

## 移动社交网络中基于拍卖模型的数据转发激励机制

刘浩<sup>1</sup>, 陈志刚<sup>2</sup>, 张连明<sup>3</sup>

(1. 湖南人文科技学院信息学院, 湖南 娄底 417000; 2. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083;  
3. 湖南师范大学物理与信息科学学院, 湖南 长沙 410081)

**摘要:** 提出一种基于拍卖模型的移动社交网络数据转发激励机制—AMIM。通过对一级密封价格拍卖模型进行扩展, 并采用虚拟支付的交易方式, 将节点间的数据转发过程抽象为拍卖交易模型。基于节点的资源状态、虚拟货币量和数据属性, 给出了关于数据转发交易的买卖双方估价函数, 节点依据相应的估价函数和博弈策略给出相应的报价。通过博弈分析给出了 AMIM 机制的纳什均衡解, 数据转发请求节点将选择出价最低且低于其估价的竞拍节点为本次数据转发的服务节点, 激励理性的用户节点为使其自身利益最大化而自愿参与数据转发交易。仿真实验结果表明, 采用 AMIM 机制后, 网络系统的能量消耗有所下降, 数据转发成功率与效率均有明显提高。

**关键词:** 自私性; 移动社交网络; 数据转发; 激励机制; 一级密封价格拍卖

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

## Data forwarding incentive mechanism based on auction model in mobile social network

LIU Hao<sup>1</sup>, CHEN Zhi-gang<sup>2</sup>, ZHANG Lian-ming<sup>3</sup>

(1. Institute of Information, Hunan University of Humanities, Science and Technology, Loudi 417000, China;  
2. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;  
3. College of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

**Abstract:** A data forwarding incentive mechanism based on auction model in mobile social network was proposed. In this incentive mechanism, the first-price sealed auction mode was extended, the transaction mode of virtual currency payment was adopted, and the procedure of data forwarding between nodes was abstracted into the auction transaction model. Based on the node's resource state, the virtual currency and the data property, the evaluation function of data forwarding transaction was given, and then the node gives the corresponding price according to the evaluation function and game strategy. Through the game analysis, the Nash equilibrium solution of AMIM was found, and the lowest bidder, of which the bid price was lower than the evaluation of data forwarding request node would be selected as the service provider for this data forwarding. In this incentive mechanism, the rational mobile nodes were enforced to voluntarily participate in data forwarding cooperation to maximize their own interests. The simulation experiment shows that AMIM mechanism can effectively reduce the energy consumption and improve the success rate and efficiency of data forwarding in the whole network system.

**Key words:** selfishness, mobile social network, data forwarding, incentive mechanism, first-price sealed auction

收稿日期: 2017-03-20; 修回日期: 2017-11-07

通信作者: 刘浩, lhkd0407@126.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61572191, No.61571188), 湖南省自然科学基金资助项目 (No.2017JJ2124), 湖南省计算机应用技术重点建设学科基金资助项目

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61572191, No.61571188), The Natural Science Foundation of Hunan Province (No.2017JJ2124), The Key Construction Course of Computer Application Technology in Hunan Province

## 1 引言

近 10 年来, 由于移动智能终端设备及其相关技术的快速发展, 移动智能终端已经能够利用短距离通信技术进行直接交互, 它突破了传统蜂窝式通信模式的局限性<sup>[1]</sup>。移动社交网络 (MSN, mobile social network) 随着移动终端智能化技术的发展而快速兴起, 它为便携式智能终端的用户提供了直接交互的移动通信平台<sup>[1,2]</sup>。与基于 Web 的传统社交网络相比, 移动社交网络具有便携性和即时性等优势, 在基于位置识别的各类服务中应用广泛, 并得到了网络通信领域产业界和学术界的普遍关注<sup>[1-4]</sup>。移动社交网络的数据转发不同于传统网络, 源节点与目标节点之间不需要存在完整的端到端路径, 只能基于“存储—携带—转发”的工作模式, 通过移动节点之间的相互协作来实现<sup>[5,6]</sup>。目前, 移动社交网络数据转发算法大多数是基于移动节点自愿参与数据转发这一基本假设来实现的, 但是, 在现实网络环境中, 移动节点由于电池容量、存储空间以及数据处理能力受限等原因, 理性的用户节点会表现出其自私性, 会拒绝参与其他节点的数据转发, 这严重影响了网络系统的数据转发性能<sup>[7-9]</sup>。因此, 如何建立有效的数据转发激励机制, 约束节点的自私行为, 激励节点间的相互协作, 是移动社交网络需要解决的关键问题之一。

本文的主要贡献如下。

1) 针对一级密封价格拍卖模型主要是解决多节点一起竞拍数据转发服务问题, 本文对一级密封价格拍卖模型进行扩展, 采用虚拟支付的交易方式, 将多个邻居节点一起竞拍数据转发过程抽象为普通的一级密封价格拍卖模型; 而数据转发请求节点与唯一邻居节点之间的数据转发过程则退化为双方叫价拍卖模型, 并给出 2 种情况的纳什均衡解。

2) 综合考虑移动节点的自身状态和数据属性等因素, 提出了一种基于拍卖模型的移动社交网络数据转发激励机制 AMIM。

3) 通过博弈分析给出了 AMIM 机制的纳什均衡解, 以约束理性用户节点的自私行为, 促使它们为最大化其自身利益而积极参与数据转发合作。

## 2 相关工作

目前, 解决网络中节点的自私性问题主要在于设计有效的激励机制。有关激励机制的现有研究工作大致可分为区分服务与虚拟支付 2 种<sup>[10,11]</sup>。

