

基于生态网络的 P2P 环境信任博弈进化模型

刘凤鸣¹,丁永生^{1,2}

LIU Feng-ming¹,DING Yong-sheng^{1,2}

1.东华大学 信息科学与技术学院,上海 201620

2.东华大学 数字化纺织服装技术教育部工程研究中心,上海 201620

1.College of Information Sciences and Technology,Donghua University,Shanghai 201620,China

2.Engineering Research Center of Digitized Textile & Fashion Technology,Ministry of Education,Donghua University,Shanghai 201620,China

E-mail:ysding@dhu.edu.cn

LIU Feng-ming,DING Yong-sheng.Evolutionary model of trust game based on ecological network in P2P networks. *Computer Engineering and Applications*,2007,43(23):24-27.

Abstract: The trust mechanism can detect and punish the malicious nodes,and promote honest and cooperative interactions in the P2P networks.In this paper,we present a trust game model based on the evolutionary mechanism of ecological network,and apply the replicator dynamics mechanism to analyze the evolutionary trend of trust relationships among nodes.P2P networks using this model have good performance and stability.

Key words: P2P networks;trust game;evolutionary game;ecological network;replicator dynamics mechanism;evolutionary stable strategy

摘要: P2P 网络中信任机制能够很好地检测和惩罚恶意节点,激励节点之间合作。提出了一种基于生态网络协同进化机理的信任博弈模型,应用复制动态机制分析了节点之间信任关系的长期演化趋势,从理论与实践上说明了在 P2P 网络中应用此信任模型具有良好的演化稳定性及性能的整体最优性。

关键词: P2P 网络;信任博弈;进化博弈;生态网络;复制动态机制;进化稳定策略

文章编号:1002-8331(2007)23-0024-04 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP393

1 引言

信任作为网络安全中的一个重要概念,是指网络节点之间关系的集合,这种关系的建立与节点的历史行为有关^[1]。但在 P2P 网络中,没有中心控制服务器和可信第三方,信任的建立尤为困难,因为用来评价信任的信息或证据有着非完整性、不确定性等特点。又由于其天生的开放性、匿名性、自治性等,如 Napster、Gnutella,导致有 66% 的节点对整个系统没有任何贡献,10% 的节点提供了 87% 的文件资源,20% 的节点提供了 98% 的共享文件^[2]。这充分说明存在着大量的自私节点(Free Rider),这样节点的存在严重影响了整体网络的性能,破坏了网络系统的稳定性。因此,建立适当的机制,促进节点间的信任合作,激励诚信、惩罚失信是很有必要的。

目前,P2P 网络中信任机制的研究,如 EigneTrust^[3]、Eigen-

Rep^[4]、PeerTrust^[5]等信任模型,试图通过收集节点的全部声誉信息(即历史行为)计算节点的全局信任度。这种理想的模式实施起来是很困难的,一是需要全局节点的配合,这本身又是信任问题;二是计算量与网络通信开销大,因此其可行性和必要性有待进一步研究。基于局部信息计算的信任模型,如 Chord^[6]、P-Grid^[7]等,对于自治节点的来去自由又显得“证据不足”。因此,信任的定量研究有待进一步探索。信任是社会生活的基本事实,是一种预期,是相信他人未来的可能行动的赌博^[8],信任的这种不确定性和不可控性也使得上述计算模型过于“简单”。L.Mui^[9]、Mary L.Rigdon^[10]等从博弈论角度对信任问题进行了研究,但更侧重于社会学与经济学方面的探讨。

信任是一种赌博,也就是博弈。经典博弈论是基于一种“完全理性”的假设,要求行为主体应具有完善的判断和预测能力,并且始终追求其自身利益的最大化。而 Alchian 认为^[11],在真实

基金项目:国家自然科学基金重点项目(the Key Project of the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60534020);国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60474037);教育部新世纪优秀人才支持计划(Program for New Century Excellent Talents in University from Ministry of Education of China under Grant No.NCET-04-415);教育部科技创新工程重大项目培育资金项目;上海市国际科技合作基金项目(the Cultivation Fund of the Key Scientific and Technical Innovation Project from Ministry of Education of China,International Science Cooperation Foundation of Shanghai under Grant No.061307041);教育部高等学校博士学科点专项科研基金(Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education from Ministry of Education of China under Grant No.20060255006)。

作者简介:刘凤鸣(1969-),男,博士研究生,从事网络智能和信息安全等研究;丁永生(1967-),男,博士,教授,博士生导师,从事智能系统、网络智能、DNA 计算、人工免疫系统、生物网络结构、生物信息学、数字化纺织服装、智能决策与分析等研究。

