

考虑协作方双重身份的数据协作下载激励机制^①

陈 晓^{②*} 刘 敏^{③*} 周雅琴^{***} 李忠诚^{*}

(* 中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

(** 中国科学院大学 北京 100049)

(*** Singapore University of Technology and Design, ISTD, Singapore 487372)

摘 要 研究了移动无线网络数据的协作下载。为了鼓励资源有限的移动用户参与协作下载,针对多任务数据下载场景,利用协作用户既可作数据出售者也可作数据请求用户的合作者的双重身份,同时考虑协作用户差异化的服务质量,基于拍卖理论设计了一种新颖的数据协作下载激励机制,该机制能够激励并选择合适的协作用户完成数据下载任务。仿真实验表明,这种激励机制的性能优于忽略协作用户双重身份的激励机制,有效提高了协作用户的服务质量、请求用户获得的效用和社会福利。

关键词 激励机制, 协作下载, 拍卖理论, 任务分配, 用户选择

0 引 言

数据协作下载应用是希望获得互联网数据的移动用户,通过其他移动用户的数据转发,间接地获得网络数据的应用。这类应用不仅可以使无法上网的移动用户获得数据,而且能够弥补移动网络运营商提供移动数据服务的缺陷,实现移动用户和移动运营商之间的“双赢”。然而,由于移动用户的移动设备的存储空间、计算资源以及电池电量等资源都非常有限,很少有用户自愿无偿地帮助其他用户下载并转发数据。解决这一难题的一种有效方法是设计激励机制来鼓励用户参与数据协作下载。拍卖理论被广泛用于激励机制中,比如发布任务的移动用户通过支付一些奖金的方式,激励其他用户成为任务的协作用户完成其请求的任务^[1-6]。在以往的研究中,协作用户只被作为服务出售方。然而在数据协作下载应用中,协作用户会对发布的任务产生一定的兴趣,也就是说,需要下载的数据对协作用户具有

一定的价值。因此,在数据协作下载的应用中,协作用户除了具有数据出售方这一个身份外,又多了一个新的身份,即请求用户的合作伙伴。在数据协作下载应用中,考虑协作用户的双重身份,会给协作用户和请求用户带来很多好处。首先,由于协作用户对需要完成的任务有一定的兴趣,协作用户会自发地努力完成任务,提高完成任务的质量。其次,由于需要完成的数据任务对协作用户有一定的价值,协作用户可以作为请求用户的合作伙伴一起共同分摊完成任务的费用,从而一定程度上降低了请求用户的费用支出。

针对多任务数据下载场景,本文基于协作用户的双重身份——数据的出售方和请求用户的合作者,同时考虑协作用户差异化的服务质量,设计了一个基于组合拍卖的成本分摊激励机制 (Cost Apportionment Incentive based Combinatorial Auctions),简称 CAMCA,以鼓励并选择合适的用户参与数据协作下载。据我们所知,这是第一个针对多任务数据下载场景,基于拍卖理论考虑协作用户的双重身份的

① 国家自然科学基金重点项目(61132001),国家自然科学基金面上项目(61572476)和青年科学基金(61502457)资助项目。
② 女,1988年生,博士生;研究方向:无线协作通信技术,激励机制;E-mail: chenxiao3310@ict.ac.cn
③ 通讯作者,E-mail: liumin@ict.ac.cn
(收稿日期:2015-09-21)

激励机制。本文理论分析了 CAMCA 机制的保护隐私、保证协作用户报价真实和计算高效等优越特性,并通过仿真实验验证了 CAMCA 机制在服务质量、任务完成比例、请求用户的效用以及社会福利等方面都优于不考虑协作用户双重身份的激励机制。

1 相关工作

1.1 协作下载应用

目前,在移动无线网络中协作下载的应用有很多。在文献[7-10]中,在同一时间多个希望观看同一视频的用户,先分别从互联网中下载一部分数据,然后在本地数据共享,从而使每个人获得完整的数据。文献[7-10]认为用户之间是合作式的协作,不需要虚拟货币的支付进行激励,同时协作用户需要与请求用户同时对某个数据完全感兴趣才会进行协作,这个约束条件非常严格。而在本文的机制中,协作用户不要求对数据完全感兴趣,所以本文的机制适用的范围更广。在文献[11]中,能够接入网络的用户通过向不能上网的用户分享带宽,使其能够连接网络,并采用非竞争的方式对可用带宽进行定价与分配。而在本文中,协作用户是采用竞争的方式制定服务质量方案。

1.2 协作应用的激励机制

激励机制的设计通常分为基于声誉的激励机制和基于虚拟货币机制的激励机制,目前多数研究集中在基于虚拟货币的激励机制中。拍卖理论作为博弈论的一个分支,是一种定量分析的方法,常在基于虚拟货币的机制中使用。

在基于虚拟货币的激励机制中,有在 P2P 场景中采用虚拟货币形式设计的激励机制^[12,13]。由于在 P2P 系统中,协作用户提供的是本地已存储的文件资源的上传服务,也就是说协作用户已经获得了请求用户需要的数据,所以协作用户对内容任务不会再有兴趣和需求,因此就不会与请求用户共同分摊成本,所以协作用户和请求用户的策略都与本文有很大不同。在众包应用中,文献[14]对实时到达的任务,选择最优的完成任务用户集合,使用虚拟货币作为协作用户的完成任务的奖励。在移动无线网

络协作下载应用中,文献[15]设计了一个帮助他人下载数据的服务系统,使用虚拟货币和声誉相结合的方式激励用户参与协作下载。文献[14,15]都没有使用拍卖的方式设计激励机制,而且没有考虑到协作用户对任务有兴趣而具有双重身份的特点设计激励机制。

拍卖理论作为博弈论的分支在很多领域的激励机制的设计中被采用。文献[1]采用在线采购拍卖的方式,根据用户的边际价格选择合适的用户缓解云存储数据压力。文献[2]采用在线拍卖的方式,在预算有限的约束下,设计贪心算法,贪心地选择边际价值大于阈值的动态到达的用户参与协作。文献[3]首次根据贝叶斯博弈采用全支付拍卖(all-pay auction)的方式选择用户实现请求平台的收益最大化。文献[4]将用户的参与程度作为其服务质量,根据贝叶斯博弈采用逆向拍卖的方式选择用户集合以达到一定服务质量要求。在文献[5]的以用户为中心的模型中,未考虑协作用户的服务质量,采用了组合拍卖方式设计贪心近似算法选择最优协作用户集合完成任务。