在区分服务类节点激励机制中, 系统给予积极参与协同合作的节点更高的服务等级, 以达到激励自私节点的目标。为避免节点自私行为对延迟容忍网络的危害, 文献[12]通过对节点行为的观测与记录来判断其可信程度, 对低可信度的自私节点进行惩罚, 以达到优化网络路由的目标。文献[13]采用社会相似性来进行节点的信誉管理, 移动节点通过为别的节点提供各种服务来提高其自身的信誉, 信誉越高的节点获得其他节点提供服务的可能性越大。基于信用机制与 Stackelberg 博弈方法, 康新等<sup>[14]</sup>给出了一种异构对等网络中节点间的激励机制, 该机制采用偏袒的资源配置方式, 根据节点的不同信用值为其提供不同的服务, 以激励节点间的相互合作。在基于区分服务类的激励机制中, 一方面, 监测其他节点的行为在移动社交网络中难以实现; 另一方面, 移动节点自身利益的最大化与系统整体效用的最优很难同步实现, 因此, 理性的自私节点仍然存在违背协议的可能<sup>[10,11]</sup>。

在基于虚拟支付的节点激励机制中, 节点通过为其他节点提供各种服务来获得以虚拟货币形式的报酬, 同时, 需要获得其他节点的服务时也必须支付虚拟货币<sup>[7,10]</sup>。基于虚拟支付的激励机制在机会网络、对等网络以及社交网络等领域应用广泛, 尤其是与博弈论相结合, 将成熟的博弈论思想应用于虚拟支付的激励机制中, 能够有效地解决节点的自私性问题。赵广松等<sup>[15]</sup>针对节点在自私性机会网络中内容分发方面的自私行为, 提出了一种网络服务商 A 类节点与 B 类节点可以达到共赢互惠的激励机制, 通过虚拟支付的方式, 使每个节点在试图最大化自身收益的同时, 提高了整个机会网络的内容分发性能。为解决移动社交网络中节点的自私性问题, 曹怀虎等<sup>[16]</sup>提出了一种基于博弈理论的数据转发拓扑模型, 并给出相应的博弈优化算法和自私节点的约束机制, 以激励数据转发过程中节点间的相互合作。基于虚拟支付和演化博弈理论, 文献[17]给出了一种自组织网络中节点间的协同合作激励机制。针对机会社交网络中消息传递过程中的“分组丢失”问题, 文献[7]给出了一种基于中介市场模型的节点激励机制, 并给出中继代理选择的“流浪者算法”, 激励理性的用户节点积极参与消息传递, 以提高系统的路由性能。针对资源受限的机会网络中节点的自私性问题, 通过借鉴买卖交易模型等理论, 李云等<sup>[10]</sup>给出了一种机会网络中节点间消息转

发激励机制，有效地解决了由于激励节点盲目合作而带来的网络性能退化等问题。为了激励移动 P2P 网络中节点间的消息转发合作，文献[11]给出了一种基于不完全信息的双方叫价拍卖模型的节点激励机制，将节点间的消息转发合作过程抽象为不完全信息的双方叫价拍卖动态博弈，并给出该动态博弈的线性策略贝叶斯纳什均衡解。为激励自私节点间的协同合作，现有大多数的激励机制是通过制定各种规则、策略来实现的，它们并没有考虑节点自身资源受限等因素对移动节点行为的影响，或它们注重网络系统整体效用的最优化，对理性节点的自私性（即其自身收益的最大化）尚未充分考虑。因此，它们并不适用于节点资源受限的移动社交网络。

与其他的延迟容忍网络不同，移动社交网络中的智能终端设备是由具有社会性的人来操控，因此，移动社交网络具有一定的社会性和主观性<sup>[7,18]</sup>。本文通过对一级密封价格拍卖模型进行扩展，并采用虚拟支付的交易方式，将节点间的数据转发过程抽象为拍卖交易模型，最后建立移动社交网络中数据转发激励机制，激励理性的用户节点为使其自身利益最大化而自愿参与数据转发合作。

### 3 网络模型

在移动社交网络中，具有相似兴趣爱好的用户通过移动终端设备连接起来，形成虚拟社区，并进行资源共享与协同工作<sup>[1]</sup>。显然，当移动节点加入网络后，它们所拥有的各种资源（包含数据处理能力）都是有限的，其中，能量（电池容量）是不可再生的资源。一方面，因移动节点间资源共享与相互协同的需要，要求移动节点贡献其所拥有的资源。另一方面，为了保证增长其正常工作的时间，每个移动节点都会尽量节约其所拥有的资源，它们会表现出自私性。基于以上分析，先给出一些相关的假设条件。

1) 假设每个移动节点都是有限理性的自私节点，其参与数据转发交易的前提是收益大于 0，并且，在每次数据转发交易中节点都会最大化其自身收益。

2) 移动用户节点并不是恶意节点，在每次数据转发交易中都会基于其自身状态与数据属性进行估价。

3) 所有移动节点在观测时间周期内知道其能

量状态，且不能再补充能量，当能量耗尽后会从网络中退出。

## 4 基于拍卖模型的数据转发激励机制

在移动社交网络环境下，该机制 AMIM 对一级密封价格拍卖模型进行扩展，并采用虚拟支付的交易方式，将节点间的数据转发过程抽象为拍卖交易模型。与已有工作存在以下不同。1) 针对自私节点对数据转发性能的影响，AMIM 通过建立约束机制来激励自私节点积极参与数据转发合作，以提高移动社交网络中数据转发的性能。2) 该机制 AMIM 不需要第三方中介机构参与。当某一移动节点需要数据转发时，首先，该节点（数据转发请求节点）会向其所有邻居节点（数据转发服务竞拍节点）发起请求。然后，每个利益相关方（移动节点）分别根据其自身状态与数据属性对本次数据转发服务进行估价，并且，每个数据转发竞拍节点根据其估价和博弈策略给出相应报价；最后，数据转发请求节点将选择出价最低且低于其估价的竞拍节点（即中标节点）为本次数据转发的服务节点，并支付约定单位的虚拟货币作为服务报酬。

