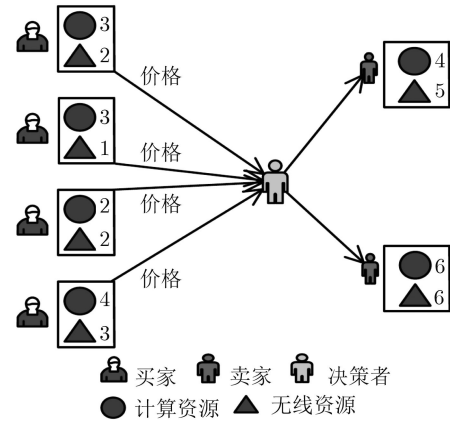


图3 拍卖模型图

拍卖模型可以找到请求车辆和服务节点之间的有效匹配问题。 拥有计算和无线资源的服务节点想要将这些资源出租请求车辆, 而请求车辆打算从服务节点处购买资源并完成任务计算。 当一个服务节点和一个请求车辆建立匹配后, 请求车辆应该向服务节点支付费用, 付款由服务节点决定, 因此建模卸载模型为组合拍卖形式。

4.1 机制提出

当服务节点确定自己有足够的异构资源为请求车辆提供服务并经计算确定自己效益后, 拍卖交易才成立。 请求车辆得到服务的同时, 付给服务节点相应的费用。 整个匹配机制如表3算法1所示。

表3 多轮顺序组合拍卖卸载机制

算法1 多轮顺序组合拍卖卸载机制

```

(1)输入: 车辆i的请求信息为 $\{c_{ij}, b_{ij}, p_{ij}^c, p_{ij}^b\}$ , 服务节点j的状态
 $\{C_j, B_j\}$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, L\}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, M\}$ ,
满意度序值  $W^i = \{w_1^i, w_2^i, \dots, w_M^i\}$ 
(2)输出: 连接矩阵 $\mathbf{X}$ , 效益  $U_M(j)$ , 未投标矩阵  $\mathbf{F} = \{v_1, v_2, \dots, v_f\}$ 
且  $0 \leq f \leq L$ 
(3) for  $r = 1 : M$ 
(4)   for  $i = 1 : f$  do
(5)     for  $j = 1 : M$  do
(6) AHP计算 $\mathbf{F}$ 中各元素对 $g_j$ 排序, 根据排序顺序地发布请求信息;
服务节点权衡与各请求车辆通信距离确定服务顺序
(7)       end for
(8)     end for
(9)   for  $j = 1 : M$  do
(10)       $U_{\text{temp}} = \sum_{j=1}^M U(j)$ ;
(11)    for  $i = 1 : f$  do
(12)       $(U(j), F, X) = \text{Knapsack}(\{c_{ij}, b_{ij}, p_{ij}^c, p_{ij}^b\}, \{C_j, B_j\})$ ;
(13)       $U_M = U_{\text{tp}} + U(j)$ ;
(14)    end for
(15)  end for
(16) for  $k = 1 : f$  do
(17)   if  $p_{kj}^c \leq z_i^c$  then
(18)      $p_{kj}^c = p_{kj}^c + \eta p_{kj}^c$ 
(19)   end if
(20)   if  $p_{kj}^b \leq z_i^b$  then
(21)      $p_{kj}^b = p_{kj}^b + \eta p_{kj}^b$ 
(22)   end if
(23) end for

```

定义拍卖的最高轮次即服务节点个数为 M , 请求车辆每轮首先利用层次分析法进行满意度计算进而确定发布任务的优先级(步骤4—步骤8); 然后他们顺序地将资源要求和投标价格提交给通信范围内的服务节点, 在接收到来自请求车辆的矢量信息之后, 服务节点执行获胜者决策步骤: 检查其本地无线和计算资源并计算自己效益, 在该步骤中, 运用多维分组背包算法(算法2)确定允许由服务节点 g_j 服务的请求车辆 v_i (步骤9—步骤15)。在每轮拍卖中, 具有较低出价的一些请求车辆将添加到未投标矩阵 \mathbf{F} (没有得到匹配请求车辆集合)中, 为了使自身具有竞争力, 未投标矩阵中请求车辆将在下一轮提高竞标价格(步骤16—步骤22)。整个机制过程满足拍卖的3个性质: 个人理性、预算均衡、用户诚实。

