

自组织 P2P 网络分布式合作激励机制研究现状^①

于 坤, 陈晓兵, 朱全银

(淮阴工学院 计算机工程学院, 淮安 223002)

摘 要: 自组织 P2P 网络本质上的节点自治及理性特征决定了网络系统目标与节点自身利益的不一致性, 合作激励机制能够引导节点采用利他的行为策略, 弥合系统与个体之间的利益冲突. 以提高自组织网络可用性为目标, 探讨了多种有效的、实用的分布式合作机制, 总结了自组织 P2P 网络合作激励机制的设计中存在的问题和研究方向.

关键词: P2P 网络; 自组织网络; 合作激励机制; 声誉机制; 交换机制

Survey on Distributed Cooperation Incentive Mechanisms in Self-organized P2P Networks

YU Kun, CHEN Xiao-Bing, ZHU Quan-Yin

(Department of Computer Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian, Jiangsu, China 223001)

Abstract: The nature of self-organized P2P network is that most nodes are autonomous and rational which leads to the conflict between the top objective of the system and own interest of the node. An cooperation incentive mechanism can introduce altruistic behaviors, decrease the conflict between the system and the individual. In order to improve network availability, the author discusses a few efficient, practical distributed cooperation mechanisms and points out the pending problems and research directions in the design of cooperation mechanisms in self-organized P2P networks.

Key words: P2P network; self-organized network; cooperation incentive mechanism; reputation mechanism; exchange mechanism

自组织网络普遍具有动态性强、无中心节点、规模庞大等特点, 在集中式合作机制中, 中心节点易成为性能的瓶颈和安全的隐患, 分布式合作机制是当前研究的重点. 但是这种分布式的组织方式也增加了路由、信息存储、服务分配等方面机制设计的复杂性; 同时, 由于分布式合作机制的执行只能由自私节点本身承担, 该机制执行本身也存在激励问题. 本文通过对自组织 P2P 网络中合作理论的应用分析, 总结了分布式合作激励机制的设计中存在的问题和研究方向.

1 基于多人重复随机博弈的合作激励机制

在 P2P 网络研究中, 重复交互有时被建模为多人随机博弈模型, 并分析重复交互对合作的激励作用.

Vikram 建立了 Ad hoc 网络路由的博弈模型^[1], 假设用户的路由请求在网络中呈均匀分布, 用户参与不

同能量级别的多类节点间的报文转发. 通过节点能量信息的分布, 路由问题可以建模成一种同能量级节点间的多人随机匹配博弈模型: 用户区分不同能量等级的节点, 但不区分每一等级的单个节点, 用户只与各能量类整体进行重复博弈. Vikram 证明, GTFT 策略是用户的一个子博弈纳什均衡, 同类节点付出等量的能量损耗, 获得相同的报文转发服务. 由于惩罚具有非针对性, GTFT 策略相当脆弱: 如果恶意节点拒绝贡献或只提供部分带宽, 则同类节点都将缩减等量带宽以示惩罚, 破坏整个系统的合作关系.

Márk 将报文转发问题建模成节点与整个网络的重复博弈^[2]. Márk 提出一种连续型 TFT 策略: 节点 i 依据本轮自身体验的合作率 \bar{y}_i 进行决策 σ_i , 决定下轮的合作程度 x_i , 用户效用即合作率 \bar{y}_i 取决于转发路径上节点合作率的连乘. 在满足一定依赖环路关系和效

^① 收稿时间:2012-03-10;收到修改稿时间:2012-05-06

用约束的前提下存在合作的纳什均衡, 这时用户的最佳策略是 TFT 策略. 但是, 该合作策略在噪音环境中鲁棒性差. 如图 1 所示, 每个节点存在一条长度为 3 的转发路径, $\bar{y}_i = \prod_{j \neq i} x_j$, 若某一时刻存在 $x_i < 1$, 则 $t \rightarrow \infty$ 时, $x_i \rightarrow 0$. 若转发存在多个中间节点, TFT 策略都会引发节点间惩罚的不断升级, 导致合作关系崩溃.