世界中,将来是不完全信息(Incomplete Information)和不确定预见(Uncertain Foresight)的,所以约束条件下求最优的完全理性并不普遍。他原创性地提出了基于生物学进化论“自然选择”思想的制度演化模型。在该模型中,人通过模仿、试错(Imitative and Trial-and-Error Behavior)适应不断变化的环境,并生存下来。而“复制动态”(Replicator Dynamics)机制在此基础上假设博弈方为有限理性的,通过模仿、试错等手段,决定其行为策略,并通过反复博弈和进化稳定策略实现动态策略调整及其演化稳定性。Maynard Smith 给出了进化稳定策略(Evolutionarily Stable Strategy,缩写为ESS)的概念^[12],他指出,如果生物种群所有个体使用某一策略后,种群中不可能出现使用其它策略的稳定的群体,那么所有个体使用的这一策略称为进化稳定的。网络安全的研究目的就是为了保证网络的稳定性和有效性,传统的安全策略难以适应P2P网络的安全需求。信任是社会重要的稳定因子,也将是保证未来网络安全的重要思想方法,进化博弈与稳定策略为研究网络的信任提供了思路。

P2P网络比其它任何网络更能反映出社会网络的各种特征^[13]。由此,基于生物学进化论“自然选择”思想,对于P2P网络信任安全的研究,需要更多地从社会学、经济学和生态学的研究中借鉴理论基础。而社会网络、生物网络中有许多重要的原理和机理,如神经网络协同、免疫网络抵御等,可以用来研究网络节点间的协作进化现象。因此,本文借鉴了社会生态学的生物进化机理,运用进行博弈论的思想,充分考虑个体间利益关系与系统网络可能出现的冲突,在保证个体利益的情况下,为尽可能提高网络系统的整体生态进化,使系统能够长期稳定运作,提出了基于生态网络的信任博弈进化模型,并在具有服务突现和进化能力的生物网络仿真平台^[14-15]上进行了仿真实验。实验结果验证了模型的可行性和可操作性,并能够实现网络生态的稳定进化和性能优化。

2 P2P 社会生态网络

生态学是研究生物和人与环境之间的相互关系,研究自然生态系统和人类生态系统的结构和功能的一门学科。生态学的基本原理既可以应用于生物,也可以应用于人类所从事的各项生产活动。从社会生态学角度讲,网络的超速发展,将会导致网络内部各种因素之间以及网络与其它相关社会环境之间出现一系列问题。所有影响网络发展的其它社会系统构成了网络发展的生态环境,当用联系发展的眼光分析网络与网络生态环境之间相互作用、相互影响时,便形成了网络生态。网络与网络生态环境构成网络生态系统^[16]。

P2P网络在复杂多样、层次交叠、动态多变环境中,进行信息、数据、服务之间的交互、转移、生灭,形成了网络系统的动态、连续、不确定的系统状态。然而长期的、不同形式与过程的演化发展的结果,使整个系统趋向更高级的有序化发展,自组织形成一个动态、有机的整体,整个系统通过各节点的交互和协作解决问题。

假设 1 P2P网络系统是社会生态网络,其模型可用有向图 $PSEnet(G,R)$ 表示。其中, G 表示网络中的种群集, R 表示生态节点间的关系,种群间的关系由节点间的关系突现出来。而网络中的这种关系是不对称的,用有向图表示。例如,可以把提供和消费同一种服务(文件共享是一种服务)的节点定义为一个种群,由不同的服务形成不同的种群。

假设 2 $G=(G_1,G_2,\dots,G_n)$, $G_i(i=1,\dots,n)$ 表示生态网络中的一个种群。当然病毒、木马等也不排除在外,它们同样构成一个或多个种群。

假设 3 $G_i=\{g_1,g_2,\dots,g_m\}$, 其中, $g_j(j=1,\dots,m)$ 表示单个的生态节点,即P2P网络中提供或消费相同服务的节点。

假设 4 网络中的节点具有有限理性且自私,同时又有机会主义倾向。这是由节点的有限知识和追求长期最优化收益所决定的。

假设 5 $R=(R_1,R_2,\dots,R_u)$, 其中, $R_k(k=1,\dots,u)$ 表示生态节点间的交互行为。

生态节点之间的各种交互行为,就促成了网络的进化。这种交互行为是一种博弈,是生态节点个体为了生存,为了追求自身的最大利益而发生的。博弈的过程是节点间采取策略交互的过程。

假设 6 生态网络中的生态节点的策略集为有限集 $S=\{s_1,s_2,\dots,s_n\}$, 称作策略空间。在这种策略空间下,允许节点随机选择策略 $s_j(j=1,\dots,n)$ 进行交互博弈。