多轮顺序组合拍卖卸载机制进行详述如下:

(1)层次分析法排序: 通过量化各个要素来建

立如图2所示层次化模型, 通过层次分析法得到请求车辆 v_i 对服务节点的优先级排序为 $W^i = \{w_1^i, w_2^i, \dots, w_M^i\}$ 。

为了使服务节点效益达到最大, 服务节点之间需要排序, 在本文中使用距离平均法进行判断: 服务节点计算与请求车辆之间的距离, 然后将距离取平均值, 最后依据取得的平均值依次服务。

(2)任务投标: 请求车辆顺序发布请求任务给服务节点, 服务节点接受到请求信息后, 使用多维分组背包算法决定为哪些车辆服务。这一轮即当前服务节点处没有得到服务的车辆会并入未投标矩阵, 这些车辆下一轮继续进行排序, 然后投标任务。为了增加竞争性, 他们会按照一定的梯度进行加价。

(3)获胜者决策: 服务节点 g_j 接收到多个车辆的请求信息后, 需要在资源有限情况下, 选择请求车辆进行服务, 使自己效益达到最大。而请求车辆得到服务的同时需要付费给服务节点, 请求车辆接收到服务节点可以为其服务的信息后, 需要判断自身效益, 如果效益降低, 则本轮放弃任务卸载。

当未投标矩阵中请求车辆 $\mathbf{F} = \{v_1, v_2, \dots, v_f\}$ 向资源状态为 $\{C_j, B_j\}$ 的服务节点 g_j 发布任务卸载请求 $\{c_{ij}, b_{ij}, p_{ij}^c, p_{ij}^b\}$ 时, 首先判断第1个请求车辆是否卸载, 如果是, 即 $x_{1j} = 1$, 则问题转变为最大服务节点容量 $\{C_j - c_{1j}, B_j - b_{1j}\}$ 问题, 如果不是, 则问题是容量为 $\{C_j, B_j\}$ 多维分组背包问题, 得到最优决策。将匹配问题定义为背包问题, 这里使用动态规划法来判断第*i*个车辆是否进行卸载, 思路如下:

阶段*i*: 在前*i*辆请求车辆中, 选取若干辆车进行卸载;

状态: 在前*i*辆请求车辆中, 选取若干辆车将任务卸载到所剩容量为 $\{C_j, B_j\}$ 的服务节点使服务节点效益最大;

决策: 第*i*辆请求车辆是否卸载, 可以写出动态转移方程:

$$U_j(i, j, c, b) = \max \{ U_j(i, j-1, c, b), U_j(i, j-1, c - c_{ij}, b - b_{ij}) + p_{ij} \} \quad (13)$$

算法2伪代码如表4所示。

4.2 复杂度分析

算法1中步骤9—步骤15时间复杂度为 $L(C+B)$, 为多项式时间, 步骤4—步骤8时间复杂度为 fM , 而加价部分复杂度(步骤16—步骤22)为 f^2 , f 随着迭代次数的增加逐渐减少至零。综上所述, 算法1时间复杂度为 $O(fM^2 + Mf^2)$ 。

表4 多维分组背包算法

算法2 多维分组背包算法	
(1)输入:	车辆 <i>i</i> 的请求信息为 $\{c_{ij}, b_{ij}, p_{ij}^c, p_{ij}^b\}$, 服务节点 <i>j</i> 状态函数 $\{C_j, B_j\}$
(2)输出:	选择矩阵 \mathbf{X} , 效益 $U_j(j)$, 未投标矩阵 \mathbf{F}
(3)	for $c = 1 : C_j$ do
(4)	for $b = 1 : B_i$ do
(5)	$U_j(i, j, c, b) = \max \{ U_j(i, j - 1, c, b), U_j(i, j - 1, c - c_{ij}, b - b_{ij}) + p_{ij} \};$
(6)	If $U_j(i, j, c, b) \leq U_j(i, j - 1, c, b)$
(7)	$x_{ij} = 0;$
(8)	$\mathbf{F} = \mathbf{F} \cup \{j\};$
(9)	else
(10)	$x_{ij} = 1;$
(11)	$\mathbf{F} = \mathbf{F} \cup \{j-1\};$
(12)	end if
(13)	end for
(14)	end for

