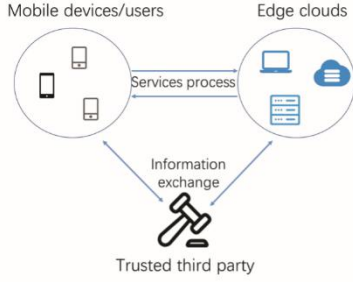


# Incentive Mechanism for Edge Cloud Profit Maximization in Mobile Edge Computing

Quyuan Wang, Songtao Guo, Ying Wang, and Yuanyuan Yang

## 系统模型

### A. Network Model



组成:

edge clouds: 包括固定边缘网关和一些资源丰富的移动电话 (资源提供者 RP)

mobile devices/users

trusted third party

RP  $i$  的资源状态表示为  $(f_i, W_i)$ ,  $f_i$  和  $W_i$  是 RP  $i$  拥有的时钟频率和信道带宽。

用户  $j$  的任务用  $(f_j, d_j, C_{y_j})$  表示。其中  $f_j$  是用户  $j$  的时钟频率,  $d_j$  表示加载任务的数据大小,  $C_{y_j}$  是计算任务的总 CPU 周期。

### B. Computing Model

1) 本地执行任务: 执行时间为  $T_{j,l} = \frac{C_{y_j}}{f_j}$ , 能耗为  $E_{j,l} = \kappa C_{y_j} f_j^2$

2) 加载到边缘云执行: (PR 由多个资源丰富的移动设备组成)

时间 = 计算时间 (同本地执行相似) + (加载任务到边缘云) 传输延迟  $T_{i,j} = \frac{d_j}{r_i} + \frac{C_{y_j}}{f_i}$

能耗 = 计算能耗 + 传输能耗  $E_{i,j} = (\frac{d_j}{r_i})P_j + \kappa C_{y_j} f_i^2$

$$r_i = W_i \log_2(1 + \frac{P_j H_{ji}}{N})$$

### C. Auction Model

拍卖理论组成: 卖方 (RP)、买方 (user) 和拍卖商 (trusted third party)

拍卖商: 计算能力强大的中央云、认证的边缘云, 专业拍卖机构等 (值得信赖的第三方)

RP  $i$  向拍卖商提交其对用户任务  $B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ij}\}$  的出价。  $b_{ij} \in B_i$  表示

RP  $i$  对用户  $j$  加载的处理任务的出价, 所有卖家的所有出价表示为:  $\mathcal{B} = \bigcup_{i=1}^I B_i$

由于每个用户任务的完成时间和能耗可能不同, 对不同任务的出价可能不同。

流程: 1. 拍卖商需要收集用户任务的信息, 包括数据大小、CPU 周期等。

2. 拍卖商发起拍卖, 并收到卖方要求的出价 (每个卖方的出价保密)。

3. 根据出价和信息, 拍卖商根据拍卖机制确定价格, 并将卖家与买家进行匹配。

## 非竞争环境下的激励机制

### A. Problem Formulation

profit-maximization 的目标: 确定 service (即 RPs 的时钟频率) 和相应的价格以实现 RP 的最大利润。

RP 的利润表示为:  $\Pi_{ij} = R_{ij}(f_i) - C_{ij}(f_i, W_i)$

$R_{ij}(f_i)$  是关于  $f_i$  的总收入,  $C_{ij}(f_i, W_i)$  是关于  $f_i$  和  $W_i$  的总成本。

成本方面: 总成本 (RP 在执行任务时所花费的费用) = 可变成本 (能耗经济成本+时间经济成本) + 固定成本 (带宽经济成本)

$$C_{ij}(f_i, W_i) = p_e \kappa C_{y_j} f_i^2 + p_t \frac{C_{y_j}}{f_i} + p_w W_i \quad (p_e, p_t, p_w \text{ 分别为单位能耗、时间和带宽的经济成本})$$

收入方面: 经济学中, 需求曲线描述了某种商品的价格与消费者愿意购买的商品数量之间的关系。本文用一条直线来表示经济学中的需求曲线, 并使用线性函数来反映 RP 的收入。