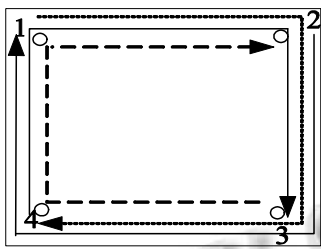


图 1 转发路径长度大于 1 时, 噪音导致合作崩溃

SLIC^[3]是一种无结构 P2P 网络路由的合作激励机制. SLIC 假设在类 Gnutella 网络中, 用户通过向邻居节点泛洪来实现查询功能, 用户可以通过丢弃经过的查询报文以降低带宽消耗. SLIC 采用 TFT 方案激励用户的合作: 节点统计经过某一邻居的查询成功率, 并以此为权重来计算分配给该节点的转发带宽的比例. 显然, SLIC 与 Márk 方案类似, 两者存在同样的缺陷.

因此, 尽管多人重复博弈存在合作解, 但是解的稳定性往往存在问题, 针对群体的惩罚并不能应用到实际网络中. 从另一角度看, 信息的重要性是显而易见的, 充分的信息交流对合作的建立甚至是决定性的, 从而为合作机制中的声誉管理的必要性提供了理论依据.

2 基于交换及经济手段的合作激励机制

交换为节点间的协同与合作提供了一种更为直接的途径, 交换方式包括以下两种基本方式.

2.1 物物交换

物物交换包括 2 路交换 (2-way) 与多路交换 (N-way)^[4], 要实现这种原始的合作方式需满足两方面约束: 交换双方存在相互的需求及交换同时性.

2-way 交换是指交换过程只涉及两个交换实体, 节点间对等需求关系通常很难满足^[5]. BitTorrent^[6]增加合作率的方法值得借鉴: 通过将每个文件分割成大小相等的块, 不同节点相互下载对方的文件块, 从而增

加了对等需求. 任意节点在提供服务时采用 TFT 策略, 其对等节点提供下载的带宽越大, 获得该节点服务的可能性也越大.

BitTorrent 方法只适用于流行文件共享等特定的应用中. 为了扩大应用面, Anagnostakis^[4]对 2-way 交换进行了扩展, 引入多路交换方法 N-way 交换, 利用多个节点间的需求环路增加交换的机会. 每个节点发布自己的服务请求, 当服务请求构成一个请求环路时, 环路上的节点依次从环路的上一跳获得服务, 形成多节点的交换环路. 对应 N-way 的交换请求, 节点通常需在本地维护一个最大深度为 N 的请求树, 以便侦测最大 N-way 的请求环路.

2.2 基于一般等价物的交换

采用一般等价物可以克服物物交换的诸多问题, 且机制设计更具灵活性. 货币是一般等价物的基本形式, 微支付 (Micro-Payment) 是达成服务的基本途径, 这种方式需要研究资源的定价以及安全支付两个关键问题. 微支付的具体形式包括虚拟货币、声明、信用、甚至贡献值等, 当前的微支付方案大都采用集中货币管理. 如 Sprite^[7]借助清算中心 CCS 管理节点的支付和酬劳, 报文中继因此获得补偿; 为了监视节点的运行, 成功的转发必须反馈给 CCS, 中心节点管理所有网络成员的交互和支付行为. 显然, 清算中心需承受沉重的业务负荷, 制约系统的进一步扩展. Karma [8]是一种应用于 P2P 网络的贡献值测度, 节点的 karma 值由一系列第三方节点 bank-set 监控, 然而, 这些独立于系统的 Bank-Set 依然构成了一种逻辑上集中的管理监控机构.

集中管理方式制约了微支付的可扩展性, 虚拟货币 nuglet^[9]采用一种防篡改的硬件模块实现货币的分布式管理, 以支持 Ad hoc 网络中有偿的报文转发. 但 nuglet 由节点在本地进行维护, 这种硬件机构在其他 P2P 网络中难以实现.

