

# 激励 Ad hoc 网络自私节点协作的博弈论模型研究

## An Incentive Game Theoretical Mode of Cooperation between Selfish Nodes in Ad hoc Networks

徐许亮, 刘亮龙, 董荣胜

XU Xu-liang, LIU Liang-long, DONG Rong-sheng

(桂林电子科技大学计算机与控制学院, 广西桂林 541004)

(School of Computer and Control, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi, 541004, China)

**摘要:** 基于虚拟货币, 建立激励 Ad hoc 网络自私节点协作的博弈论模型, 然后根据节点的角色选择激励自私节点协作的效用函数, 并证明其有效性与合理性。

**关键词:** 节点协作 Ad hoc 网络 激励 机制

**中图分类号:** TP393.08 **文献标识:** A **文章编号:** 1002-7378(2008)04-0300-03

**Abstract:** Based on game theory, an incentive game theoretic mode of cooperation between selfish nodes in Ad hoc networks is established and a utility function to motivate cooperation among selfish nodes is proposed. The effective and rationality of this mode is proved.

**Key words:** node cooperation, Ad Hoc network, incentive, mechanism

Ad hoc 网络是由一组带有无线收发装置的自主性设备通过无线信道连接而成的自治系统。其网络层的路由发现及分组转发服务不是通过专用的路由设备完成, 而是通过普通节点的共同协作来完成。所以如何增强各节点间的协作性一直是 Ad hoc 网络的研究热点, 解决方案之一就是建立激励机制<sup>[1,2]</sup>。

目前 Ad hoc 网络激励自私节点协作的方案可分为基于声誉值的激励机制、基于虚拟货币的激励机制和基于博弈论的激励方法 3 类<sup>[3~7]</sup>。基于声誉值的激励机制的局限性主要在于, 这个机制会对恶意节点的一些行为失效, 还有, 该机制没有精确量化声誉值, 可能存在错误检测(即把正常节点标识为不良节点)<sup>[3]</sup>。基于虚拟货币的激励机制的局限性在于, 在分组购买模型中, 准确地估算一个分组能够成功地到达目的节点而不被中间节点丢弃所需要的虚拟货币数比较困难, 机制难以防止转发节点实施的欺骗行为; 而且该机制还需要有硬件(防止用户修改

信息的安全卡)的支持<sup>[4,5]</sup>。基于博弈论的激励机制的局限性在于, 如何选择适当的效用函数是一个关键问题, 即效用函数的适当与否直接决定激励机制的好坏<sup>[6,7]</sup>。

本文基于虚拟货币, 建立一个激励 Ad hoc 网络自私节点协作的博弈论模型, 然后根据节点的角色选择激励自私节点协作的效用函数, 并证明其有效性与合理性。

### 1 激励 Ad hoc 网络自私节点协作的博弈论模型

每个博弈都由 3 个要素组成: 参与者, 供参与者选择的策略和效用函数。通过将无线网络中节点间的交互模拟成博弈的方式, 我们利用博弈理论对 Ad hoc 网络进行建模, 建立激励 Ad hoc 网络自私节点协作的博弈论模型, 模型由前提假设、机制、参与者、策略和效用函数构成。

前提假设。在节点协作的博弈模型中, 假设网络中所有的节点都是理性且自私的。理性且自私的意思是: 网络中每个节点的目标都是追求最终收入的最大化, 在模型中就表现为只有当源节点支付的转发补偿大于转发节点的转发成本时, 转发节点才愿

收稿日期: 2008-10-12

作者简介: 徐许亮(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事网络信息安全技术研究。

意协作来转发分组。

机制。模型采用基于虚拟货币的激励机制,参与者可以因其对网络的贡献而获得相应的补偿。

参与者。由于网络中的节点不断扮演着三个角色:源节点、转发节点以及目的节点,模型假设博弈的参与者为承担源节点和转发节点角色的节点。

策略。源节点  $S$  的策略是它是否愿意支付所有转发节点提交的补偿总额  $m_f$ , 其中  $0 \leq m_f \leq m_s$ ,  $m_s$  表示源节点  $S$  所拥有的货币总额; 转发节点  $f_j$  的策略是选择能满足自身利益最大化的转发补偿  $P_{f_j}$ ; 目的节点不参与博弈, 因而没有策略选择。

效用函数。转发节点的目标是得到源节点支付的转发补偿, 其效用函数用

$$U_{f_j}(P_{f_j}) = (P_{f_j} - C_{f_j})Q_{f_j} \quad (1)$$

表示, 其中  $P_{f_j}$  为转发补偿,  $C_{f_j}$  为转发节点的转发成本,  $f_j$  表示转发节点  $j$ ; 源节点的效用函数为

$$U_s(S_s) = m_s - \sum_{j=1}^n P_{f_j} \quad (2)$$

其中  $\sum_{j=1}^n P_{f_j}$  为参与转发源节点分组的所有转发节点提出的转发补偿, 即策略中的  $m_f$ , 而  $S_s$  表示源节点选择的策略。