以上这些研究工作都没有考虑协作用户双重身份的特点,而且多数研究工作没有考虑由协作用户完成任务服务质量的不同而带来任务价值差异性的特点。而本文设计的激励机制考虑了协作用户的服务质量和双重身份的特点。

针对数据协作下载应用中请求用户发布单任务的场景,我们的已有工作^[6]基于次级密封得分拍卖机制^[16]设计了一个基于协作用户双重身份的激励机制。本文针对请求用户发布多任务场景,基于传统的组合拍卖机制提出了一个基于协作用户双重身份的激励机制。

2 系统模型

在本文设计的激励机制模型中,有一个数据下载任务的请求用户和多个可提供数据下载服务的候选协作用户 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 其中 $|A| \geq 2$ 。请求用户有一个数据下载任务集合 $T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N\}$, 其中 $|T| \geq 1$, 任务之间是相互独立的。请求

用户把 T 所需求的数据当作任务向周围的移动用户发布,希望通过购买其他移动用户的数据转发服务的方式获得数据。候选协作用户 a_i 是在请求用户周围,且有能力完成一些数据下载任务 $T_i \subseteq T$ 的移动用户。候选协作用户希望以向请求用户提供所需数据的方式获得报酬。当候选协作用户被请求用户选择后,成为完成数据协作下载任务的协作用户。

假设互联网络中的数据内容可以按照不同的主题进行分类,如经济类、体育类和娱乐类等,数据的表现形式上可以是一首歌、一篇文章或是一段视频等。假设任意一个数据 τ_k 有所属的唯一主题 I_{τ_k} 。

候选协作用户对数据内容的模糊兴趣和进行协作服务的成本参数是其私有信息。模糊兴趣是指用户对任意一个主题的数据可以是完全感兴趣或有一些兴趣或完全不感兴趣。本文使用 $\delta_{i\tau_k}$ ($0 \leq \delta_{i\tau_k} \leq 1$) 表示候选协作用户 a_i 对数据 τ_k 的模糊兴趣。 $\delta_{i\tau_k} = 1$ (或 $\delta_{i\tau_k} = 0$) 表示 a_i 对数据 τ_k 完全(或不)感兴趣, $0 < \delta_{i\tau_k} < 1$ 表示 a_i 对数据 τ_k 有一定兴趣。 a_i 根据自身对任务集合的兴趣 $\Delta_i = \{\delta_{i\tau_1}, \delta_{i\tau_2}, \dots, \delta_{i\tau_N}\}$ 确定自己意愿完成的任务集合 $T_i \subseteq T$ 。成本参数是表示协作用户完成任务所需要消耗的成本^[16]。候选协作用户 a_i 的成本参数 β_i ($\beta_{\min} \leq \beta_i \leq \beta_{\max}$) 越大,表示 a_i 完成任务的成本越高,完成任务的能力越低。本文假设 a_i 的 β_i 是随时间变化的。

本文认为任务的价值受协作用户完成服务质量的影响。由于数据下载的服务质量可从多个维度综合衡量,如下载速度和丢包率,为不失一般性,本文假设衡量协作用户服务质量的向量 Q 是由 m 个独立的收益型^[17] 服务属性 Q_i 构成。 $q_{i\tau_k} = (q_{i1\tau_k}, q_{i2\tau_k}, \dots, q_{im\tau_k})$ 表示 a_i 对任务 τ_k 提供的服务质量向量。假设 Q_1 表示平均速度,且 Q_1 是请求用户必须考虑的服务质量属性, $q_{i1\tau_k}$ 表示 a_i 对任务 τ_k 提供的平均速度。服务质量属性的类型可分两种,收益型和成本型。收益型属性的效用随属性数值的增加而增加,而成本型属性的效用随属性数值的增加而减少。虽然收益型属性和成本型属性是两个性质相反的属性,但两个属性之间可简单地进行转换,如平均速度就是数据大小除以完成时间。因此,为了方便计算和分析,请求用户考虑在乎的服务属性需要先统一

为收益型属性,然后再进行相关计算。

请求用户对服务质量属性 Q 有独特的要求偏好 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$, 其中 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$, $0 \leq w_i \leq 1$, w_i 表示请求用户对服务属性 Q_i 的偏好。由于不同的请求用户在不同的情况下会对服务质量属性有不同的偏好,本文采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)^[18]、主观赋值法的算数平均特征向量法求解属性权重向量,然后再将权重向量进行标准化形成 w 。本文假设对同一个请求用户而言,一次性发布的所有任务的服务质量属性权重向量相同。

本文假设候选协作用户是信息对称、相互独立以及风险中性的。也就是说每个用户除了自身的私有信息外,其他公共信息是相同的;候选协作用户独立地计算自己的收益,不会和其他用户共谋;候选协作用户计算自己的收益时不用考虑风险,也就是确定性收益就是其期望收益。

针对多任务场景,本文以请求用户自身效用最大化为目标,考虑协作用户双重身份的特点以及服务质量,鼓励和选择用户参与数据协作下载。

3 多任务场景的激励机制设计

在请求用户同时发布多个任务的场景中,即 $T = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N\}$, $|T| \geq 2$, 请求用户希望从候选协作用户集合 A 中选择一个子集作为执行数据下载任务的协作用户集合 $W \subseteq A$ 。本文假设候选协作用户 a_i 的投标任务集合 T_i 不能拆分,即如果 a_i 被选择成为协作用户, T_i 就是其分配的任务集合。

CAMCA 机制的执行步骤主要包括以下三个:(1)请求用户确定并向周围候选协作用户广播协作用户集合的选择规则;(2)候选协作用户 a_i 根据请求用户的选择标准以及自己的私有信息(包括自己对数据内容的模糊兴趣和提供协作服务的成本参数),确定并向请求用户提交自己的投标方案 $\hat{B}_i = (V_i, \hat{b}_i, \hat{l}_i)$, 其中 $V_i = (v_{i\tau_1}, v_{i\tau_2}, \dots, v_{i\tau_N})$ 是 a_i 可完成任务集合 T_i 的服务价值向量, $\hat{b}_i$ 是 a_i 对 T_i 提供的投标价格, $\hat{l}_i$ 为 a_i 的完成任务总时间;(3)请求用