### 4.1 基本定义

在移动社交网络中，影响节点间数据转发合作意愿的因素很多。参考文献[10,11]，AMIM 机制重点考虑移动节点的虚拟货币量、缓存、能量和数据属性等核心因素。

**定义 1** 移动节点  $i$  虚拟货币量的初始值为  $V_{0_i}$ 。

**定义 2** 当前  $t$  时刻移动节点  $i$  的虚拟货币量为  $V_i(t)$ 。

**定义 3** 设移动节点  $i$  缓存空间的最大值为  $M_{\max_i}$ ，当前  $t$  时刻其剩余缓存值可表示为  $M_{t_i}$ ，则其剩余缓存百分比  $M_i$  的表达式为

$$M_i = \frac{M_{t_i}}{M_{\max_i}} \quad (1)$$

**定义 4** 设移动节点  $i$  能量的初始值为  $C_{\max_i}$ ，当前  $t$  时刻其剩余能量值可表示为  $C_{t_i}$ ，则其剩余能量百分比  $C_i$  的表达式为

$$C_i = \frac{C_{t_i}}{C_{\max_i}} \quad (2)$$

在数据属性方面，AMIM 机制主要考虑数据的大小与剩余生存时间 2 个因素。通常情况下，数据

转发所消耗的能量随其增大而增大，定价也会提高。数据剩余生存时间是以当前时刻为基准，到数据过期这段时间。剩余生存时间越短，则表明该数据转发处理越紧急，应尽快到达目标节点。

**定义 5** 称  $D_s$  为数据  $D$  大小，且有  $D_s \in [0,1]$ 。

**定义 6** 设  $T_{TTL}$  为数据  $D$  的生存周期时间长度， $T_{res}$  为数据  $D$  的剩余生存时间， $T_{min}$  为一次数据转发所需的最小时间。当  $T_{res} \geq T_{min}$  时，则数据  $D$  需转发的紧急程度  $D_{urg}$  可表示为

$$D_{urg} = 1 - \frac{T_{res}}{T_{TTL}} \quad (3)$$

显然，当  $T_{res} < T_{min}$ ，表明该数据已经快过期，不需再进行转发。

## 4.2 拍卖交易模型

为了提高移动社交网络的数据转发性能，实现激励自私节点积极参与数据转发合作的目标，本文采用扩展后的一级密封价格拍卖模型。在交易过程中，每个拍卖的利益相关方（用户节点）都只知道自身的状态与数据属性，并不了解其他方的状态等其他情况。在 AMIM 机制中，称数据转发的请求节点为交易的买方，称参与本次数据转发服务的竞拍节点为卖方。

### 4.2.1 拍卖交易规则

买卖双方数据转发交易过程中必须满足以下规则。

1) 首先，买方和卖方分别依据下面相应的估价函数对本次数据转发交易进行估价。设买方对本次数据转发的（价值）估价为  $J_b$ ；设任一参与对本次数据转发交易的卖方节点（成本）估价为  $J_{sj}$ 。

2) 每个参与对本次数据转发交易的卖方节点根据其估价与博弈策略给出相应报价；设出价最低竞拍节点对本次数据转发交易的估价是  $J_s$ ，对应的出价是  $q_s$ 。

3) 若  $q_s \leq J_b$ ，则以价格  $q_s$  成交，出价最低的竞拍节点为中标节点；否则，不成交。

4) 若成交，则买方的收益为  $J_b - q_s$ ，中标节点的收益为  $q_s - J_s$ 。

5) 若不成交，则买卖双方的收益都为 0。

### 4.2.2 买方估价函数

数据转发交易开始时，根据交易规则 1)，买方节点  $i$  应对本次数据转发服务进行估价。在研究买方估价函数时，AMIM 机制仅考虑买方  $i$  所拥有的

虚拟货币量、缓存以及数据属性等关键因素。通常情况下，若买方  $i$  所拥有的虚拟货币量越大，那么它会愿意出一个较高的价格来购买本次数据转发服务。为了降低缓存压力，当买方  $i$  的剩余缓存百分比越小，它渴望转发数据的意愿会越强烈。买方  $i$  购买数据转发服务的意愿随其紧急程度提高而增强。综合以上分析，给出买方  $i$  的估价函数表达式为

$$J_b = D_m[\chi(1 - M_i) + \sigma D_{urg}]W_b \quad (4)$$

其中， $D_{urg}$  是数据需转发的紧急程度， $M_i$  是买方  $i$  的剩余缓存百分比， $\sigma$  和  $\chi$  是买方节点  $i$  对两者的偏好权重值，且有  $\chi + \sigma = 1$ 。

$W_b$  为买方  $i$  所拥有虚拟货币量大小的函数，其表达式为

$$W_b = 1 - \lambda^{-\delta V_i(t)} \quad (5)$$

其中， $\lambda$ 、 $\delta$  是 AMIM 机制中自设参数，具体设置和系统性能需求相关。

### 4.2.3 卖方估价函数

同理，对于任一卖方节点  $j$ ，在决定参与本次数据转发竞拍时，也应该对本次数据转发交易进行估价。在研究卖方估价函数时，AMIM 机制主要考虑卖方节点  $j$  的自身状态和数据属性。一般来说，若卖方  $j$  的剩余能量百分比越小，为了节省能量，则它提供数据转发服务的要价会越高；若卖方  $j$  的剩余缓存百分比越小，则它对数据转发服务的估价也会越高。与买方不同的是，卖方  $j$  提供数据转发服务的意愿会随其所拥有的虚拟货币量减少而更强。综合以上分析，给出卖方  $j$  的估价函数表达式为

$$J_{sj} = D_m[\varepsilon(1 - C_j) + \omega(1 - M_j)]W_s \quad (6)$$

其中， $C_j$  是卖方  $j$  的剩余能量百分比， $M_j$  为其剩余缓存百分比。 $\varepsilon$  和  $\omega$  为 2 个权重值，且有  $\varepsilon + \omega = 1$ 。 $W_s$  为卖方  $j$  所拥有虚拟货币量大小的函数，其表达式为

$$W_s = \lambda^{-\delta V_j(t)} \quad (7)$$

其中，参数  $\lambda$ 、 $\delta$  和式(5)相同。

根据 5.1 节基本假设条件 3)，所有节点的能量都是随时间严格递减的，而节点剩余缓存的变化是可逆的。分析式(6)可知，只要两者之一变小，卖方给出数据转发服务的估价就会越高，所以，本文采