5 仿真分析

本节在IEEE 802.11p标准规定的车联网络场景和MEC白皮书相关规定进行部署。本文系统中车辆和路边单元半径 $R = 800$ m的区域内随机部署, 每个RSU侧配备一个MEC服务器。子信道数和CPU周期数从[20, 40]随机选取, 子信道最小单位带宽和单位CPU周期分别为15 kHz和5 GHz。请求车辆发射功率为 $P_i = 1.5$ W, 背景噪声 $\sigma_{ij} = -60$ dB。车辆和基站的SNR服从均匀随机分布。对于传播增益 $h_{ij} = \alpha\beta_{ij}s_{ij}d_{ij}^{-\varphi}$, 设定通过损耗常数 α 为 10^{-2} , 路径损耗指数 φ 为4, 多径衰落增益为单位均值指数分布, 阴影增益为对数正态分布, 均值为0和4 dB的偏差。每个服务节点容量设置为[20, 40], 而MEC容量在[60, 200]内随机分配^[13]。总数据类别设置为 $S = 10$ 。

对于计算任务, 数据大小是从[10, 100] kB中随机选择的, 计算任务的CPU周期总数 c_i 是从[20, 100]随机选择。请求车辆对于资源的评估 z_i^c 、 z_i^b , 我们依据式(10)和式(11)得出, 车辆愿意支付的最大单位的计算资源和无线资源价格 $e_{\max}^c = e_{\max}^b = 3$, 初始投标价格是任务估价的一半。

本节首先研究在车联网系统中使用多轮顺序组合拍卖卸载机制解决请求车辆和服务节点匹配问题, 将所提机制与3种算法进行性能比较: 算法2为采用层次分析法未加价机制, 算法3为加价未采用层次分析法机制, 算法4为没有加价也没有层次分析法机制。仿真结果如图4—图8所示。

图4和图5为各个机制下服务节点效益和获胜者数目(每一轮得到服务请求节点数)对比图。此处, 效益为经济效益简称, 如式(8)优化目标所示, 表示服务节点得到请求车辆付于其的费用与自己提供资源所付出代价等效费用的差额。请求车辆数目