3 基于声誉的合作激励机制

3.1 声誉的概念

当前, 对声誉与货币的概念区分较模糊, 实际上两者还是存在一定的区别的. 首先, 货币机制是指服务方根据转移的支付提供相应服务, 而在声誉机制下, 服务方直接根据客户声誉值来提供有区分的服务, 并不发生直接的声誉转移. 其次, 声誉的主观性使得不

同用户可以对同一实体作出相异的评价^[10], 全局一致性并不是评估声誉的必要条件. 而货币测度往往要求实时的全局一致性, 包括货币的总量和货币的增减. 因此, 声誉的可扩展性比货币更强, 更易于应用到大规模的自组织网络中.

3.2 声誉的管理

用户行为具有延续性才能保证声誉的有效, 这时根据交互历史可以对实体的未来行为进行预测^[10]. 声誉往往反映用户的某种相对稳定的内在特征, 比如用户的合作倾向, 因此可以采用抽样和统计技术降低维护开销^{[11][12]}.

用户根据直接的交互经验形成对交互对象的局部声誉, 主要应用对象为小规模的合作群体, 如 OCEAN^[13]这种小规模 Ad Hoc 网络. 局部声誉没有充分利用其他节点的经验, 随着网络规模的增加, 局部声誉的效用会逐渐减少^[14], 全局声誉能更为有效的建立声誉评价.

可信推荐是全局声誉模型的一个基本问题, 目前这方面的研究正在不断深化, 并提出以下一些解决思路: 1) 基于可信节点的推荐: 如 CONFIDANT^[15]假定每个节点都拥有一个预定义的可信任的朋友列表, 在朋友间传播的信息被认为是可信的; 2) 增加直接声誉的权重, 降低恶意推荐的影响(如 Core^[16]); 3) 基于推荐可信度: 节点完全可信的假设条件过于苛刻, 文献^[17]对 CONFIDANT 作出进一步完善, 引入信任值区分节点在推荐中的不同可信度; EigenTrust^[18]提出了一种基于推荐可信度计算声誉的分布式迭代算法, 用于计算节点的全局声誉, 但该算法没有解决推荐可信度的评估问题.

那么如何确定推荐的可信度呢? 一种最简单的方法是给所有节点的推荐设置相等的权重^[86]; 而另一个极端方法是通过引入推荐的推荐、推荐的推荐的推荐、..., 以充分利用间接的推荐信息, 但是其声誉逻辑会陷入递归定义的困境之中. 一种解决办法是摒弃间接的推荐可信度信息, 只利用推荐者向己方所提供的推荐的准确度来计算其推荐可信度. 另一种方法建立在网络基本可信的基础上, 通过比较多节点的推荐一致性来过滤不真实的推荐^[19]. 在大规模网络中, 通过随机选择推荐方可以降低推荐中的欺骗行为.

目前还存在一些局部声誉与全局声誉的折衷方案. 在 LARS^[19]中, 邻居节点间交换推荐信息, 一旦节点侦测到 m 个邻居都认为某节点不可信, 他将通过 WARNING 消息通知其他邻居. 通过将用户声誉的传播限制在邻居节点之间, 降低了系统的声誉维护开销, m 值的设定则抑制了声誉传播时的欺骗及勾结行为.

3.3 基于声誉的合作机制

声誉在合作机制中主要有以下两方面的作用:

(1) 声誉辅助的合作机制

当前, 在线交易系统(如 eBay^[20]等)主要通过市场和货币进行商品交换. 声誉反映了用户交互的诚信程度, 即用户忠实履行交易协定的概率, 因此客户选择高声誉服务方是占优策略, 而对于服务方, 失信行为可能带来短期收益, 但由于客户的流失而造成的长期经济损失可能更大. 因此, 声誉机制可以有效的促进经济活动中用户的合作.