用自适应加权。综合以上分析可知，两者中较小的一方对卖方估价的影响较大。那么，可给出权重值  $\varepsilon$  和  $\omega$  的表达式为

$$\varepsilon = \frac{(1 - M_j)}{(1 - C_j) + (1 - M_j)} \quad (8)$$

$$\omega = \frac{(1 - C_j)}{(1 - C_j) + (1 - M_j)} \quad (9)$$

### 4.3 数据转发过程

假设节点  $i$  有数据转发需求，并且在约定的观测时间周期  $T_{obs}$  内一共有  $N (N \geq 1)$  个邻居节点，则节点  $i$  向这  $N$  个邻居节点发起数据转发请求。那么，数据转发的请求节点  $i$  将采用扩展后的一级密封价格拍卖模型，选择出价最低且低于其估价的竞拍节点为本次数据转发的服务提供节点。

图 1 给出了数据转发交易竞拍的具体过程。

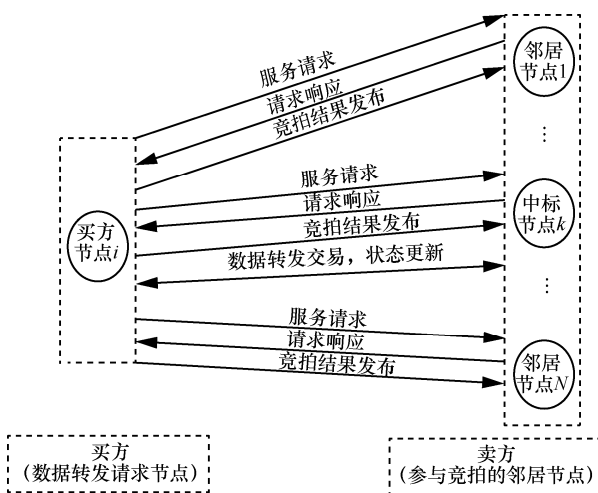


图 1 数据转发交易竞拍过程

具体过程描述如下。

**步骤 1 服务请求。**服务请求节点  $i$  向其全部邻居节点发起数据转发请求，其中，请求信息包括数据  $D$  的大小  $D_s$ 、 $ID$ （身份识别码）、目标节点、估价  $J_b$  和  $N$  的值。

**步骤 2 请求响应。**对于任意邻居节点  $j$ ，先根据式(6)计算出本次数据转发交易的估价  $J_{sj}$ ，再根据博弈策略给出相应出价（若  $N=1$ ，其出价  $q_s = \frac{J_s + J_b}{2}$ ；若  $N > 1$ ，其出价  $q_s = J_s + \frac{1 - J_s}{N}$ ；具体分析结果参见 5.2 节）。最后，反馈给请求节点  $i$  一条请求响应信息，其中，包含节点  $j$  的出价信息。

**步骤 3 竞拍结果发布。**当买方节点  $i$  收到所有参与竞拍的邻居节点出价后，将选择出价最低且低于其估价  $J_b$  的竞拍节点  $k$  作为中标节点（若  $N=1$ ，则该唯一的邻居节点就是中标节点），并公布竞拍结果。

**步骤 4 数据转发交易。**假设中标节点  $k$  对本次数据转发交易的估价是  $J_s$ ，对应的出价是  $q_s$ ；若  $q_s \leq J_b$ ，则以价格  $q_s$  成交。中标节点  $k$  为买方节点  $i$  提供本次数据转发的服务，交易成功。

**步骤 5 状态更新。**若数据转发交易成功，从买方节点  $i$  扣除  $q_s$  单位的虚拟货币，而中标节点  $k$  则增加  $q_s$  单位的虚拟货币。

## 5 博弈分析

根据前面的拍卖交易规则：若中标节点  $k$  对本次数据转发交易的估价为  $J_s$ ，对应的出价为  $q_s$ ，且有  $q_s \leq J_b$ ，则以价格  $q_s$  成交。请求节点  $i$  选择中标节点  $k$  进行数据转发交易，本次交易成功。然而，如何才能够保证中标节点  $k$  按约定的规则提供数据转发服务，同时，请求节点  $i$  按约定的规则接收数据转发服务。为解决该问题，在此将  $N (N \geq 1)$  个邻居节点竞拍同一数据转发交易的过程抽象为扩展后的一级密封价格拍卖模型，激励理性的自私节点为使其自身利益的最大化而自愿参与数据转发合作，从而提高系统的数据转发性能。

### 5.1 博弈方及其策略

数据转发交易动态博弈的双方是：数据转发的请求节点  $i$ （买方）与数据转发服务的提供节点（ $N$  个参与竞拍的卖方）。为分析一级密封价格拍卖动态博弈过程，下面先给出 3 个基本假设条件。

1) 信息是不完全的，即买方只知道本次数据转发交易的估价  $J_b$ ，任一卖方节点  $j$  也只知道自己对本次数据转发交易的估价  $J_{sj}$ 。

2) 任一卖方节点  $j$  的估价  $J_{sj}$  都分布在同一个区间  $[\underline{\theta}, \bar{\theta}]$  上，且有  $\underline{\theta} \geq 0$ ，所有分布为同一分布，其中，分布函数  $F(\cdot)$  及其密度函数  $f(\cdot)$  是共同知识。

3) 任一卖方节点  $j$  都是根据自己的估价  $J_{sj}$  与博弈策略给出相应报价  $q_{sj}$ ；并且，估价越高的节点出价也会越高，即对于任意 2 个不同的卖方节点  $j$  与  $t$ ，若  $J_{sj} > J_{st}$ ，则有  $q_{sj} > q_{st}$ 。