户根据候选协作用户的投标方案,选择一个评价得分最高的协作用户集合 W , 并计算需要向已选择的每个协作用户 $a_i (a_i \in W)$ 的报酬 $\dot{p}_i$ 。

3.1 请求用户确定协作用户选择准则

函数 $\dot{s}$ 是请求用户选择协作用户的规则,请求用户希望选择一个评价得分最高的候选协作用户子集成为协作用户集合 W , 如公式

$$\begin{aligned} \max \quad & \dot{s} = \sum_{\tau_j \in \cup_{a_i \in A} T_i} \max_{a_i \in A} v_{i\tau_j} x_i - \sum_{a_i \in A} \dot{b}_i x_i \\ \text{s. t.} \quad & x_i = \{0, 1\}, \forall i \in A \end{aligned} \quad (1)$$

所示。其中, $v_{i\tau_k}$ 是候选协作用户 a_i 完成任务 τ_k 的服务价值; $x_i = 1$ (或 0) 表示候选协作用户 a_i 是(或否)成为协作用户, 即 $a_i \in W$ (或 $a_i \notin W$)。由于可能存在多个协作用户完成同一个任务的情况, 本文使用协作用户集合 W 中完成该任务的最高服务价值表示请求用户获得的服务价值。

由于服务属性是相互独立的, 候选协作用户 a_i 的服务价值 $v_{i\tau_k}$ 定义如公式

$$v_{i\tau_k} = d_{\tau_k} \sum_{j=1}^m w_j q_{ij\tau_k}^{t_j}, \quad 0 < t_j < 1 \quad (2)$$

所示。其中 d_{τ_k} 表示下载任务 τ_k 的数据大小, $q_{ij\tau_k} (0 \leq q_{ij\tau_k} \leq q_{ij\max})$ 表示协作用户 a_i 的第 j 个服务质量属性的数值, $q_{ij\max}$ 表示 a_i 能提供的服务属性 Q_j 的最大数值。参数 $0 < t_j < 1$ 体现服务质量属性的价值满足经济学中的边际价值递减规律, 即随着服务质量的提高获得的增量是递减的。若协作用户 a_i 的投标任务集合 T_i 不包含任务 τ_k , 则 $v_{i\tau_k} = 0$; 否则, $v_{i\tau_k} > 0$ 。

请求用户将数据下载任务集合 T 、协作用户的服务评价函数以及获胜用户所得报酬的确定方法(在下面的 3.3 节中会介绍)向周围邻居广播, 同时要求协作用户 a_i 提供的投标方案为 $\dot{B}_i = (\forall_i, \dot{b}_i, \dot{l}_i)$ 。

3.2 候选协作用户确定投标方案

候选协作用户 a_i 的预期收益 $\dot{\pi}_i$ 等于 a_i 的预期收入与成本之差, 如公式

$$\dot{\pi}_i = \sum_{\tau_k \in T_i} (\vartheta_{i\tau_k} + b_{i\tau_k} - c_{i\tau_k}) \quad (3)$$

所示。其中, 由于候选协作用户 a_i 具有双重身份, a_i 的完成任务 τ_k 的收入来自两部分, 一部分来自从 a_i 期望从请求用户获得的服务报酬 $b_{i\tau_k}$, 另一部分来自自由自身对数据的模糊兴趣而从获得的满足感

$\vartheta_{i\tau_k}; c_{i\tau_k}$ 是 a_i 完成任务 τ_k 的成本。由于任务是相互独立的, a_i 完成任务集合 T_i 的总收入和总成本可分别由每个任务的收入和成本相加得到。

候选协作用户具有自私理性的特点, 当其预期收益为非负值时才会参与协作。由式(3)可知, 当 $\dot{\pi}_i = 0$ 时, a_i 确定的投标价格是其最低投标价格, 即真实的投标价格。由下文第 4 节的理论分析可知, CAMCA 机制能够保证候选协作用户提供真实的投标价格。因此, a_i 对完成任务集合 T_i 的投标价格 $\dot{b}_i$ 的计算公式为

$$\dot{b}_i = \sum_{\tau_k \in T_i} b_{i\tau_k} = \sum_{\tau_k \in T_i} c_{i\tau_k} / (1 + \delta_{i\tau_k}) \quad (4)$$

为衡量候选协作用户 a_i 从数据 τ_k 中获得的满足感, 即所要下载的数据对协作用户 a_i 的价值, 本文使用 $b_{i\tau_k}$ 作为衡量数据价值的标准。这是因为 $b_{i\tau_k}$ 是 a_i 认为数据 τ_k 对于完全感兴趣的用户(如请求用户)的价值。由于 a_i 对数据 τ_k 有着模糊兴趣 $\delta_{i\tau_k} (0 < \delta_{i\tau_k} < 1)$, 所以 a_i 从该数据获得的满足感 $\vartheta_{i\tau_k}$ 的定义如下式所示:

$$\vartheta_{i\tau_k} = \delta_{i\tau_k} b_{i\tau_k} \quad (5)$$

由于服务质量属性是相互独立的, 候选协作用户 a_i 完成任务的成本 $c_{i\tau_k}$ 可由每个服务属性的成本相加得到^[16], 如公式

$$c_{i\tau_k} = d_{\tau_k} \beta_i \sum_{j=1}^m h_j q_{ij\tau_k}^{k_j}, \quad k_j \geq 1, h_j > 0 \quad (6)$$

所示。其中 k_j 体现边际成本效应; $k_j > 1$ ^[11] 体现边际成本递增效应, 即随着服务属性数值的提高, 服务成本的增量逐渐增加; $k_j = 1$ 体现边际成本恒定不变, 即每单位服务属性提高的成本不变; h_j 表示服务属性的成本系数。

为确定投标方案, a_i 需确定对每个任务提供的服务质量属性数值。由于服务质量属性之间是独立的, 因此每个服务质量最优值可独立确定。本文假设除平均速度服务属性 Q_1 外, 其他服务质量属性的计算数值不受任务执行顺序的影响, 因此计算方法如公式^[6]

$$q_{ij\tau_k}^* = \begin{cases} \left(\frac{t_j w_j (1 + \delta_{i\tau_k})}{k_j h_j \beta_i} \right)^{\frac{1}{k_j - t_j}}, & q_{ij\tau_k} \leq q_{ij\max} \\ q_{ij\max}, & q_{ij\tau_k} \geq q_{ij\max} \end{cases}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