(2) 间接互惠合作机制

在间接互惠的合作机制中, 节点 i 提供服务获得声誉, 继而其他节点 $A-i$ 依据节点 i 的声誉为其提供服务. 这种间接互惠比直接互惠方式更适合于规模庞大、成员动态性高的 P2P 网络. 对于典型系统的分析表明间接互惠的有效性跟用户自主性密切相关:

(a) 节点不能自主决定服务策略

Peer-Approved^[21]的用户声誉由用户提供的服务数量来衡量, 节点只能从声誉比自己低的节点下载文件. 为了获得更好的服务, 节点必须共享更多文件以获得足够的声誉. 该合作机制成立的基本前提是参与节点在服务策略的选择方面是完全没有自主的, 该机制等同于采用了 Peer-Approved 作为服务规则的集中控制系统. 同理, 基于区分服务的 Service-Quality 策略^[21]同样有效.

(b) 随机匹配博弈模型下节点的服务策略可自主选择

一旦服务方可以自主选择服务策略, 以上合作机制可能失效. 以随机匹配博弈模型为例, 这时交互对象的选择、节点请求的服务量都是随机的、非策略化的. 路由和报文转发就是此类博弈问题. 一方面, 在绝大部分的路由算法中, 路由的下一跳选择依赖于目标节点和路由表, 而与节点声誉无关; 另一方面, 路由请求来源于用户的需求, 是不可预期的行为, 而不是用户的策略性行为, 因此不存在通过过度消费掠夺系统资源的问题, 节点的策略空间只包括转发与不转发两种策略. 对于随机匹配博弈, 用请求满足率作为声誉测度是合理的. 但一阶声誉测度会引起二阶搭便车问题. 在多种 Ad hoc 网络^{[13][15][19]}以及应用层 P2P 网络^{[11][18][21]}的路由、报文转发及文件服务中这一问题普遍存在.

以 Peer-Approved 为例, 区分客户声誉的 Peer-Approved 策略与其他非区分策略相比, 合作所获得的收益并无二致, 节点并没有动机以降低自己声誉为代

价拒绝为低声誉节点提供文件共享,从而导致了惩罚机制的缺失.文献[23]对搭便车者提出了三种不同程度的惩罚方案:快速降低搭便车者发出的查询请求消息包的 TTL 值、忽略自私节点的查询请求乃至直接取消与搭便车者的连接.显然,惩罚必然带来声誉值的降低,因此“惩罚背叛”这一威胁的可信度存在疑问.

采用二阶声誉测度可解决二阶搭便车问题,声誉模型的要素不但包括评估对象的历史行为,也包括这些行为的作用对象的声誉.文献[11]研究了 DHT 网络中的自私路由问题.协议采用二阶声誉的变种,提出一种促进合作的社会规范:对于背叛行为实行个阶段的惩罚,调节可以调整惩罚的力度;声誉的评价标准将对背叛的惩罚看成正义的行为,不影响用户声誉.服从该社会规范成为子博弈均衡策略,从而抑制了二阶搭便车行为.

(c) 节点具有更高的决策自由度

在某些系统中随机匹配条件也不能满足,节点具有相当的自主能力进行相互选择.这时,理性节点倾向于选择高声誉服务端,使高声誉节点承受不公正的高服务负载,从而出现“柠檬”市场现象:节点争相降低自己的声誉,激励机制失效.

针对“柠檬”市场问题,Thanasis 认为基于声誉的提供者选择与基于声誉的客户选择相配合才能有效的促进合作^[12].但是客户选择过程遗留两个问题:(i)在服务容量受限的情况下,最高声誉者优先是否是选择客户的占优策略?类似问题出现在网络博弈^[24]以及近期的 P2P 领域^{[25][26]};(ii)如何在选择客户时避免采用无条件合作策略,从而避免二阶搭便车问题?

文献[27]则同时考虑了服务量 d 和消费量 c ,建立基于慷慨度 $generosity$ 的声誉测度: $g(i)=d(i)/c(i)$.基于该声誉测度, Feldman 提出了一种互惠的合作方案:节点 j 根据 j 与 i 双方的慷慨度为 i 提供服务: $gj(i)=g(i)/g(j)$.