显然，作为理性的自私节点，博弈双方都会使其在本次数据转发交易中的收益最大化。作为买方

节点, 为了实现利益最大化, 其博弈策略就是选择出价最低且低于其估价  $J_b$  的竞拍节点 (中标节点) 进行数据  $D$  的转发交易。对于任一卖方节点  $j$ , 本文将在第 5.2 节中分析, 它将如何根据自己的估价  $J_{sj}$  与博弈策略给出相应报价  $q_{sj}$ , 使其在本次数据转发交易中的收益最大。

### 5.2 博弈均衡分析

在此可以约定, 对于任一卖方节点  $j$ , 当它在  $N$  个竞拍节点中出价最低且低于买方节点的估价时, 才能被选择为中标节点, 此时其收益为  $q_{sj} - J_{sj}$  (即  $q_s - J_s$ ), 否则其收益为 0。

首先, 本文先讨论  $N > 1$  的情况。根据 5.1 节中基本假设条件 2) 以及博弈的对称性均衡条件<sup>[19,20]</sup>, 这里参与竞拍的任一卖方节点  $j$  都使用相同的博弈策略  $\Phi: [\underline{\theta}, \bar{\theta}] \rightarrow R_+$ , 即

$$q_{sj} = \Phi(J_{sj}) \quad (10)$$

对于任意 2 个参加竞拍的卖方节点  $j$  与  $t$ , 节点  $j$  出价低于节点  $t$  出价的概率可以表示为

$$\begin{aligned} & P\{\Phi(J_{sj}) \leq \Phi(J_{st})\} \\ &= 1 - P\{\Phi(J_{st}) < \Phi(J_{sj})\} \\ &= 1 - P\{J_{st} < \Phi^{-1}(q_{sj})\} \\ &= 1 - F(\Phi^{-1}(q_{sj})) \end{aligned} \quad (11)$$

那么, 参与竞拍的卖方节点  $j$  在本次数据转发交易中获得的收益期望为

$$\prod_{t \neq i} [1 - F(\Phi^{-1}(q_{sj}))](q_{sj} - J_{sj}) \quad (12)$$

显然, 作为理性的自私节点, 节点  $j$  希望通过博弈策略使其收益最大化, 即

$$\begin{aligned} & \max_{q_{sj}} \{\prod_{t \neq i} [1 - F(\Phi^{-1}(q_{sj}))](q_{sj} - J_{sj})\} \\ &= \max_{q_{sj}} \{[1 - F(\Phi^{-1}(q_{sj}))]^{N-1} (q_{sj} - J_{sj})\} \end{aligned} \quad (13)$$

若式(13)存在内点解, 根据最优化的一阶条件<sup>[19,20]</sup>, 那么式(13)的导数为 0, 即

$$\begin{aligned} & [1 - F(\Phi^{-1}(q_{sj}))]^{N-1} - (N-1)[1 - \\ & F(\Phi^{-1}(q_{sj}))]^{N-2} f(\Phi^{-1}(q_{sj})) \frac{d\Phi^{-1}(q_{sj})}{dq_{sj}} (q_{sj} - J_{sj}) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

通过求解式(14), 可以得到对称性贝叶斯纳什均衡解为

$$q_{sj} = \Phi(J_{sj}) = J_{sj} + \frac{\int_{J_{sj}}^{\bar{\theta}} [1 - F(x)]^{N-1} dx}{[1 - F(J_{sj})]^{N-1}} \quad (15)$$

为了便于分析, 不妨进一步假设, 任一卖方节点  $j$  估价  $J_{sj}$  的分布函数  $F(\cdot)$  是  $[0,1]$  上的均匀分布。那么, 就有

$$q_{sj} = \Phi(J_{sj}) = J_{sj} + \frac{\int_{J_{sj}}^1 (1-x)^{N-1} dx}{[1 - J_{sj}]^{N-1}} = J_{sj} + \frac{1 - J_{sj}}{N} \quad (16)$$

式(16)说明, 参与竞拍的卖方节点出价会高于其对应的估价, 并且, 参与竞拍的卖方节点越多, 竞争越激烈, 中标节点的出价就越接近其对应的估价。

因此, 假设出价最低竞拍节点  $k$  对本次数据转发交易的估价为  $J_s$ , 则其对应的出价为  $q_s = J_s + \frac{1 - J_s}{N}$ 。若  $q_s \leq J_b$ , 则以价格  $q_s$  成交; 否则, 不成交。若成交, 此时买方的收益达到最大, 其值为  $J_b - q_s$ , 中标买方节点  $k$  的收益达到最大, 其值为  $q_s - J_s = \frac{1 - J_s}{N}$ 。

现在, 再讨论  $N = 1$  的情况。

$N = 1$ , 表示买方节点  $i$  只有唯一的邻居节点  $k$ 。参考文献[19,20], 那么, 节点  $i$  与邻居节点  $k$  之间的数据转发过程退化为双方叫价拍卖动态博弈, 下面给出其单一价格策略均衡解。

若买方节点  $i$  的估价为  $J_b$ , 卖方节点  $k$  的估价为  $J_s$ , 且有  $J_s \leq J_b$ ; 则以  $q_s = \frac{J_s + J_b}{2}$  成交。买方的收益为  $J_b - q_s = \frac{J_b - J_s}{2}$ , 卖方的收益为  $q_s - J_s = \frac{J_b - J_s}{2}$ , 买卖双方平均分配总收益  $(J_b - J_s)$ 。当  $J_s > J_b$ , 拍卖不成交。