所示。对于 a_i 可完成的每个任务的最优平均速度服务属性 $q_{il\tau_k}^*$, 先使用式(7)确定不受其他任务影响的最优平均速度服务数值, 然后再结合 a_i 的总服务以及任务执行的顺序, 确定最终该任务的最优平均速度服务属性值。如确定用户投标任务集合的算法 1 中所示。

由于候选协作用户 a_i 对请求用户的每个任务都有模糊兴趣, 而 a_i 的服务时间 l_i 有限, 所以 a_i 需要确定投标任务集合 $T_i \subseteq T$, 使自己最有可能被选择为协作用户。由选择协作用户的规则可知, 当 a_i 的投标任务集合具有越高的服务价值和越低投标价格时, 该协作用户越有可能获得投标胜利。由于协作用户对任务的兴趣越高, 其提供的服务价值越高, 相对报价也越低^[6]。因此, CAMCA 机制中, a_i 根据自身对任务的模糊兴趣和服务时间确定投标任务集合 T_i 的算法如算法 1 所示。在算法 1 中, a_i 先将任务按照模糊兴趣的降序排列; 然后确定候选任务的完成时间, 在有限的服务时间 l_i 约束下, 确定投标任务集合 T_i 。

算法 1 Task Determination (Δ_i, l_i)

```

1.  $l \leftarrow l_i, T_i \leftarrow \emptyset, Q_{il} \leftarrow \emptyset$ 
2. For  $j$  from 1 to  $N$ 
3.    $\tau_k \leftarrow \operatorname{argmax}_{\tau_j \in T \setminus T_i} \delta_{i\tau_k}$ ;
4.    $q_{il\tau_k}^* \leftarrow \left( \frac{t_1 w_1 (1 + \delta_{i\tau_k})}{k_1 h_1 \beta_i} \right)^{\frac{1}{k_1 - t_1}}$ ;
5.   If  $q_{il\tau_k}^* \geq q_{il\max}$ 
6.      $q_{il\tau_k}^* \leftarrow q_{il\max}$ ;
7.   End if
8.    $v^* \leftarrow v_{\max} - \frac{(v_{\max} - v_{\min})(q_{il\max} - q_{il\tau_k}^*)}{q_{il\max} - q_{il\min}}$ ;
9.    $l \leftarrow l - d_{\tau_k}/v$ ;
10.  If  $l \geq 0$ 
11.     $\bar{v} \leftarrow d_{\tau_k}/(l_i - l)$ ;
12.     $q_{il\tau_k} \leftarrow q_{il\max} - \frac{(q_{il\max} - q_{il\min})(v_{\max} - \bar{v})}{v_{\max} - v_{\min}}$ ;
13.     $T_i \leftarrow T_i \cup \{\tau_k\}$ ;
14.     $Q_{il} \leftarrow Q_{il} \cup \{q_{il\tau_k}\}$ ;
15.  Else
16.    break;
17.  End if
18. End for
19. Return  $T_i, Q_{il}$ ;

```

候选协作用户 a_i 在确定投标任务集合的同时, 确定了完成任务总时间 $\dot{l}_i = l_i - l$, 以及每个任务 τ_k 的平均速度服务属性的计算数值。由于协作用户向请求用户转发数据的速度远高于协作用户从 3G 等蜂窝网络下载数据的速度。本文忽略协作用户转发数据花费的时间, 并且假设协作用户按照选择任务的顺序依次下载并传输数据, 即 a_i 完成任务的时间等于任务等待下载时间加任务下载时间。因此, a_i 完成任务 τ_k 的真实平均速度为 $\bar{v} = d_{\tau_k}/(l_i - l)$, 其中 d_{τ_k} 为任务 τ_k 的数据大小, l 为完成 τ_k 后 a_i 的剩余服务时间。在 CAMCA 中, 服务质量属性数值是服务质量属性的计算数值, 而平均速度作为其中一个服务质量属性, 需使用如算法 1 中步骤 8 和步骤 12 所示的公式将平均速度的计算数值与真实数值相互转换, 其中 $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ 分别表示真实平均速度的最大值和最小值。

3.3 请求用户确定协作用户及报酬

由请求用户选择协作用户规则可知, 如式(1)所示, 协作用户选择问题是 0-1 整数规划问题。由于 0-1 整数规划问题是 NP 难的, 请求用户确定协作用户的问题也是 NP 难的。因此, 本文使用贪心算法设计近似算法确定协作用户集合以及协作用户的报酬。

协作用户集合确定算法如算法 2 所示, 主要有以下三个步骤。首先, 从未选择的剩余候选协作用户中, 选择边际服务得分最大且为正数的用户成为协作用户, 如算法 3 所示。如算法 3 中步骤 3 至步骤 8 所示, 在已选协作用户集合为 W 的情况下, 未选择的候选协作用户 a_i 的边际效用评分函数 $\dot{s}_i(W)$ 如公式

$$\dot{s}_i(W) = \dot{s}(W \cup \{a_i\}) - \dot{s}(W) \quad (8)$$

所示, 其中 $\dot{s}(W)$ 表示已选协作用户集合 W 的服务评价函数, 如公式

$$\dot{s}(W) = \sum_{\tau_j \in \cup_{a_i \in W} T_i} \max_{a_i \in W} v_{i\tau_j} - \sum_{a_i \in W} \dot{b}_i \quad (9)$$

所示。然后, 更新已选用户集合 W 的服务价值向量, 已选协作用户集合 W 以及未选的候选协作用户集合 A' 。最后, 重复上述两个步骤, 当在未选候选协作用户集合中, 用户边际服务得分最大值为负数时, 选择结束。

算法 2	Winner Set Selection (A)
1.	$W \leftarrow \emptyset, A' \leftarrow A, s \leftarrow -\infty$;
2.	For $\tau_k \in T$
3.	$v_{Wk} \leftarrow 0$;
4.	End for
5.	$a_j \leftarrow \text{SelectOneWinner}(A', W, \&s)$
6.	While $s > 0$
7.	$A' \leftarrow A' \setminus \{a_j\}$;
8.	$W \leftarrow W \cup \{a_j\}$;
9.	For $\tau_k \in T_j$ do
10.	If $v_{jk} > v_{Wk}$
11.	$v_{Wk} \leftarrow v_{jk}$;
12.	End if
13.	End for
14.	$s \leftarrow -\infty$
15.	$a_j \leftarrow \text{SelectOneWinner}(A', W, \&s)$;
16.	End while
17.	Return W ;

