

## 基于博弈论的 P2P 系统激励机制

欧阳竟成<sup>1,3</sup>, 林亚平<sup>1,2</sup>, 周四望<sup>2</sup>, 谭义红<sup>1</sup>

(1. 湖南大学计算机与通信学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学软件学院, 长沙 410082; 3. 湖南理工学院计算机与信息工程系, 岳阳 414006)

**摘要:** 针对 P2P 系统中的白洗问题, 提出一种新的激励机制, 采用博弈理论分析方法, 揭示传统 Tit-for-Tat 策略在具有白洗用户的 P2P 系统中进化的不稳定性, 指出引入恰当的身份费用改进 Tit-for-Tat 策略是种遏制白洗攻击的有效方法。仿真实验结果表明, 该机制能够有效提升系统整体性能。

**关键词:** 白洗; 激励; 进化稳定策略

### Incent Mechanism in P2P System Based on Game Theory

OUYANG Jing-cheng<sup>1,3</sup>, LIN Ya-ping<sup>1,2</sup>, ZHOU Si-wang<sup>2</sup>, TAN Yi-hong<sup>1</sup>

(1. College of Computer & Communication, Hunan University, Changsha 410082; 2. Software School, Hunan University, Changsha 410082; 3. Dept. of Computer & Information Engineering, Hunan Institute of Science & Technology, Yueyang 414006)

**【Abstract】** Aiming at the problem of whitewashing in Peer-to-Peer(P2P) system, a novel incent mechanism is proposed. Using game theoretic analysis, this paper reveals that the conventional Tit-for-Tat(TfT) is not an evolutionary stable strategy in P2P systems with some whitewashers. It also indicates that an improved strategy to integrate an appropriate identity cost into TfT is an effective method to impress whitewashers. Simulation experimental results show this mechanism promotes the performance of the whole system effectively.

**【Key words】** whitewashing; incent; evolutionary stable strategy

#### 1 概述

Peer-to-Peer(P2P)系统的可扩展性依赖于节点自愿贡献资源, 然而目前普遍存在的自由骑(free-riding)<sup>[1]</sup>现象限制了 P2P 系统的性能。文献[1]的研究表明: P2P 系统中有 70% 的用户不共享任何资源, 他们只是简单地骑在其他共享资源的用户之上。因为只有少量的用户共享信息或提供服务, 所以网络中约 50% 的文件查询响应来自 1% 的资源共享节点。于是, 共享资源的节点容易遭遇拥塞, 导致“公共灾难”问题<sup>[2]</sup>。声誉系统能够对自由骑施加惩罚, 并将其与积极贡献者区分开来, 但许多 P2P 应用为吸引用户基本上采用免费身份或廉价笔名。如果一个自由骑者不断地更改身份, 反复加入网络, 那么它能够逃避系统的惩罚, 这就是白洗攻击<sup>[3]</sup>。打击白洗攻击的方法有 2 种: (1) 要求用户不可更改身份或笔名, 如利用一个中心信任权威服务器给每个节点分配一个强身份名, 然而目前大多数 P2P 系统采用非结构化方式组织节点成为覆盖网, 它们排拆这种集中授权机制。(2) 对所有新手(包括合法新手与白洗者)均施加一个惩罚, 但这又引起了社会费用<sup>[4]</sup>。因此, 如何打击自由骑与白洗, 激励资源共享是 P2P 系统目前迫切需要解决的主要任务之一。

文献[5]指出: Tit-for-Tat(TfT)策略是种激励博弈选手合作的进化稳定策略, 它的决策过程是基于直接互惠观点的。它在第 1 步时总是合作, 即与陌生人合作, 从第 2 步开始选手就采用对手上一局的行为。TfT 策略的另一个变体就是概率 TfT, 即 TfTp, 它总是以概率  $p$  与陌生人合作, 然而, TfT 策略的稳定性依赖于 2 个条件: 永久身份与可追踪行为(合作与背叛)。如果这 2 个条件被满足, 在当前博弈局中背叛的用户在下一局会受到惩罚, 但在 P2P 网络环境下这 2 个条件并不总是成立, 由于廉价笔名, 因此用户的身份会经常改变;