根据 4.2.1 节拍卖交易规则 5), 若不成交, 买卖双方的收益都为 0, 显然, 交易成功的双方收益均大于 0。

通过对数据转发博弈过程的均衡分析可知, 博弈双方为追求其自身利益最大化, 会积极参与数据转发交易的合作, 从而提高系统的数据转发性能。

## 6 仿真实验和结果分析

为了检验 AMIM 机制的数据转发性能, 本文采用 NS2 作为系统模拟软件来实现仿真实验的网络

模型,并在单副本概率路由为基本路由机制的基础上加以改进建立相关路由协议。首先,初始化 NS2 的基本功能模块,包括节点、链路、代理以及分组等,其中,通过对移动节点附加相应路由协议来实现路由配置。在节点上,通过配置不同的代理(发送代理与接收代理)来实现相关的协议,并接收一些实验分析用的通信量等数据。实验采用离散事件(数据转发)进行驱动,当某一节点有数据转发需求时,实验采用 Epidemic 算法<sup>[21]</sup>,该节点向其所有邻居节点(该节点及其邻居节点均在彼此的无线通信范围之内)发出数据转发请求信息(即 4.3 节的步骤 1);然后,等待邻居节点返回的请求响应信息(即 4.3 节的步骤 2);再采用 Epidemic 算法向其所有邻居节点发布竞拍结果信息(即 4.3 节的步骤 3);最后,该节点采用点到点的通信方式完成数据转发交易与状态更新(即 4.3 节的步骤 4 和步骤 5)。在整个模拟过程中,通过对 NS2 仿真系统中 Trace 文件的统计数据进行分析。

实验场景设计和相关参数设置:在  $5\,000\text{ m} \times 4\,000\text{ m}$  的长方形区域内,500 个使用 IEEE 802.11 无线网络接口的移动节点被随机分布。节点移动方式遵循 Random Waypoint 移动模型,其通信半径为 100 m,移动速度介于  $0\sim 20\text{ m/s}$  之间。为便于统计分析,每个节点能量初始值设为 1 000 J,缓存空间最大值设为 30 MB,发射功率为 1 W。实验中假设只有节点在数据转发时才会产生能量消耗,具体而言,每次数据转发请求、响应和竞拍等过程将消耗 1 J 能量,而传输 1 MB 的数据则会消耗 2 J 能量。整个实验一共模拟 4 h,且前 5 min 是热身时间,每分钟系统将随机生成大小服从  $[0.5,1]$  均匀分布的 500 个数据分组。设  $\chi=\sigma=0.5$ ,  $T_{\text{TTL}}=10\text{ s}$ ,  $\lambda=2$ ,  $\delta=1$ 。同时,为了便于考察系统的整体效用,并对网络中的不同类型节点公平起见,本文假设每个移动节点的初始虚拟货币量是相同的,并设任意节点  $i$  的初始虚拟货币量  $V_{0,i}=6$ 。

为了准确地分析相关网络性能,本文使用分组投递率、平均时延和平均剩余能量作为网络性能的评价指标。分组投递率(即数据分组转发的平均成功率)是指正常到达目的节点的数据分组个数和从源节点发送出来的数据分组个数之比值。所谓平均时延,就是在成功交付(数据分组从源节点到达目标节点)相同数量数据分组的前提下,系统所花费的平均时间。平均剩余能量是指成功转发相同数量

的数据分组时,所有节点的平均剩余能量,它是数据转发过程中能量消耗的评价指标。假设网络系统一共只存在 2 类节点。

1) 理性的自私节点(rational selfish node),该类节点会真实地对每次数据转发进行估价,在利益驱使下才会积极参与数据转发,并且会尽可能地最大化其自身利益。

2) 合作节点(cooperative node),该类节点自愿无条件地参与其邻居节点的数据分组转发。

设文献[7]给出的节点激励机制简称为 RF7,并对其进行改进,即模型中的买卖双方使用本文的估价函数,而将节点间的数据转发过程抽象为文献[7]的中介市场模型。设文献[11]给出的节点激励机制简称为 RF11,即数据转发请求节点不采用 Epidemic 算法,而是随机地选择一个邻居节点进行数据转发交易,节点间采用不完全信息双方叫价拍卖模型的线性贝叶斯纳什均衡策略。由于 AMIM 机制、RF11 机制以及改造后的 RF7 机制,三者都是采用虚拟支付的交易方式,并采用类似的估价函数以及相应的报价策略。因此,在仿真实验中,对 3 种机制的数据转发性能进行了比较。

**实验 1** 检验 AMIM 机制能否有效地激励理性的自私节点积极参与数据转发合作。分别在网络系统中采用 AMIM 机制、RF11 机制、RF7 机制和不采用任何激励机制 Nature 状态的 4 种情况下,观测整个系统中数据转发的分组投递率,观测结果如图 2 所示。

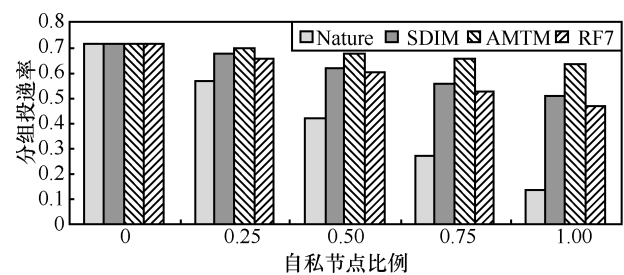


图 2 分组投递率随自私节点比例的比较

图 2 显示,随着网络系统中自私节点比例的增大,在不采用任何激励机制的 Nature 状态下,系统的数据分组投递率快速下降,极端情况下网络系统性能严重退化,分组投递率只有 12% 左右;采用 RF11 激励机制和 RF7 机制,系统的数据分组投递率下降缓慢;采用 AMIM 激励机制,系统的数据分组投递率基本保持不变。原因是在不采用任何激励

机制的 Nature 状态下,理性的自私节点就不会自愿参与数据转发协作,这就降低数据分组投递率。并且,AMIM 机制比 RF11 机制与 RF7 机制更能够有效提高系统的数据分组投递率。

**实验 2** 检验 AMIM 机制能否抑制自私节点对数据转发效率方面的影响。分别在网络系统中采用 AMIM 机制、RF11 机制、RF7 机制和不采用任何激励机制 Nature 状态的 4 种情况下,当系统中自私节点的比例增大时,考察整个网络系统中数据分组从源节点到达目标节点的平均时延,其实验结果如图 3 所示。