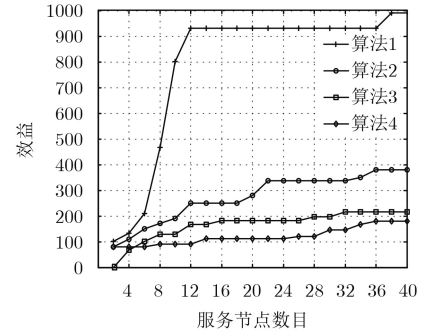


图4 多轮顺序组合拍卖卸载机制效益对比图

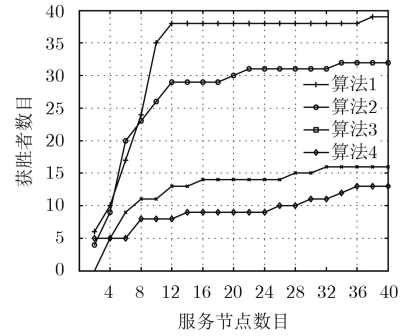


图5 多轮顺序组合拍卖卸载机制获胜者数对比图

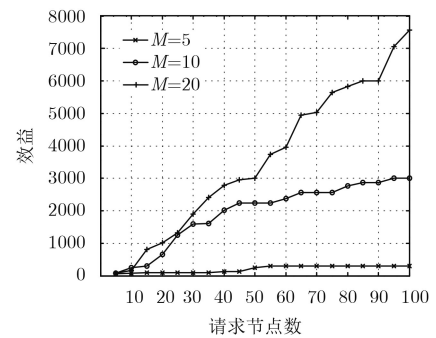


图6 M变化情况下请求车辆数与效益关系图

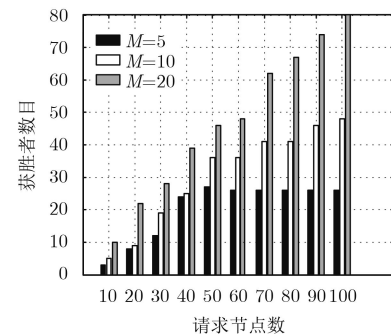


图7 M变化情况下请求车辆数与获胜者数目关系图

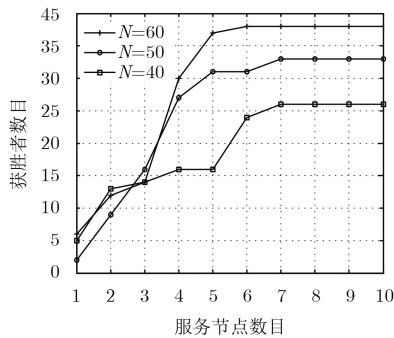


图8 不同请求节点数情况下获胜者数目对比图

$N = 40$, 服务节点数 $M = 40$ 。如图所示, 多轮顺序组合拍卖卸载机制在效益和获胜者方面性能明显优于其它3个机制。

从图4可以看出, 随着轮数增加, 即服务节点数目增加, 得到服务请求车辆数量增加, 4种算法效益均有所增加。算法1中, 当服务节点数增加到 $M = 12$ 时, 曲线变得平缓, 线条越稳定, 原因在于采用满意度分析和加价策略, 大部分请求车辆已得到服务; 算法2每轮顺序发布计算任务到服务节点, 因此每轮都会有少量服务节点得到服务, 但因未增加投标价格, 致使服务节点只是刚好满足收支预算均衡; 算法3因增加投标价格, 车辆得到匹配, 效益就会有明显增加, 但是随机发布请求信息致使每轮得到服务的车辆有限; 算法4随机发布请求任务且投标价格没有增加, 因此效益最低。

每轮服务节点没有提供资源为车辆服务时, 获胜者数目不会增加, 本轮效益等于零, 因此总效益不会增加。故图4和图5曲线增加趋势基本相同。

图6和图7显示服务节点数 $M = 5$, $M = 10$, $M = 20$ 3种情况下, 效益和获胜者数目随请求节点数增加而变化的情况。5个服务节点时, 由于资源容量限制, 至多服务28个获胜者, 因此系统效益也不再增加, 而当服务节点数增加到20, 请求车辆数为100时, 运用所提机制可以使80辆车得到服务, 效益也有很好的提升。如图6所示, 请求节点数不大于45, 服务节点数为10或20时的效益增长趋势相似, 这是因为所提机制可以在资源有限情况下为车辆找到为其服务的最优节点, 实现资源最优配置。

图8显示请求车辆数 $N = 60$, $N = 50$, $N = 40$ 3种情况下, 随着轮数增加, 获胜者数目变化的情况。可以看出, 服务节点数小于4时, 请求节点数目越大, 效益越低, 这是因为受到资源的限制, 请求节点之间存在资源竞争, 得到服务数反而较少。当服务节点数大于等于7时, 3种情况下满足约束条件的请求节点已分配完毕, 即使服务节点数增加, 获胜者数目也不会变化, 算法得到收敛。

6 结论

本文研究了车联网系统中基于MEC的任务卸载问题。构建了部署多个请求车辆多个服务节点卸载模型, 考虑到资源有限性、异构性和任务多样性, 建模卸载模型为基于组合拍卖的匹配模式。提出多轮顺序组合拍卖机制, 将匹配问题等效为多维分组背包问题并用动态规划法得到最优匹配。仿真结果显示提出的机制可以在满足时延、容量限制情况下, 保证请求车辆效益同时最大化服务节点效益。