算法 3	Select One Winner ($A', W, \&s$)
1.	$a_{lmax} \leftarrow 0, s_{max} \leftarrow s$;
2.	For $a_i \in A'$ do
3.	$s_i \leftarrow -b_i$;
4.	For $\tau_k \in T_i$ do
5.	If $v_{ik} > v_{Wk}$
6.	$s_i \leftarrow s_i + v_{ik} - v_{Wk}$;
7.	End if
8.	End for
9.	If $s_i > s_{max}$
10.	$a_{lmax} \leftarrow a_i$;
11.	$s_{max} \leftarrow s_{max} + s_i$;
12.	End if
13.	End for
14.	Return a_{lmax}

以计算选择的协作用户 a_j 为例,协作用户报酬确定算法如算法 4 所示,算法中将 a_j 的首次失败价格 $\dot{p}_j$ 作为 a_j 的报酬。所谓首次失败价格 $\dot{p}_j$,就是能够保证 a_j 获得胜利的最高报价。算法 4 主要有以下三个步骤。首先,以 $A' = A \setminus \{a_j\}$ 为最初的候选用户集合,使用算法 3,从未选择的剩余候选协作用户中选择边际服务得分最大的用户 a_{j_i} 为协作用户。然后,计算 a_j 替代 a_{j_i} 获胜可提供的最大投标价格,

确定目前 a_j 的最大投标价格,并更新已选协作用户集合提供的服务价值向量、已选协作用户集合 W' 以及未选的候选协作用户集合 A' 如步骤 8 到步骤 18 所示。最后,重复上述两个步骤,当在未选用户集合中,最大的用户边际服务得分为负数时,即 a_j 在首次失败的位置时,确定此时最大投标价格,确定报酬算法结束。

算法 4	Payment Determination (a_j)
1.	$\dot{p}_j \leftarrow 0, A' \leftarrow A \setminus \{a_j\}, W' \leftarrow \emptyset$
2.	For $\tau_k \in T$
3.	$v_{Wk} \leftarrow 0$;
4.	End for
5.	Repeat
6.	$s \leftarrow -\infty, v_j = 0$;
7.	$a_{j_i} \leftarrow \text{SelectOneWinner}(A', W', \&s)$;
8.	For $\tau_k \in T_{j_i}$ do
9.	If $v_{jk} > v_{Wk}$
10.	$v_j \leftarrow v_j + v_{jk}$;
11.	End if
12.	If $v_{j_i k} > v_{Wk}$
13.	$v_{Wk} \leftarrow v_{j_i k}$;
14.	End if
15.	End for
16.	$\dot{p}_j \leftarrow \max\{\dot{p}_j, \min\{v_j - s, v_j\}\}$
17.	$W' \leftarrow W' \cup \{a_{j_i}\}$
18.	$A' \leftarrow A' \setminus \{a_{j_i}\}$
19.	Until $s < 0$
20.	Return $\dot{p}_j$;

4 CAMCA 激励机制理论分析

4.1 保护私有信息

在候选协作用户的投标方案中,服务价值向量和投标价格都是由候选协作用户的私有兴趣和私有成本共同决定的,因此,候选协作用户的私有信息得以保护,从而用户参与协作的积极性不会受到隐私泄露问题的影响。

4.2 保证投标价格真实

定理 1.^[19] 当拍卖机制满足以下两个性质后,该拍卖机制能保证投标价格真实性:

(1) 获胜用户选择规则具有单调性:在其他投标信息不变的情况下,如果用户 a_i 以 b_i 为投标价格

参与投标时,能获得投标胜利,那么 a_i 以 $b'_i \leq b_i$ 为投标价格也能获得投标胜利。

(2) 获胜用户的报酬是临界值:如果用户的报价高于其报酬,则该用户不会被选择成为获胜用户。

为证明 CAMCA 机制能保证投标价格真实性,首先分析已选协作用户集合 W 的服务评价函数

$$\dot{s}(W) = \sum_{\tau_j \in \cup_{a_i \in W} T_i} \max_{a_i \in W} v_{i\tau_j} - \sum_{a_i \in W} \dot{b}_i.$$

定义:子模函数 令 Z 为一个有限集合,对任意的子集 $X \subseteq Y \subseteq Z$ 和任意的元素 $i \in Z \setminus Y$, 如果函数 $f: 2^Z \mapsto \mathbb{R}$ 满足 $f(X \cup \{i\}) - f(X) \geq f(Y \cup \{i\}) - f(Y)$, 称函数 f 为子模函数。其中 2^Z 为集合 Z 的幂集, $\mathbb{R}$ 为实数集。

引理:对任意已选协作用户集合 W , 服务评价函数 $\dot{s}(W)$ 为子模函数。

证明:假设协作用户集合 $X \subseteq Y \subseteq A$ 和协作用户 $a_i \in A \setminus Y$ 。 $L_i^X = \{\tau_j \in T_i \mid v_{i\tau_j} > \max_{a_k \in X} v_{k\tau_j}\}$ 表示由协作用户 a_i 提供的任务服务价值是协作用户集合 X 所提供的任务服务价值的任务所组成集合。

由式(8)和式(9)可知 $\dot{s}_i(X)$ 计算公式如下:

$$\begin{aligned} \dot{s}(X \cup \{a_i\}) - \dot{s}(X) &= \sum_{\tau_j \in T_i' \cup_{a_k \in X} T_k} v_{i\tau_j} + \sum_{\tau_j \in L_i^X} v_{i\tau_j} \\ &\quad - \sum_{\tau_j \in L_i^X} \max_{a_k \in X} v_{k\tau_j} - \dot{b}_i \end{aligned} \quad (10)$$

由于 $X \subseteq Y$, 易知 $L_i^X \supseteq L_i^Y$, 所以 $\sum_{\tau_j \in L_i^X} v_{i\tau_j} \geq \sum_{\tau_j \in L_i^Y} v_{i\tau_j}$,

$\sum_{\tau_j \in L_i^X} \max_{a_k \in X} v_{k\tau_j} \leq \sum_{\tau_j \in L_i^Y} \max_{a_k \in Y} v_{k\tau_j}$; 由于 $(T_i' \cup_{a_k \in Y} T_k) \subseteq (T_i' \cup_{a_k \in X} T_k)$, 所以 $\sum_{\tau_j \in T_i' \cup_{a_k \in X} T_k} v_{i\tau_j} \geq \sum_{\tau_j \in T_i' \cup_{a_k \in Y} T_k} v_{i\tau_j}$ 。