## 2 模型自私节点效用函数的选择

由于激励 Ad hoc 网络自私节点协作的博弈论模型的源节点只有支付或不支付两种策略, 因此其效用容易计算, 只需用资金总额减去支付资金(选择不支付策略时的支付资金为 0)即可; 而转发节点的效用由于受到较多因素的限制, 比较复杂。所以选取合理的转发节点的效用函数就成为博弈模型的关键。从激励 Ad hoc 网络自私节点协作的博弈论模型的策略可知, 转发节点的效用函数的雏形已经确定, 只有其转发补偿无法确定, 因此确立合适的转发补偿函数是提高该博弈论模型效率与性能的关键。

### 2.1 线性关系的补偿函数

我们如果把转发节点提供的转发服务看成是一种待售的“商品”, 把源节点对转发服务的需要看成是“需求”, 那么转发节点就成为市场上的“卖方”, 而源节点就成为市场上的“买方”。由价值规律知, 商品的价格与需求密切相关。一般地, 商品的价格升高, 会使它的需求降低, 即商品的价格与其需求成反比。因此补偿函数应该满足这一特性: 自变量越大, 因变量反而越小。我们设  $p$  为转发服务这种“商品”的市场价格, 而  $Q$  为此商品在某特定市场中的需求量,

它们之间的关系用函数  $p(Q)$  表示。图 1 为满足这一特性且呈线性关系的补偿函数, 其表达式为

$$p(Q_i) = a - bQ_i \quad (3)$$

其中  $a, b$  是常量, 且  $a > 0, b > 0$ 。商品需求量  $Q$  为源节点发送到目的节点的通信量(例如数据包的数量); 而市场价格  $p$  定义为转发单位通信量所得到的补偿(例如 ¥/数据包), 因此价格  $p$  由源节点的需求所决定。

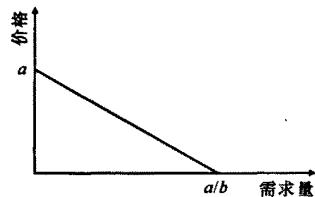


图 1 呈线性关系的补偿函数

因此, 将 (3) 式代入公式 (1) 可得转发节点的效用函数为

$$U_{f_j}(P_{f_j}) = (p(Q) - C_{f_j})Q_{f_j} \quad (4)$$

### 2.2 转发节点效用函数的理论分析

因为模型假设所有节点都以追求最终收入最大化为目标, 因此由 (4) 式可得转发节点  $f_j$  的转发动机为

$$\begin{aligned} \max\{U_{f_j}(P_{f_j})\} &= \max\{(P_{f_j} - C_{f_j})Q_{f_j}\} = \\ \max\{(P_{f_j} - C_{f_j})\frac{(a - P_{f_j})}{b}\}, \end{aligned} \quad (5)$$

通过 (5) 式可以计算出最优价格  $P_{f_j}^*$  为

$$P_{f_j}^* = \frac{a + C_{f_j}}{2} \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (3) 式, 可以得出最佳需求量  $Q_{f_j}^*$  为

$$Q_{f_j}^* = \frac{a - C_{f_j}}{2b} \quad (7)$$

同时  $P_{f_j}^*, Q_{f_j}^*$  应该满足源节点资金总额的限制, 即

$$P_{f_j}^* Q_{f_j}^* \leq M_s \quad (8)$$

其中  $M_s$  表示源节点的总资金。因此, (6)~(8) 式共同组成了转发节点效用函数的定价机制。

命题 1 在节点协作的博弈模型中, 如果  $a \leq C_{f_j}$ , 转发节点将不会为源节点提供转发服务; 而如果转发节点收到大于数量  $Q_{f_j}^*$  的分组, 它将丢弃多余的分组。

证明 首先证明在节点协作的博弈模型中, 如果  $a \leq C_{f_j}$ , 转发节点将不会为源节点提供转发服务。由 (5) 式可得转发节点的效用函数为

$$U_{f_j} = (P_{f_j}^* - C_{f_j})Q_{f_j} = \left[ \frac{(a + C_{f_j})}{2} - C_{f_j} \right] Q_{f_j} =$$

$$\frac{(a-C_{f_j})}{2}Q_s, \quad (9)$$

在(9)式中,因为 $Q_s > 0$ ,如果 $a \leq C_{f_j}$ ,那么 $U_{f_j} \leq 0$ ,即转发节点的纯收入小于等于0。但是由模型的假设知,转发节点的收入只有在大于0时才会提供转发服务,因此结论成立。