参考文献

- [1] XU Lida, HE Wu, and LI Shancang. Internet of things in industries: a survey[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(4): 2233–2243. doi: [10.1109/TII.2014.2300753](https://doi.org/10.1109/TII.2014.2300753).
- [2] YU Rong, DING Jiefei, HUANG Xumin, et al. Optimal resource sharing in 5G-enabled vehicular networks: A matrix game approach[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(10): 7844–7856. doi: [10.1109/TVT.2016.2536441](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2536441).
- [3] SALAHUDDIN M A, AL-FUQAHA A, and GUIZANI M. Reinforcement learning for resource provisioning in the vehicular cloud[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2016, 23(4): 128–135. doi: [10.1109/MWC.2016.7553036](https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7553036).
- [4] ABUELELA M and OARIUL S. Taking VANET to the clouds[C]. International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia, Paris, France, 2010: 6–13.
- [5] HAN Guangjie, LIU Li, CHAN S, et al. HySense: A hybrid mobile crowdSensing framework for sensing opportunities compensation under dynamic coverage constraint[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(3): 93–99. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600658CM](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600658CM).
- [6] CHEN Xu, JIAO Lei, LI Wenzhong, et al. Efficient multi-user computation offloading for mobile-edge cloud computing[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(5): 2795–2808. doi: [10.1109/TNET.2015.2487344](https://doi.org/10.1109/TNET.2015.2487344).
- [7] ZHANG Ke, MAO Yuming, LENG Supeng, et al. Energy-efficient offloading for mobile edge computing in 5G heterogeneous networks[J]. *IEEE Access*, 2017, 4: 5896–5907. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2597169](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2597169).
- [8] ZHANG Ke, MAO Yuming, LENG Supeng, et al. Optimal delay constrained offloading for vehicular edge computing networks[C]. IEEE International Conference on Communications, Paris, France, 2017: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2017.7997360](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7997360).
- [9] ZHANG Ke, MAO Yuming, LENG Supeng, et al. Predictive

- offloading in cloud-driven vehicles: Using mobile-edge computing for a promising network paradigm[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2017, 12(2): 36–44. doi: [10.1109/MVT.2017.2668838](https://doi.org/10.1109/MVT.2017.2668838).
- [10] LI Liang, LI Yunzhou, and HOU Ronghui. A novel mobile edge computing-based architecture for future cellular vehicular networks[C]. *Wireless Communications and Networking Conference*, San Francisco, USA, 2017: 1–6. doi: [10.1109/WCNC.2017.7925830](https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925830).
- [11] DENG Maofei, TIAN Hui, and LIU Xinchun. Adaptive sequential offloading game for multi-cell mobile edge computing[C]. *International Conference Telecommunications*, Thessaloniki, Greece, 2016: 1–5. doi: [10.1109/ICT.2016.7500395](https://doi.org/10.1109/ICT.2016.7500395).
- [12] 洪志国, 李焱, 范植华, 等. 层次分析法中高阶平均随机一致性指标(RI)的计算[J]. *计算机工程与应用*, 2002, 38(12): 45–47. doi: [10.3321/j.issn:1002-8331.2002.12.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:1002-8331.2002.12.017).
- HONG Zhiguo, LI Yan, FAN Zhihua, *et al.* Calculation on high-ranked RI of analytic hierarchy process[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 38(12): 45–47. doi: [10.3321/j.issn:1002-8331.2002.12.017](https://doi.org/10.3321/j.issn:1002-8331.2002.12.017).
- [13] TANG Ling, CHEN Xu, and HE Shibo. When social network meets mobile cloud: a social group utility approach for optimizing computation offloading in cloudlet[J]. *IEEE Access*, 2017, 4: 5868–5879. doi: [10.1109/ACCESS.2016.2611602](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2611602).
- 张海波: 男, 1979年生, 副教授, 研究方向为移动边缘计算.
栾秋季: 女, 1995年生, 硕士生, 研究方向为移动边缘计算.
朱江: 男, 1977年生, 教授, 研究方向为认知无线电、移动通信.
贺晓帆: 男, 1985年生, 助理教授, 研究方向为无线资源管理.