在实际的 P2P 网络中,以上博弈模型有时还是很难准确描述网络特征,比如节点的异构性,包括带宽、存储容量等能力的异构性以及需求的异构性,有时还需考虑资源分布的不均匀性以及网络拓扑.目前较为有效的方法是将服务和消费相结合(如上述 $generosity$ 测度),这时声誉与积分等货币形式的界限将相当模糊,声誉机制可被看作微支付手段的扩展,而采用效用函数方法分析激励问题.常见的声誉测度包括:

$$Rep(i)=d(i)-\lambda c(i)^{[22]} \quad (1)$$

$$Rep(i)=d(i)/c(i)^{[14]}^{[27]} \quad (2)$$

其中, $Rep(i)$ 为用户 i 的声誉值, $d(i)$ 、 $c(i)$ 分别为用

户 i 被服务而获得的收益以及提供服务所付出的开销,实际上 $Rep(i)$ 在一定程度上反映了用户 i 对系统的贡献.

T. B. Ma^[25]提出了一种更为复杂的声誉测度——贡献值.在该系统模型中,节点随机承担服务器或客户机角色,服务器策略性的在多客户机间分配带宽.该问题存在一种社会最优的分配方案.机制设计的基本思想是,如果服务方在带宽分配时遵循这种既定方案,则该节点可以获得最大的累积贡献值,从而保证机制的激励兼容性.带宽的分配与客户的声誉正相关,客户节点为了获得更高的效用,就必须贡献更多的带宽.

以上研究并未讨论服务提供策略本身的激励兼容性,即所谓二阶搭便车问题.以声誉测度 $generosity$ 为例,服务节点的声誉值由其付出的服务量与获得的服务量共同决定,但是节点 i 的声誉计算并不区分服务对象的声誉.因此节点实际上无需关心为谁服务,从而导致被服务节点并不在意自身的声誉高低,声誉机制失效.

4 总结与展望

当前,在 P2P 网络中实施的激励机制多采用集中式结构,面临可用性与可扩展性等多方面的缺陷,而分布式机制则面临系统自身的激励问题,因为激励机制的维护工作必须由网络成员节点自己承担,这种分布式激励机制比集中式结构要复杂的多.当前所提出的多种方案,无论是交换方案,抑或声誉方案,都存在一些自身的弱点,只能应用于特定的应用环境中.对于交换方案,如何实现细粒度的、切实高效的分布式微支付是关键的技术难题,声誉机制应进一步加强声誉的经济学分析,为基于声誉的合作机制提供坚实的理论基础;应在机制设计中充分考虑参与者决策的自主能力和决策空间对机制有效性的决定性影响,提高声誉机制的完备性与鲁棒性.

参考文献

- 1 Srinivasan V, Nuggehalli P, et al. Cooperation in Wireless Ad hoc Networks. In Proceedings of IEEE INFOCOM'03, San Francisco, 2003
- 2 Márk Félegyházi, Levente Buttyán. Equilibrium Analysis of Packet Forwarding Strategies in Wireless Ad hoc Networks-The Static Case. In: Proc. of the Personal Wireless Communications. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- 3 Qixiang Sun and Hector Garcia-Molina. Slic: A selfish link-based incentive mechanism for unstructured peer-to-peer