同时, 在某些应用中用户的背叛行为是不可追踪的。

本文分析在自由身份条件下 TfT 策略应对白洗攻击的进化稳定性, 并提出改进意见。仿真结果显示, 最初有 50% 白洗者的 P2P 网络, 引入改进的 TfT 策略后, 经过有限局数的节点交互与演化, 合作节点百分比达到 93%。

#### 2 进化稳定策略的概念

策略是从博弈历史到当前行为的一个映射, 又分为纯策略与混合策略。混合策略是由可能的行为以及对应每一行为权重的概率分布组成。在任一局中一个策略的得分决定下一局中该策略的相对人数<sup>[5]</sup>。因此, 经过一段时间后, 得分低的策略人数减少, 而得分高的策略人数增加。一个策略的拟合度(fitness)是该策略的期望得分。设  $V(A/B)$  表示策略  $A$  与策略  $B$  交互时的拟合度, 如果  $V(A/B) > V(B/B)$ , 那么就说策略  $A$  入侵策略  $B$ 。如果没有任何策略能够入侵策略  $B$ , 那么策略  $B$  就是进化稳定策略(ESS)。形式表达为: 对任意策略  $A$ , 如果  $V(B/B) > V(A/B)$  或  $V(B/B) = V(A/B)$  且  $V(B/A) > V(A/A)$ , 那么策略  $B$  就是进化稳定策略。

除上述个体入侵之外, 还有簇入侵与混合入侵。簇入侵就是指入侵者能够在某种程度上控制他的交互对象, 如果  $xV(A/A) + (1-x)V(A/B) > V(B/B)$ , 那么就说策略  $A$  的  $x$ -簇入侵策略  $B$ ,  $x$  是策略  $A$  用户之间交互的比率, 而  $B$  与  $A$  的交互被

**基金项目:** 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ20049); 湖南省教育厅科研基金资助项目(03C162)

**作者简介:** 欧阳竟成(1967-), 男, 博士研究生, 主研方向: 对等网络, 信息检索, 信息安全; 林亚平, 教授、博士、博士生导师; 周四望, 副教授、博士; 谭义红, 博士研究生

**收稿日期:** 2008-12-15 **E-mail:** oyjchen@163.com

忽略。如果  $qV(A/A)+(1-q)V(A/B)>qV(B/A)+(1-q)V(B/B)$  且  $q$  是入侵策略  $A$  与本地策略  $B$  的随机混合比率, 那么就策略  $A$  在随机混合下入侵策略  $B$ 。某些进化策略不能被个体入侵, 但可能被簇入侵或混合入侵。在不确定局数的重复博弈中, 计算策略的拟合度  $V$  时, 一般使用折扣因子  $w(0<w<1)$  对后来的附加局得分进行折扣统计。

### 3 改进Tit-for-Tat策略

引用囚徒困境博弈来模拟 P2P 系统节点之间的合作与背叛。设置该博弈的收益值矩阵如下: 若 2 人都合作, 则均得  $R$  分; 若 2 人都背叛, 则均得  $P$  分; 若一人背叛一人合作, 则合作者得  $S$  分, 背叛者得  $T$  分。收益值满足如下关系:  $S<P<R<T$  且  $(R+P)<(S+T)$ , 但  $2R>(S+T)$ 。该约束关系表达的含义是: 若仅一局博弈, 用户从个人利益出发, 肯定选择背叛; 若无限局重复博弈, 用户选择合作可以共同富有, 选择背叛就共同贫穷。白洗策略用  $WW$  表示, 一个白洗用户总是背叛, 并且每次交互均改变身份。