因此有

$$\begin{aligned} \dot{s}(X \cup \{a_i\}) - \dot{s}(X) &\geq \sum_{\tau_j \in T_i' \cup_{a_k \in Y} T_k} v_{i\tau_j} + \sum_{\tau_j \in L_i^Y} v_{i\tau_j} \\ &\quad - \sum_{\tau_j \in L_i^Y} \max_{a_k \in Y} v_{k\tau_j} - \dot{b}_i = \dot{s}(Y \cup \{a_i\}) - \dot{s}(Y) \end{aligned} \quad (11)$$

定理 2. CAMCA 机制能保证投标价格真实。

证明:首先,协作用户选择算法具有单调性。由协作用户选择算法(如算法 3)可知,候选协作用户的报价越低,其边际效用评分函数越高,越容易成为被选择成为协作用户。

其次,获胜用户的报酬是临界值。由于 $\dot{s}(W)$ 是子模函数,所以获胜的候选协作用户的边际效用评价函数值依次减少,即 $\dot{s}_{(1)}(W_0) \geq \dot{s}_{(2)}(W_1)$, 其中 $\dot{s}_{(1)}(W_0)$ 为第一个被选择的候选用户的边际效用评价函数值, W_0 为该用户获胜前的已选用户集合。因此,当 a_j 报价为 $b_j > \dot{p}_j$ ($\dot{p}_j$ 为算法 4 确定的报酬)时,有 k 个用户的边际效用评价函数值比 a_j 的边际效用评价函数值大,且在第 $k+1$ 轮获胜用户选择时, a_j 的边际效用评价函数值为负。因此, a_j 不会被选择为协作用户。

4.3 计算高效

候选协作用户确定投标方案计算复杂度为 $O(Nm)$ 。投标方案包括服务价值向量和投标价格。由于候选协作用户的任务集合最多选择 N 个任务,每个任务的服务属性最多有 m 个属性,所以投标方案的复杂度为 $O(Nm)$ 。因此,投标方案的确定算法计算高效。

请求用户选择协作用户的计算复杂度为 $O(N^2n)$, 确认所有协作用户报酬的计算复杂度为 $O(N^3n)$ 。需要与 n 个用户的 N 个任务的服务价值进行比较才能确定一个协作用户,因此确定一个协作用户需要计算复杂度 $O(Nn)$ 。由于每个新选择的协作用户至少会比前一个协作用户集合多覆盖一个任务,所以最多有 N 个协作用户。因此确定协作用户集合需要计算复杂度为 $O(N^2n)$ 。确定一个协作用户的报酬最多需要计算复杂度为 $O(N^2n)$, 由于最多有 N 个协作用户,确定协作用户集合报酬的计算复杂度为 $O(N^3n)$ 。因此,协作用户确定算法及其报酬确定算法计算高效。

5 实验和性能分析

本节使用 MATLAB 平台,采用仿真实验的方法评价 CAMCA 的性能评价。首先,介绍对比未考虑候选协作用户双重身份的激励机制 MCA 以及性能评价指标。接着,阐述仿真实验的设计。最后,将 CAMCA 和 MCA 进行实验对比分析。

5.1 对比算法及评价指标

在多任务场景中,进行 CAMCA 与 MCA 的对比

实验,评价指标分别为获胜方提供的服务质量、任务集合完成比例、请求用户获得的效用(式(12))和社会效用(式(13))。在 MCA 中,除了协作用户在确定投标方案时不考虑自己的双重身份外,MCA 机制的其他步骤都与 CAMCA 相同。

$$s(W) = \sum_{\tau_j \in \cup_{a_i \in W} T_i} \max_{a_i \in W} v_{i\tau_j} - \sum_{a_i \in W} \dot{p}_i \tag{12}$$

$$r(W) = \sum_{\tau_j \in \cup_{a_i \in W} T_i} \max_{a_i \in W} v_{i\tau_j} - \sum_{a_i \in W} \dot{b}_i \tag{13}$$

在实验中,请求用户发布的任务种类数目、候选协作用户的成本参数、模糊兴趣参数和服务时间都是随机取得,评价指标的结果是重复实验 1000 次后的平均数值。

5.2 实验设计

候选协作用户的成本参数服从在 $[\beta_{\min}, \beta_{\max}]$ 范围内的均匀分布,成本参数取值的跨度比例为 $\beta_{\max}/\beta_{\min} = 6$ 。由于 $\beta_{\max}/\beta_{\min}$ 值越大,候选协作用户的差异性越大,本文提出的激励机制相对于与对比机制的性能效果更加优越。本文选择适中的[1,6]作为候选协作用户成本参数的取值范围。

候选协作用户 a_i 对属于主题 I_j 的数据内容的兴趣 δ_{ij} 服从以流行程度 P_j 为均值的正态分布^[20],如下式所示:

$$P(\delta \leq \delta_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\delta_{ij}} e^{-\frac{t-P_j}{2\sigma^2}} dt \tag{14}$$

为了使 δ_{ij} 的取值范围为 $[0,1]$,正态分布的标准差 σ 设为 0.15。本文假设协作用户对数据 τ_k 的兴趣等于对数据所属主题 I_{τ_k} 的兴趣,即 $\delta_{i\tau_k} = \delta_{iI_{\tau_k}}$ 。

本文假设主题数目为 10,数据主题的流行程度 P_j 服从 $s = 2^{[20]}$ 的 zipf 分布,如下式所示:

$$P_j = (1/j^s) / \sum_{l=1}^{10} 1/l^s \tag{15}$$

在多任务场景中,请求用户发布的任务数目为 20 个,每个任务的大小为 1M,任务的所属主题服从请求用户对数据兴趣的概率分布。由于手机的搜索范围和本地网络连接数目有限,实验中参与竞标的候选协作用户的数目设定为 10 ~ 20。候选协作用户的服务时间服从 $[30s, 150s]$ 的均匀分布,候选协作用户的最大下载速度为 200kb/s。协作用户根据任务选择方法确定投标任务集合。请求用户考虑的

服务质量属性是平均速度 Q_1 和丢包率 L 。由于丢包率是成本型属性,按照公式

$$Q_2 = 1 - L \tag{16}$$

将其转为收益型属性 Q_2 。服务质量属性的参数设置如表 1 所示。

表 1 参数设置

属性	权重	系数	边际效用 指数	边际成本 指数
Q_1	$w_1 = 0.7$	$h_1 = 0.1$	$t_1 = 0.5$	$k_1 = 1$
Q_2	$w_1 = 0.3$	$h_2 = 0.1$	$t_2 = 0.5$	$k_2 = 1$