同样地,我们将(7)式代入(4)式,则能证明如果转发的数据包的数量多于 $Q_s^*$ ,转发节点收入就会小于他的最大值。因为转发节点的目标就是最大化自己的收入,因此当转发的数据包多于数量 $Q_s^*$ 时,转发节点将不再提供转发服务,从而以后再接收到的数据包就会被丢弃。

**命题2** 在节点协作的博弈模型中,转发节点保持效用函数不变的情况下,真实发送自己的转发成本是其最佳策略。

**证明** 利用反证法证明。假定转发节点发送虚假转发成本(用 $C_{f_j}'$ 表示),且得到的欺骗收入(用 $U_{f_j}'$ 表示)。其真实的转发成本和收入分别用 $C_{f_j}$ 和 $U_{f_j}$ 表示。

因为转发节点的效用函数在整个博弈中保持不变,如果转发节点虚假的转发成本 $C_{f_j}'$ 报告给源节点,由(6)式和(7)式知 $p_{f_j}'$ 和最大需求量 $Q_s'$ 都要发生改变,但是真实的转发成本 $C_{f_j}$ 没有改变。因此转发节点的欺骗效用 $U_{f_j}'$ 为

$$U_{f_j}' = (p_{f_j}' - C_{f_j}) Q_s' = \left[ \frac{(a+C_{f_j}')}{2} - C_{f_j} \right] \frac{(a-C_{f_j}')}{2b}, \quad (10)$$

同时其真实效用 $U_{f_j}$ 为

$$U_{f_j} = (p_{f_j} - C_{f_j}) Q_s = \left[ \frac{(a+C_{f_j})}{2} - C_{f_j} \right] \frac{(a-C_{f_j})}{2b}. \quad (11)$$

将转发节点的欺骗效用与其真实效用进行比较,得到

$$U_{f_j}' - U_{f_j} = \left[ \frac{(a+C_{f_j}')}{2} - C_{f_j} \right] \frac{(a-C_{f_j}')}{2b} - \left[ \frac{(a+C_{f_j})}{2} - C_{f_j} \right] \frac{(a-C_{f_j})}{2b} = -\frac{(C_{f_j} - C_{f_j}')^2}{4b} < 0. \quad (12)$$

从(12)式可知,无论转发节点虚报的转发成本 $C_{f_j}'$ 大于其真实成本 $C_{f_j}$ ,还是其虚报的转发成本 $C_{f_j}'$ 小于其真实成本 $C_{f_j}$ ,它的欺骗收入 $U_{f_j}'$ 总是小

于其真实收入 $U_{f_j}$ 。因此,如果转发节点虚假地报告其转发成本,它得到的欺骗效用始终比真实报告得到的效用少,从而命题成立。

### 3 结束语

Ad hoc 网络自身的特性要求节点间相互协作,而自私节点的存在严重影响节点协作的程度,进而影响网络性能及网络服务的可靠性。本文通过对当前激励协作机制的总结与分析,建立了激励 Ad hoc 网络自私节点协作的博弈论模型,提出激励自私节点协作的效用函数,并理论证明其合理性和有效性。

#### 参考文献:

- [1] 陈立家,江昊. 车用自组织网络传输控制研究[J]. 软件学报, 2007, 18(6):1477-1490.
- [2] Li Xu, Lin Zhiwei, Ayong Ye. Analysis and countermeasure of selfish node problem in mobile Ad hoc networks; proc of 10th International Conference of CSCWD in Design [C]. IEEE Press, 2006: 1027-1030.
- [3] Marti S, Giuli T, Lai K, et al. Mitigating routing misbehavior in mobile Ad hoc networks; proc of IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking[C]. BA Massachusetts, 2000.
- [4] Buttyan L, Hubaux J P. Stimulating cooperation in self-organizing mobile Ad hoc networks [J]. ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications, 2003, 8(5):579-592.
- [5] Buttyan L, Hubaux J P. Nuglets: a virtual currency to stimulate cooperation in self-organized mobile Ad hoc networks[R]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), 2001.
- [6] Urpi A, Bonuccelli M, Giordano S. Modeling cooperation in mobile ad hoc networks: a formal description of selfishness[C]. IEEE/ACM Workshop WiOpt, 2003, 39(1):118-124.
- [7] DaSilva LA, Srivastava V. Node participation in peer-to-peer and ad hoc networks: a game theoretic formulation; proc of 1st Workshop on Games and Emergent Behavior in Distributed Computing Environments[C]. UK: Birmingham, 2004.

(责任编辑:韦廷宗)