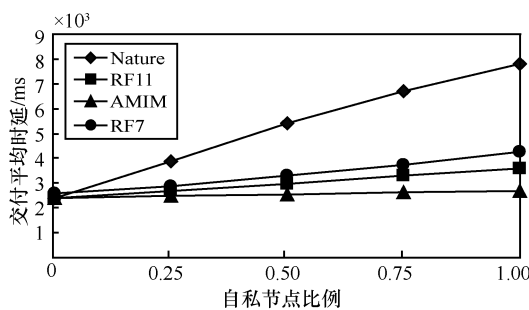


图 3 交付平均时延随自私节点比例的变化

从图 3 可知,当系统中自私节点的比例增大时,在 Nature 状态下,系统的数据分组交付平均时延快速上升;采用 RF7 机制与 RF11 机制,系统的数据分组交付平均时延上升缓慢;采用 AMIM 机制,系统的数据分组交付平均时延几乎不变。并且,RF7 机制的数据分组交付平均时延比 RF11 机制与 AMIM 机制都要大。原因是不采用任何激励机制,节点的自私性将导致部分数据转发交易的失败,若以相同数据分组成功交付的次数为基准,显然会增大系统的平均时延。同时,相对于 RF11 机制与 RF7 机制,AMIM 机制在抑制自私节点对数据转发效率影响方面更有效,而 RF7 机制采用中介节点参与交易,所以在三者中交付平均时延最大。

**实验 3** 检验 AMIM 机制能否降低系统的能量消耗,提高系统的整体效用。不失一般性,不妨设网络系统中合作节点所占比重为 40%,自私节点所占比重为 60%。分别在网络系统中采用 AMIM 机制、RF11 机制、RF7 机制和不采用任何激励机制 Nature 状态的 4 种情况下,当系统中数据转发成功的次数增加时,观测所有节点的平均剩余能量,其观测结果如图 4 所示。

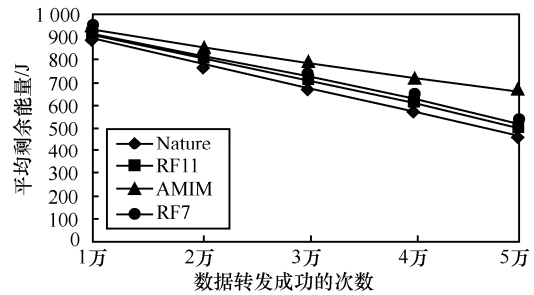


图 4 4 种情况下平均剩余能量的比较

由图 4 显示,当系统中数据转发成功的次数增加时,在不采用任何激励机制的 Nature 状态下,系统中所有节点的平均剩余能量减少得最快;采用 RF11 激励机制与 RF7 机制,系统中所有节点的平均剩余能量减少得较快;采用 AMIM 激励机制,则平均剩余能量减少得最慢。原因是不采用任何激励机制,节点的自私性将导致部分数据转发交易的失败,若以达到相同数据转发成功的次数为基准,显然会增大数据转发请求与响应以及竞拍等过程的次数,系统的能量消耗也会随之增大。并且,相对于 RF11 机制与 RF7 机制,AMIM 机制在降低系统能量消耗方面更有效。

**实验 4** 考察节点缓存空间初始值大小对分组投递率和平均时延 2 个方面性能的影响。不失一般性,不妨设网络系统中合作节点所占比重为 40%,自私节点所占比重为 60%。分别在网络系统中采用 AMIM 机制、RF11 机制、RF7 机制和不采用任何激励机制 Nature 状态的 4 种情况下,当节点缓存空间初始值大小变化时,分别考察系统的数据转发成功率与平均时延,实验结果依次如图 5 和图 6 所示。

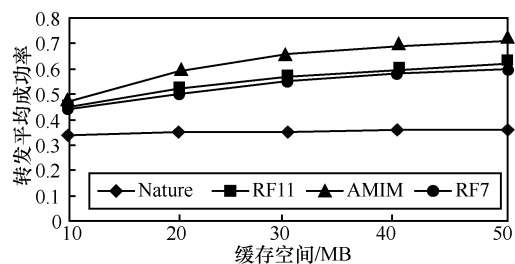


图 5 数据转发成功率随缓存空间的变化

从图 5 可以看出,当节点缓存空间初始值增大时,在不采用任何激励机制的 Nature 状态下,系统的数据转发平均成功率几乎没变;采用 RF11 机制、RF7 机制和 AMIM 机制,系统的数据转发成功率增大,但是 AMIM 机制一直保持着最高的成功率。从图 6 可以看出,当节点缓存空间初始值增大时,在

不采用任何激励机制的 Nature 状态下, 系统的平均时延几乎没变; 采用 RF11 机制、RF7 机制和 AMIM 机制, 系统的平均时延降低, 但是 AMIM 激励机制一直保持着最低的平均时延。这说明, AMIM 机制具有较好的适应性与实用性, 并且抑制自私节点的有效性更强。

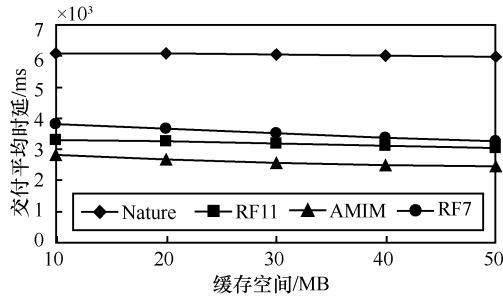


图 6 交付平均时延随缓存空间的变化

综上所述, 在提高移动社交网络的数据分组投递率和效率、降低系统的能量消耗等方面, AMIM 激励机制效果较为明显。

从参考文献[19,20]可知, 由于可能有多个邻居节点一起参与数据转发交易竞拍, 在促使用户节点间交易成功的可能性方面, 一级密封价格拍卖模型比不完全信息双方叫价拍卖模型要更有效。显然, 本文的仿真实验结果与理论分析是一致的。

## 7 结束语

通过对一级密封价格拍卖模型进行扩展, 本文提出了一种移动社交网络的数据转发激励机制 AMIM, 它有效地鼓励了自私节点进行数据转发协作。然而, AMIM 机制尚未考虑如何遏制恶意节点的虚假报价行为, 也没有研究数据分组在转发过程的丢弃问题; 未来的研究工作将集中于对这些异常情况的完善。

## 参考文献:

[1] 张涛, 马建峰, 习宁, 等. 面向服务移动社交网络中基于信任的分布式服务组合方法[J]. 电子学报, 2016, 44(2): 258-267.  
ZHANG T, MA J F, XI N, et al. Trust-based decentralized service composition approach in service-oriented mobile social networks[J]. ACTA Electronica Sinica, 2016, 44(2): 258-267.