列出  $WW$  应对  $TfT$  的拟合度以及  $TfT$  应对  $TfT$  的拟合度如下:

$$V(WW | TfT) = \sum_{k=0}^{\infty} (T \times w^k) = \frac{T}{1-w} \quad (1)$$

$$V(TfT | TfT) = \sum_{k=0}^{\infty} (R \times w^k) = \frac{R}{1-w} \quad (2)$$

因为  $T>R$ , 所以  $V(WW|TfT)>V(TfT|TfT)$ , 即白洗能够入侵 Tit-for-Tat 策略, 原因是白洗者利用  $TfT$  策略对陌生人的慷慨, 因此, 传统的 Tit-for-Tat 策略在白洗攻击下不是进化稳定策略。改进 Tit-for-Tat 策略的途径有 2 条: 首先降低 Tit-for-Tat 策略对陌生人的慷慨程度, 引入合作概率为  $p$  的 Tit-for-Tat 策略, 即  $TfTp$ ; 其次增加  $TfT$  对所有陌生人的惩罚, 即对用户设置一个身份费(用  $C$  表示)。

**定理 1** 对任意折扣因子  $w$  和任意概率  $p$ , 白洗能够入侵  $TfTp$  策略。

证明 为证明这个定理, 只需证明  $V(WW|TfTp)>V(TfTp|TfTp)$  对任意的  $w$  和  $p$  均成立。因此, 列出  $WW$  应对  $TfTp$  的拟合度以及  $TfTp$  应对  $TfTp$  的拟合度如下:

$$V(WW | TfTp) = \sum_{k=0}^{\infty} (pT + (1-p)P)w^k = \frac{pT + (1-p)P}{1-w} \quad (3)$$

$$V(TfTp | TfTp) = p^2 \frac{R}{1-w} + p(1-p) \frac{S+T}{1-w} + (1-p)^2 \frac{P}{1-w} \quad (4)$$

从式(3)、式(4)可以得到:

$$\begin{aligned} V(TfTp | TfTp) - V(WW | TfTp) &= \\ &= p^2 \frac{R}{1-w} + p(1-p) \frac{S+T}{1-w} + (1-p)^2 \frac{P}{1-w} - \\ &= \frac{pT + (1-p)P}{1-w} = \\ &= \frac{p^2R + pS - p^2S - p^2T - pP + p^2P}{1-w} = \\ &= \frac{p(p(R-T) + (1-p)(S-P))}{1-w} \end{aligned} \quad (5)$$

由于  $T>R$ ,  $P>S$  且  $V(TfTp|TfTp)-V(WW|TfTp)<0$ , 即  $V(WW|TfTp)>V(TfTp|TfTp)$ , 因此  $WW$  能够入侵  $TfTp$ ,  $TfTp$  不是进化稳定策略, 这里假定白洗者能够免费获得一个新的身份进入系统, 但在大多数应用中, 身份是廉价的而不是免费的。现人为地集成一个身份费用  $C$  到 P2P 系统中, 即新用户向 P2P 系统注册一个身份时, 必须支付一定的虚拟币值  $C$ , 再结合  $TfT$  策略, 形成  $TfTc$  策略。

**定理 2** 如果  $C$  大于  $(T-R)/w$ , 则白洗不能入侵  $TfTc$ 。

证明 施加一个身份费用  $C$  给新用户之后, 各策略间交互的拟合度为

$$V(WW | TfTc) = \frac{T-C}{1-w}$$

$$V(TfTc | TfTc) = \frac{R}{1-w} - C$$

$$V(TfTc | WW) = \frac{S}{1-w} - C$$

$$V(WW | WW) = \frac{P-C}{1-w}$$

从上面几个式子可以得到:

$$V(TfTc | TfTc) - V(WW | TfTc) = \frac{R-T+wC}{1-w} = \frac{wC-(T-R)}{1-w} \quad (6)$$

如果  $C>(T-R)/w$ , 那么  $V(TfTc|TfTc)>V(WW|TfTc)$ , 即白洗个体不能入侵  $TfTc$ 。下面再分析当白洗以  $x$ -簇出现时, 定理的真实性。

$$\begin{aligned} V(TfTc | TfTc) - (xV(WW | WW) + (1-x)V(WW | TfTc)) &= \\ &= \frac{wC-(T-R)+x(T-P)}{1-w} \end{aligned} \quad (7)$$