RP  $i$  向用户  $j$  收取的费用 = 固定连接价格  $\alpha$  + 按使用的资源单位收取的价格  $\beta$

$$R_{ij}(f_i) = \alpha + \beta f_i$$

用户  $j$  的 QoE(用户体验): 将任务卸载到边缘云上而获得的收益

$$O_{ij} = p_e(E_{j,l} - E_{i,j}) + p_t(T_{j,l} - T_{i,j}) - \eta R_{ij} \quad (\eta \text{ 是权重, 表示用户更注重性能或价格})$$

**profit-maximization problem:**

$$\text{OPT-1: } \max \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \Pi_{ij} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (R_{ij}(f_i) - C_{ij}(f_i, W_i))$$

Subject to  $(\forall i \in \{1, 2, \dots, I\} \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, J\})$  **C1:** RP  $i$  匹配的用户  $j$  的利润大于总成本。

$$\text{C1} : \Pi_{ij} > 0$$

**C2:** 如果用户  $j$  的增益小于阈值  $U_0$ , 则用户不能将任务加载到边缘云上。

$$\text{C2} : O_{ij} - U_0 \geq 0$$

## B. Problem Solving and Algorithm Design

Theorem 1: The optimization problem OPT-1 is **concave** with respect to the optimization variables  $f_i$ . Theorem 1 demonstrates that the problem OPT-1 has a zero duality gap and satisfies the Slaters constraint qualification. Thus we can employ the **convex method** to solve this problem. OPT-1 的 Lagrange 函数为

$$L(f_i, \theta, \omega) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (R_{ij}(f_i) - C_{ij}(f_i, W_i)) + \theta((R_{ij}(f_i) - C_{ij}(f_i, W_i)) + \omega((O_{ij} - U_0))$$

根据 KKT 条件, 最佳 CPU 时钟频率为

$$f_i^* = u + v - \frac{1}{3}\gamma_1 \quad (12)$$

$$\text{where } u = \sqrt[3]{\frac{-m+\sqrt{\Delta}}{2}}, v = \sqrt[3]{\frac{-m-\sqrt{\Delta}}{2}}, \gamma_1 = -\frac{2X(1+\theta+\omega)}{\beta(1+\theta-\omega\eta)}$$

and  $X = p_e \kappa C y_j$  and  $Y = p_t C y_j$ .

算法分析: 时间复杂度  $\mathcal{O}(J * \text{Iter}_{\max})$ , 其中  $\text{Iter}_{\max}$  表示最大迭代次数。

## 非竞争环境下的激励机制

### A. Problem Formulation

RP-users 匹配矩阵:  $A = \{a_{ij}\}_{I \times J}$ , 其中  $a_{ij} \in \{0, 1\}$ , 表示 RP  $i$  是否中标用户任务  $j$ , 如果 RP  $i$  中标并服务于用户  $j$ , 则  $a_{ij}=1$ , 否则  $a_{ij}=0$ 。

如果允许用户  $j$  的任务在 RP  $i$  上执行, 则用户应将  $p_{ij}$  支付给 RP  $i$ 。利润表示为:

$$U_{ij} = a_{ij}(p_{ij} - C_{ij}(f_i, W_i))$$

**profit-maximization problem:**

$$\text{OPT-2: } \max \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J U_{ij} = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J a_{ij}(p_{ij} - C_{ij}(f_i, W_i)) \quad (14)$$

Subject to  $(\forall i \in \{1, 2, \dots, I\} \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, J\})$

$$\text{C1} : \sum_{i=1}^I a_{ij} \leq 1, \forall j \in \{1, 2, \dots, J\}$$

$$\text{C2} : a_{ij} f_i \leq f_j, \forall i \in \{1, 2, \dots, I\}$$

目标: 使资源提供者的效用之和最大化

**C1:** 每个任务最多只能由一个 RP 服务。

**C2:** 用户所需的资源总量不应超过边缘云所拥有的资源总量。

### B. Auction Mechanism

**PMMRA 机制流程:**

用户向拍卖方提交资源需求

拍卖方根据拍卖方提供的广播信息提交报价

拍卖人收到竞拍信息后, 进行以下操作: 用户匹配、计算资源检查、实用程序计算。

最后, 当确定匹配矩阵时, 拍卖人根据匹配确定最终价格

### 有效的拍卖机制的性质:

- **Individual rationality:** 在拍卖模型中,  $i \in \{1, 2, \dots, I\}$  的  $U_{ij} \geq 0$ 。
- **Efficiency:** 拍卖算法包括投标策略、用户匹配和支付确定, 应为多项式时间复杂度。
- **Incentive compatibility:** 投标书应该是真实的, 即  $b_{ij} = C_{ij}$ 。