在多任务场景中,获胜的协作用户集合 W 提供的 Q_1 和 Q_2 的平均服务质量数值 Q_1 和 Q_2 的计算公式不同。协作用户集合 W 提供的真实平均速度 $Q_1' = |T(W)| \times 1024 / \max_{a_i \in W} \dot{l}_i$, 其中 $T(W)$ 为获胜用户集合 W 完成的任务集合, $\dot{l}_i$ 为协作用户 a_i 完成任务集合 T_i 的总时间。由于真实平均速度与计算平均速度存在对应关系,所以在如表 1 的参数设定的情况下, W 提供的服务属性 Q_1 的平均服务质量数值为 $Q_1 = 25 - (200 - Q_1')/8$ 。协作用户集合 W 提供的服务属性 Q_2 的平均服务质量数值的计算公式为 $Q_2 = (\sum_{\tau_i \in T(W)} \max_{a_i \in W} q_{i2\tau_i}) / |T(W)|$ 。

5.3 多任务场景的实验结果分析

图 1 和图 2 分别描述了 CAMCA 与 MCA 在服务质量 Q_1 和 Q_2 指标方面随候选协作用户数变化的实验结果。采用 CAMCA 的请求用户与采用 MCA 请求用户相比,获得的服务质量属性 Q_1 平均提高了 27.57%, 服务质量属性 Q_2 平均提高了 157.17%。这说明在多任务场景中,考虑协作用户的双重身份特点,能够激励协作用户提高服务质量,从而使请求用户高质量的服务。在多任务场景下 Q_1 和 Q_2 的平均数值公式不同,且服务属性的权重不同 $w_1 \neq w_2$, 所以 CAMCA 的服务属性数值 Q_1 和 Q_2 与 MCA 相比的提高幅度不同。在图 3 中,尽管 CAMCA 选择用户数目少于 MCA 选择用户数目, CAMCA 的获胜用户集合提供的服务质量仍然高于 MCA 的获胜用户提供的服务质量。这进一步验证了 CAMCA 机制能够选择高质量的协作用户集合,并有效地激励协作用

户提供高质量的服务。

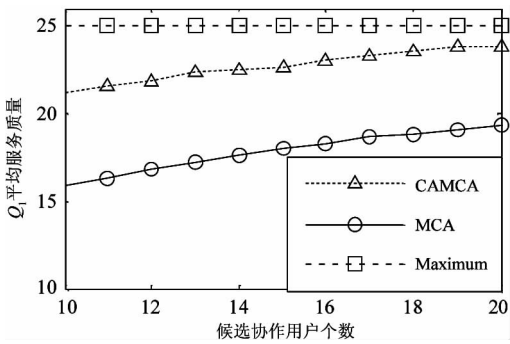


图 1 请求用户获得平均服务质量 Q_1 的比较

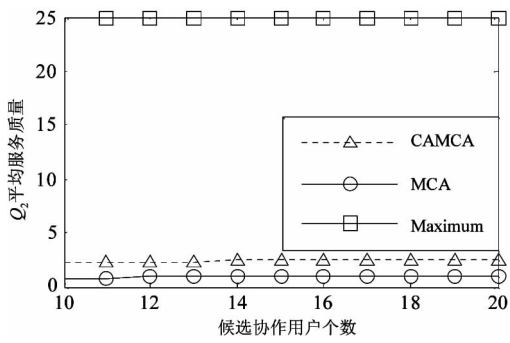


图 2 请求用户获得平均服务质量 Q_2 的比较

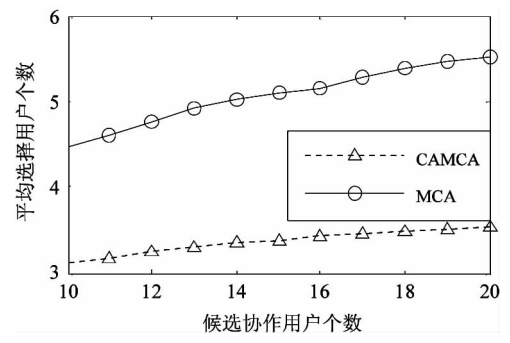


图 3 平均选择用户个数的比较

图 4 显示了 CAMCA 与 MCA 在完成任务集合比例指标方面随候选协作用户数目变化的情况。请求用户采用 CAMCA 获得的任务完成比例比采用 MCA 获得的效用平均提高了 11.50%。结合图 3 所示的 CAMCA 选择用户数目少于 MCA 选择的获胜用户数目的对比结果,可以说明 CAMCA 能够有效地激励有能力的协作用户完成更多的任务。

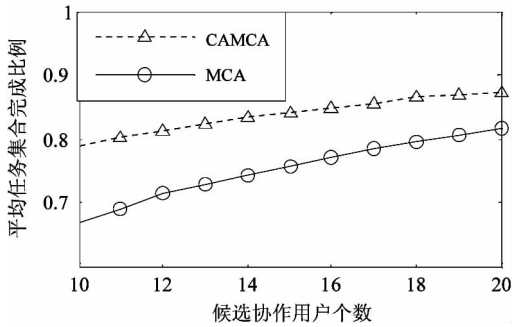


图 4 平均任务集合完成比例的比较

图 5 和图 6 分别显示了 CAMCA 与 MCA 在请求用户获得的效用和社会福利指标方面随候选协作用户数目变化的实验结果。请求用户使用 CAMCA 机制获得的效用比使用 MCA 机制获得的效用平均提高了 69.32%, 社会福利平均提高了 41.39%。这主要是因为 CAMCA 中考虑了协作用户的双重身份, 协作用户对数据的兴趣提高了协作用户提供的服务质量, 从而提高了协作用户的服务价值以及完成任务的数量, 并且通过与请求用户一起分摊成本开销的方式降低了请求用户的支付费用, 实现了请求用户获得的效用以及社会福利的提高。