- networks. In: Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems, 2004,506–515.
- 4 Anagnostakis K, Greenwald M. Exchange based Incentive Mechanism for Peer-to-Peer File Sharing. In: Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems, ICDCS 2004.
- 5 Chun B, Fu Y, Vahdat A. Bootstrapping a distributed computational economy with peer-to-peer bartering. In: Proceedings of 1st Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems, June 2003.
- 6 Herley C, A Bharambe, V Padmanabhan. Analyzing and improving a BitTorrent network's performance mechanisms. In: Proceedings of IEEE INFOCOM'06, April 2006.
- 7 Zhong S, Chen J, et al. Sprite: A simple, cheatproof, credit-based system for mobile ad hoc networks. In: Proceedings of IEEE INFOCOM 2003, San Francisco, April 2003,1987–1997.
- 8 Vishnumurthy V, Chandrakumar S, et al. KARMA: a secure economic framework for P2P resource sharing. In: Proceedings of the Workshop on the Economics of Peer-to-Peer Systems, 2003.
- 9 Buttyan L, Hubaux JP. Stimulating cooperation in self-organizing mobile ad hoc networks. *ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications*, 2003,8(5):579–592.
- 10 Mui L, Mohtashemi M, A Halberstadt. A Computational Model of Trust and Reputation. In: Proceedings of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, January 2002,2431–2439.
- 11 Blanc A, Liu YK, et al. Designing incentives for peer-to-peer routing. In: Proceedings of IEEE INFOCOM, Miami, FL, USA, 2005,374–385.
- 12 Papaioannou TG, Stamoulis GD. Effective use of reputation in peer-to-peer environments. In: Proceedings of IEEE/ACM CCGRID (Workshop on Global P2P Computing), April 2004.
- 13 Bansal S, Baker M. Observation-based cooperation enforcement in ad hoc networks. Technical Report, Stanford University, CA, July 2003.
- 14 Lai K, Feldman M, et al. Incentives for cooperation in peer-to-peer networks. In : Proceedings of the Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems, Berkeley, CA, 2003.
- 15 Buchegger S, J Le Boudec. Performance analysis of the CONFIDANT protocol: Cooperation of nodes: Fairness In Dynamic ad-hoc networks. In: Proceedings of IEEE/ACM Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MobiHOC), Lausanne, CH, 2002,226–236.
- 16 Michiard P, Molva R. Core: A COLlaborative REputation mechanism to enforce node cooperation in mobile ad hoc networks. In: Proceedings of IFIP-Communicatin and Multimedia Securitiy Conference, 2002,107–121.
- 17 Buchegger S, Boudec JL. A Robust Reputation System for P2P and Mobile Ad-hoc Networks. In: Proceedings of the Second Workshop on the Economics of Peer-to-Peer Systems, 2004.
- 18 Kamvar SD, Schlosser MT, et al. EigenRep:reputation management in peer-to-peer networks. In: Proceedings of the WWW Conference, Budapest, Hungary, May 2003.
- 19 Hu J. Cooperation in mobile ad hoc networks. Technical report, Florida State University, January 2005.
- 20 Resnick JP, Zeckhauser R, et al. Reputation systems. *Communications of the ACM* 43,2000,43(12):45–48.
- 21 Ranganathan K, Ripeanu M. To Share or not to Share: An Analysis of Incentives to Contribute in Collaborative File Sharing Environments. In: Proceedings of the Workshop on Economics of Peer to Peer Systems, 2003.
- 22 <http://maze.pku.edu.cn>.
- 23 Karakaya M, Korpeoglu I, Ulusoy O. A distributed and Measurement-based framework against free riding in Peer-to-Peer networks. In: Proceedings of the 4th International Conference on Peer-to-Peer Computing,2004,276–277.
- 24 Orda A, Rom R, Shimkin N. Competitive Routing in Multi-User Communication Networks. *IEEE Transactions on Networking*, 1993,1(5):510–521
- 25 Richard TB, Sam C, et al, An Incentive Mechanism for P2P Networks. In: Proceedings of the 24th International Conference on Distributed Computing Systems, March 2004,516–523.
- 26 Iosifidis G, Koutsopoulos I. Reputation-assisted Utility Maximization Algorithms. In: Proceedings of 16th International Workshop on Quality of Service, June 2008, 20–29.
- 27 Michal Feldman, Kevin Lai, et al. Robust Incentive Techniques for Peer-to-Peer Networks. In: Proceedings of the 5th ACM conference on Electronic commerce, New York, USA, 2004.