[2] LIANG X H, LI X D, SHEN X S. Enabling trustworthy service evaluation in service-oriented mobile social networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(2): 310-320.

[3] 陆佃杰, 张桂娟, 郑向伟, 等. 移动 ad hoc 社交网络中的安全连通性分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(1): 97-110.

LU D J, ZHANG G J, ZHENG X W, et al. Secure connectivity analysis of mobile ad hoc social networks[J]. Science China Information Sciences, 2015, 45(1): 97-110.

[4] 张少波, MD Z A, 刘琴, 等. 移动社交网络中基于代理转发机制的轨迹隐私保护方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(9): 2158-2164.  
ZHANG S B, MD Z A, LIU Q, et al. The method of trajectory privacy preserving based on agent forwarding mechanism in mobile social networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(9): 2158-2164.

[5] GUO B, ZHANG D Q, WANG Z, et al. Opportunistic IoT: exploring the harmonious interaction between human and the Internet of things[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(6): 1531-1539.

[6] 曹怀虎, 朱建明, 潘耘, 等. 情景感知的 P2P 移动社交网络构造及发现算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(6): 1223-1234.  
CAO H H, ZHU J M, PAN Y, et al. Context-aware P2P mobile social network structure and discovery algorithm[J]. Chinese Journal of Computer, 2012, 35(6): 1223-1234.

[7] 皇甫深龙, 郭斌, 於志文, 等. 机会社交网络下基于中介市场模型的激励机制[J]. 软件学报, 2014, 25(Suppl.(2)): 53-62.  
HUANGFU S L, GUO B, YU Z W, et al. Incentive mechanism for opportunistic social networks: The market model with intermediaries[J]. Journal of Software, 2014, 25(Suppl.(2)): 53-62.

[8] RESTA G, SANTI G. A framework for routing performance analysis in delay tolerant networks with application to non cooperative networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2011, 23(1): 2-10.

[9] HUANG T K, RIBEIRO B, MADHYASTHA H V, et al. The socio-monetary incentives of online social network malware campaigns[C]//Edition of the ACM Conference on Online Social Networks, Dublin: ACM, 2014: 115-123.

[10] 李云, 于季弘, 尤肖虎. 资源受限的机会网络节点激励策略研究[J]. 计算机学报, 2013, 35(5): 947-946.  
LI Y, YU J H, YOU X H. An incentive protocol for opportunistic networks with resources constraint[J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 35(5): 947-946.

[11] 刘浩, 陈志刚, 张连明. 自私性移动 P2P 网络中节点激励策略研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 1986-1992.  
LIU H, CHEN Z G, ZHANG L M. Research on node incentive protocol in selfish mobile peer-to-peer network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(8): 1986-1992.

[12] BUCHEGGER S, BOUDEC J Y. Self-policing mobile ad hoc networks by reputation systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(7): 101-107.

[13] YAO L, MAN Y, HUANG Z, et al. Secure routing based on social similarity in opportunistic networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 15(1): 594-605.

[14] KANG X, WU Y D. Incentive mechanism design for heterogeneous peer-to-peer networks: a stackelberg game approach[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(5): 1-13.

[15] 赵广松, 陈鸣. 自私性机会网络中激励感知的内容分发的研究[J].

通信学报, 2013, 34(2): 73-81.

ZHAO G S, CHEN M. Research of incentive-aware data dissemination in selfish opportunistic networks[J]. Journal on Communications, 2013, 34(2): 73 -81.

- [16] 曹怀虎,朱建明,郭树行. 基于博弈论的移动社交网络数据转发激励算法[J].小型微型计算机系统, 2014, 35(7): 1482-1486.

CAO H H, ZHU J M, GUO S H. Research on node incentive mechanism in mobile peer-to-peer network[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(7): 1482-1486.

- [17] YANG Y, LIU B, SHI Y. Design and simulation of the cooperation incentive mechanism in ad hoc network based on evolutionary game[J]. ICIC Express Letters, 2015, 9(10): 2827-2834.

- [18] EPPSTEIN D, GOODRICH M T, LOFFLER M, et al. Category-based routing in social networks:membership dimension and the small-world phenomenon[C]//International Conference on Computational Aspects of Social Networks. 2011:102-107.

- [19] 李帮义,王玉燕. 博弈论与信息经济学[M].北京: 科学出版社, 2016:253-260.

LI B Y, WANG Y Y. Game theory and information economics[M]. Beijing: Science Press, 2016.

- [20] 史蒂文·泰迪里斯. 博弈论导论[M]. 北京: 中国人民大学出版社,2015.

STEVEN T. Game theory: an introduction[M]. Beijing: RenMin University of China Press, 2015.

- [21] VAHDAT A, BECKER D. Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks[R]. San Diego: University of California, San Diego, 2000.

#### 作者简介:



刘浩(1977-), 男, 湖南邵阳人, 湖南人文科技学院副教授, 主要研究方向为并行计算与分布系统、计算机网络安全等。



陈志刚(1964-), 男, 湖南长沙人, 中南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机网络与分布式系统等。



张连明(1972-), 男, 湖南邵阳人, 湖南师范大学教授, 主要研究方向为复杂网络与网络演算等。