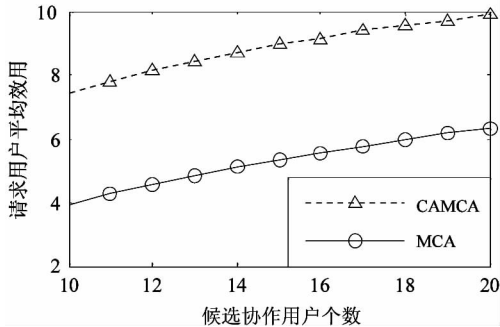


图 5 请求用户获得平均效用的比较

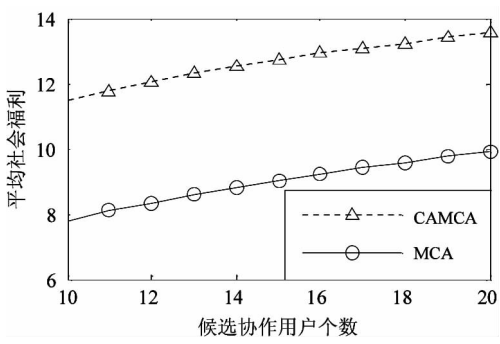


图 6 平均社会福利的比较

6 结 论

在移动设备的数据协作下载应用中,针对请求用户发布多个数据下载任务的场景,考虑协作用户在数据下载中的双重身份以及差异化服务质量,提出了一种数据协作下载激励机制 CAMCA,该机制具有保护隐私、保证投标价格真实和计算高效等优越特性。本研究通过实验验证,与忽略协作用户双重身份的激励机制相比,CAMCA 能充分激励协作用户提供高质量的服务,提高请求用户的效用以及社会福利。

虽然本文的激励机制是针对移动设备的数据协作下载应用而设计的,但该激励机制也可以应用到其他领域中,如延时容忍网络(delay tolerant networks,DTN)和众包应用中。只要满足请求用户发布的任务对协作用户来说是从未做过且有价值的这一特点,就可以采用本文的机制。

参考文献

- [1] Zhao J, Chu X, Liu H, et al. Online procurement auctions for resource pooling in client assisted cloud storage systems. In: Proceedings of the 34th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, Hong Kong, China, 2015. 576 - 584
- [2] Zhao D, Li X, Ma H. Budget-feasible online incentive mechanisms for crowdsourcing tasks truthfully. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2014, 24(2): 647-661
- [3] Luo T, Tan H P, Xia L. Profit-maximizing incentive for participatory sensing. In: Proceedings of the 33th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, Toronto, Canada, 2014. 127-135
- [4] Koutsopoulos I. Optimal incentive-driven design of participatory sensing systems. In: Proceedings of the 32th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, Turin, Italy, 2013. 1402-1410
- [5] Yang D, Xue G, Fang X, et al. Crowdsourcing to smartphones: incentive mechanism design for mobile phone sensing. In: Proceedings of the 18th International Conference on Mobile Computing and Networking, Istanbul, Turkey, 2012. 173-184
- [6] Chen X, Wang S, Liu M, et al. Partner-recruitment: Incentive mechanism for content offloading. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Sydney, Australia, 2014. 2538-2543
- [7] Chen X, Proulx B, Gong X, et al. Social trust and social reciprocity based cooperative D2D communications. In: Proceedings of the 14th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, Bangalore, India, 2013. 187-196
- [8] Keller L, Le A, Cici B, et al. MicroCast: cooperative video streaming on smartphones. In: Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, Ambleside, UK, 2012. 57-70
- [9] Seferoglu H, Keller L, Cici B, et al. Cooperative video streaming on smartphones. In: Proceedings of the 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Monticello, USA, 2011. 220-227
- [10] Huang C, Zhou A, Liu M, et al. FEDCVS: A fair and efficient scheduling scheme for dynamic cooperative video streaming on smartphones. In: Proceedings of the IEEE Global Communications Conference, Atlanta, USA, 2013. 1699-1704
- [11] Cui Y, Ma T, Cheng X. Multi-hop access pricing in public area WLANs. In: Proceedings of the 30th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, Shanghai, China, 2011. 2678-2686
- [12] Vishnumurthy V, Chandrakumar S, Sirer E G. Karma: A secure economic framework for peer-to-peer resource sharing. In: Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems, Berkeley, USA, 2003. 35
- [13] Zhang Z, Chen S, Yoon M. A distributed incentive scheme for peer-to-peer networks. In: Proceedings of the 26th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, Anchorage, USA, 2007. 1091-1099
- [14] Boutsis I, Kalogeraki V. On task assignment for real-time reliable crowdsourcing. In: Proceeding of the 2014 IEEE 34th International Conference on Distributed Computing Systems, Madrid, Spain, 2014. 1-10
- [15] Yu T, Zhou Z, Zhang D, et al. INDAPSON: An incentive data plan sharing system based on self-organizing network. In: Proceedings of the 33rd Annual IEEE International Conference on Computer Communications, Toronto,

Canada, 2014. 1545-1553

[16] David E, Azoulay-schwartz R, Kraus S. Bidding in sealed-bid and english multi-attribute auctions. *Decision Support Systems*, 2006, 42(2): 527-556

[17] 刘树林, 邱苑华. 多属性决策基础理论研究. 系统工程理论与实践, 1998, 18(1): 38-43

[18] Saaty T L. Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 2008, 1(1): 83-98

[19] Singer Y. Budget feasible mechanisms. In: Proceedings of the 2010 IEEE 51st Annual Symposium on Foundations of Computer Science, Las Vegas, USA, 2010. 765-774

[20] Gao W, Cao G. User-centric data dissemination in disruption tolerant networks. In: Proceedings of the 30th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, Shanghai, China, 2011. 3119-312

An incentive mechanism for cooperative data downloading considering cooperators’ dual identity

Chen Xiao^{***}, Liu Min^{*}, Zhou Yaqin^{***}, Li Zhongcheng^{*}

(^{*} Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(^{**} Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

(^{***} Singapore University of Technology and Design, ISTD, Singapore 487372)

Abstract

The problem of cooperative downloading of mobile wireless data was studied. To spur the mobile users with limited resources in mobile devices to participate in cooperative downloading, a novel incentive mechanism for cooperative data downloading based on auction theories was designed with the considerations of cooperative users’ differential service qualities and their dual identity (they can be treated as data sellers as well as partners of requestors). The incentive mechanism can spur and select appropriate users to complete data downloading tasks under multi-task situation. The simulation experiment shows that compared with the incentive mechanisms ignoring dual identity of cooperative users, this new incentive mechanism can improve the quality of cooperative service, utility of requestors and social welfare.

Key words: incentive mechanism, cooperative downloading, auction theory, task allocation, user selection