在拍卖机制中, 竞价策略、用户匹配和支付决定起着重要的作用。

**Bidding strategy:** 衡量哪个卖方更适合买方的标准。

**User matching:** 决定边缘云可以为哪个用户提供服务。

**Payment rule determination:** 旨在计算用户支付给资源提供商的最终价格。

---

#### Algorithm 1 PMMRA algorithm

---

**Input:**  $\bar{J}, \bar{B}$ ;

**Output:** The optimal matching matrix  $A^* = \{a_{ij}\}_{I \times J}$ , the optimal final price  $p_{ij}$ .

```
1: Initialize:  $a'_{ij} = 0$  for  $\forall i, j$ ,  $\bar{J} = \emptyset$ ,  $\bar{B} = \bigcup_1^J B_i$ 
2: while  $\bar{J} \neq \mathcal{J}$  do
3:   for  $j=1$  to  $J$  do
4:     Calculate  $\gamma_{ij}$  for each  $b_{ij}$  by Eq. (15);
5:     Select the bid  $b_{ij}$  with the smallest  $\gamma_{ij}$ ;
6:     Set  $a_{ij} = 1$ ;
7:     if  $b_{ij}$  makes the constraints C1 and C2 unsatisfied
       then
8:       Remove the bid  $b_{ij}$ ;
9:     end if
10:    Set  $\bar{B} = \bigcup_1^J B_i \setminus b_{ij}$ ;
11:    Select the sub-optimal bid  $b'_{ij}$ ;
12:    Set  $a'_{ij} = 1$  and  $p_{ij} = b'_{ij}$ ;
13:   end for
14:   for  $i=1$  to  $I$  do
15:     if  $\sum_1^J a_{ij} > 1$  then
16:       Calculate  $\zeta_{ij}$  by Eq.(16);
17:       The seller chooses the buyer with biggest  $\zeta_{ij}$  to
         serve;
18:       The remaining buyers enter the loser group;
19:     end if
20:   end for
21: end while
```

---

## 实验

### A. Simulation Setting

边缘云数量: 3 - 10

用户数量: 5 - 25

CPU 时钟频率: 1GHz - 1.5GHz

传输功率: 257 - 325 mW

背景噪声: -50dBm

信道增益  $H_{ji} = D^{(-\delta)}$ , 其中  $\delta=4$  是路径损耗因子,  $D$  是用户与边缘云之间的距离

总带宽: 10 - 20 Mbps

$C_{\{y_j\}}$ : 200 - 2000 Mega cycles

$d_j$ : 10 kB - 1 MB

### B. Performance on Individual Rationality

投标和最终付款之间的关系

X: 用户数量

Y: the bids and payments

result: PMMRA 机制是 individual rationality

PMMRA 机制不仅满足了用户的需求, 而且最大化了资源提供者的利益

### C. Comparison of Different Strategies

1) 对比: Chen 算法 (将充装决策问题归结为一个多用户的充装博弈问题, 通过设计一个分布式算法来最大化充装用户的数量)

不同 RPs 和可变用户的性能比较

X: 用户数量

Y: 卸载任务数

Result: PMMRA 机制在任何系统中都更具可扩展性, 并且不会因为用户之间的干扰而减少卸载任务的数量

2) 对比: Zhang 的算法 (将匹配问题归结为效用最大化问题, 采用组合拍卖的方法求解匹配问题)

X: 用户数量

Y: utility

Result: PMMRA 机制在个体 (每个 RP 的效用) 和整体 (所有 RP 的效用) 方面都优于 Zhang 的算法