因为  $T>P$ , 如果  $C>(T-R)/w$ , 那么  $V(TfTc|TfTc)>xV(WW|WW)+(1-x)V(WW|TfTc)$ , 所以白洗以  $x$ -簇形式也不能入侵  $TfTc$ 。下面再考虑白洗以随机混合方式攻击的情况, 可以得到:

$$\begin{aligned} (qV(TfTc | WW) + (1-q)V(TfTc | TfTc)) - \\ (qV(WW | WW) + (1-q)V(WW | TfTc)) &= \\ &= \frac{wC-(T-R)+q(S+T-R-P)}{1-w} \end{aligned}$$

因为  $(S+T)>(R+P)$ , 如果  $C>(T-R)/w$ , 那么  $qV(TfTc|WW)+(1-q)V(TfTc|TfTc)>qV(WW|WW)+(1-q)V(WW|TfTc)$ , 所以白洗以随机混合方式也不能入侵  $TfTc$  策略。

从上面的证明过程可知, 只要身份费用  $C>(T-R)/w$  条件满足, 白洗不能以任何方式均入侵  $TfTc$  策略, 那么  $TfTc$  在这种条件下就是进化稳定策略, 即在 P2P 环境下  $TfTc$  策略能够阻止白洗攻击。

### 4 仿真实验

文献[6]在社会驱动合作(social inspired cooperation)的研究中指出: P2P 环境中的节点交互是种典型的囚徒困境博弈, 节点从自身利益角度总是优先考虑不合作行为(如不共享任何资源), 但如果发现比自身平均收益更高的节点, 则会对其进行仿效(复制其行为与网络连接), 以期获得更高的个人利益。实验发现, 即使在最初大部分节点不合作的环境中只需较少的交互与演化, 系统即可达到大多数节点(98%以上)都采取合作行为。这里引用文献[6]的实验方法, 并添加笔者的代码, 实现零身份费用下的  $TfT$  策略与概率  $TfTp$  策略以及带有身份费用  $C(C>(T-R)/w)$  的  $TfTc$  策略。

实验在开源软件 P2P 仿真系统 Peersim(<http://peersim.sourceforge.net>)上进行。网络初始时, 白洗节点占 50%, 基于周期(cycle)仿真, 每周周期结束时, 统计 2 种行为(合作或背叛)的节点数, 并计算百分比。实验配置如表 1 所示, 仿真结果如图 1 所示。

从图中可以看出,  $TfT$  策略与  $TfTp$  策略中合作节点百分比随着仿真周期均呈现显著下降趋势, 只有  $TfTc$  策略中的合作节点百分比随着仿真周期呈现上升趋势。只需 9 个仿真周期, 该策略中合作节点百分比高达 93%, 表明引

入恰当身份费用的 Tftc 策略能够遏制白洗攻击,是进化稳定策略。

表 1 实验配置

名称	参数值
网络节点总数	4 000
每节点连接度数	20
初始拓扑	随机拓扑
节点策略	$A=0$ (背叛), $A=1$ (合作)
博弈收益值	$S=0, P=1, R=3, T=5$
折扣因子	$w=0.8$
身份费用	$C=3$
与陌生方交互概率	$p=0.6$

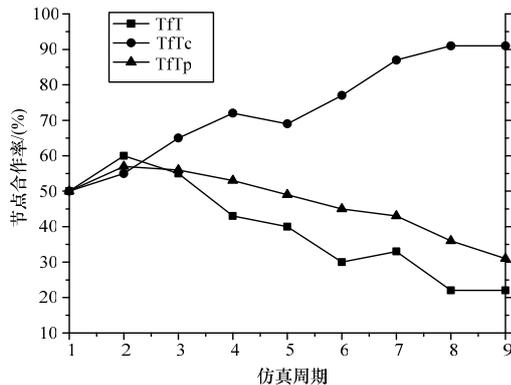


图 1 节点合作率随仿真周期变化规律

## 5 结束语

本文使用囚徒困境博弈模拟 P2P 系统中用户的交互

编辑 陈文

(上接第 206 页)

图 2 是根据式(2)转换的路径信息熵的网络拓扑图,各边上的数值分别表示代价、时延和路径信息熵。在遗传算法中,设定交叉概率  $p_c = 0.9$ , 变异概率  $p_m = 0.06$ 。进行了多次试验,产生的数据为多次试验求平均值的结果。在实验中,考虑到带宽,最大时延限制  $\Delta = 5$  时,根据式(3)计算得改组播树的平均信息量为 2.008,最小组播树如图 3 粗线所示,优于文献[6]提出的组播树的平均信息量。

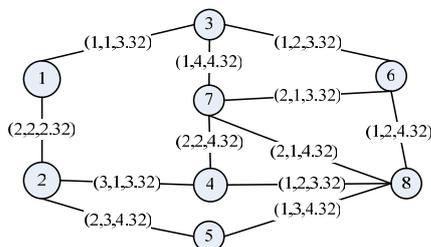


图 2 链路信息熵网络拓扑图

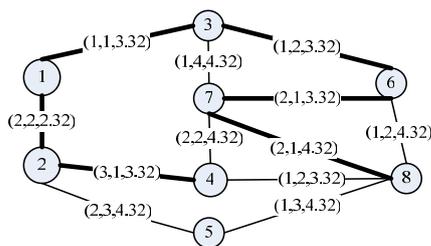


图 3  $\Delta = 5$  时求得的最小组播树

行为,对 Tft 策略、概率 Tftp 策略以及集成身份费用的 Tftc 策略进行理论分析与仿真实验,可以发现,Tft 与 Tftp 在永久身份条件下是不可入侵,即它们是进化稳定策略。然而,当遭遇白洗攻击时,Tft 策略与 Tftp 策略均不再是进化稳定策略。集成恰当的身份费用的 Tftc 策略不能被白洗策略入侵,是进化稳定策略。接下来将进一步研究节点行为(背叛与合作)历史的不可跟踪性对 P2P 系统激励机制的影响。

## 参考文献

- [1] Hughes D, Coulson G, Walkerdine J. Free Riding on Gnutella Revisited: the Bell Tolls[J]. IEEE Distributed Systems Online, 2005, 6(6): 1-18.
- [2] Hardin G. The Tragedy of the Commons[J]. Science, 1968, 162(3): 1243-1248.
- [3] Feldman M, Papadimitriou C, Chuang J, et al. Free-riding and Whitewashing in Peer-to-Peer Systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(5): 1010-1019.
- [4] Friedman E, Resnick P. The Social Cost of Cheap Pseudonyms[J]. Journal of Economics and Management Strategy, 2001, 10(2): 173-199.
- [5] Axelrod R. The Evolution of Cooperation[M]. New York, USA: Basic Books, 1984.
- [6] Hales D, Artecconi S. SLACER: A Self-organizing Protocol for Coordination in Peer-to-Peer Networks[J]. IEEE Intelligent Systems, 2006, 21(2): 29-35.

## 5 结束语

本文的方法不但具有收敛速度快、可靠性高、简单地构建出满足给定带宽和时延要求的组播树等特点外,还能够考虑网络路径均衡选择,即所选组播树平均信息量最大,也就是路径选择先验概率较小,以使网络负载分布均匀,从而避免瓶颈路径的发生而造成的网络拥塞。

## 参考文献

- [1] Sriram R, Manimaran G, Siva R M C. Algorithms for Delay-constrained Low-cost Multicast Tree Construction[J]. Computer Communications, 1998, 21(18): 1693-1706.
- [2] 陈萍,董天临,石坚,等.一种基于概率的 QoS 单播路由算法[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 582-587.
- [3] Ravikumar C P, Bajpai R. Source-based Delay-bounded Multicasting in Multimedia Networks[J]. Computer Communications, 1998, 21(2): 126-132.
- [4] 潘达儒,杜明辉.混沌遗传算法在 IP 网络组播路由中的应用[J]. 计算机工程, 2005, 31(23): 21-23.
- [5] Chen Shigang. Routing Support for Providing Guaranteed End-to-end Quality-of-service[D]. Urbana, USA: Engineering College of Computer Science University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999.
- [6] 王新红,杜荔,王光兴.一种基于遗传算法的组播路由选择方法[J]. 东北大学学报, 2001, 22(5): 513-515.

编辑 任吉慧