这样,由不同种群及它们之间因交互而产生的各种关系组成复杂的社会生态网络表示P2P网络系统,多个或单个种群的节点在整个网络中为有限的网络资源如存储资源、计算资源、网络带宽等而进行着动态的、自调整的进化博弈。

3 信任博弈进化模型

本文对上述模型进行简化讨论,研究单个种群间的进化博弈,即网络中提供或消费相同服务(如文件共享)的节点构成的种群之间的进化博弈及其进化稳定策略。

假设 7 博弈者即生态节点所采用策略的概率分布函数为 $P=\{p_1,p_2,\dots,p_m\}$ 。其中, $\sum_{k=1}^m p_k=1$ 。

定义 任意两个生态节点间的一次交互为一次博弈,博弈的收益函数为 u ,它的值与博弈双方所采用的策略有关。

这样,某个节点采用纯策略 s_j 的期望收益是:

$$u_j=p_j u(s_j) \quad (1)$$

选择混合策略 s_i 的期望收益为:

$$u=\sum_{i=1,i \neq j}^m p_i u(s_i) \quad (2)$$

则生态网络系统中节点博弈的复制动态方程为:

$$\frac{dp_j}{dt}=(p_j u(s_j)-\sum_{i=1,i \neq j}^m p_i u(s_i))p_j \quad (3)$$

策略是多样的,表现出的关系也是多形态的。但有一种关系,是整个生态网络稳定进化的核心,即节点间在交互中表现出的合作态度,也就是信任关系,它决定着网络进化的稳定性和鲁棒性。

为清楚地讨论网络进化的可能趋向和稳定性,本文重点研究关系集中的信任关系,因此进一步将策略空间简化为{信任,不信任}。图1显示了一次博弈中博弈双方的收益矩阵。其中, r 为一次博弈中双方都选择信任策略时的收益;当一方策略为信任,而另一方的策略为不信任时, s 为信任方的收益, d 为不信任方的收益, p 为双方都选择不信任策略时的收益。

在经典的“囚徒困境”中,存在的唯一纳什均衡为博弈双方都选择不信任策略。但当节点考虑在网络生态中的长期性时,会采用相互信任的策略进行博弈,这在经济学中的非合作重复

博弈理论中被称为子博弈精练纳什均衡^[7],是得到证明存在的。这样,将非合作博弈理论引入到 P2P 网络,分析解决节点间的信任博弈进化,从理论上保证了模型中策略均衡的存在性和网络进化的稳定性。

		节点1	
		信任	不信任
节点2	信任	r, r	s, d
	不信任	d, s	p, p

图1 两个节点一次博弈的收益矩阵

下面运用“复制动态”机制求解两节点博弈模型。其中,节点先以一个先验的行为概率选择策略进行博弈,通过模仿、试错等手段,而不是求最优的理性方法,通过有限理性节点的配对反复博弈,经过多次交互(学习效应积累,即对节点的历史行为有了认识)以后逐渐修改原有的先验概率,进而演化成后验概率,再通过进化稳定策略研究博弈方的策略动态调整及系统稳定演化。

假设最初状态节点采取信任策略的概率为 x ,则采取不信任策略的概率为 $1-x$ 。

那么,节点1选择信任策略的收益为:

$$u_1 = xr + (1-x)s \tag{4}$$

节点1选择不信任策略的收益为:

$$u_2 = xd + (1-x)p \tag{5}$$

可得,节点1的平均收益为:

$$\bar{u} = xu_1 + (1-x)u_2 \tag{6}$$

则节点1在 t 阶段采用信任策略的动态变化速度,可以由下列动态微分方程表示:

$$\frac{dx}{dt} = x(\bar{u} - u_1) \tag{7}$$

记 $\frac{dx}{dt}$ 为 $F(x)$,将式(4)(5)(6)代入(7)可得复制动态方程为:

$$\frac{dx}{dt} = F(x) = x(1-x)(x(d-r) + (1-x)(p-s)) \tag{8}$$

要讨论该信任博弈的进化稳定策略,应先找出动态复制方程的稳定解。

令 $F(x)=0$,可解得三个解:

$$x_1 = 0 \tag{9}$$

$$x_2 = 1 \tag{10}$$

$$x_3 = \frac{p-s}{r-d+p-s} \tag{11}$$

上述三个解都有可能成为进化稳定策略,但根据微分方程的“稳定性原理”可知:稳定状态处的函数的导数必须小于0,即 $F'(x^*) < 0$ 。 x^* 表示稳定状态,也就是进化稳定策略。而在网络初始状态两种策略都可能被选择,因此要使信任策略成为网络演化的一个进化稳定策略, r, s, d, p 值的设置就是问题的关键所在。

要使信任成为一个进化稳定策略,应该满足以下几个条件:

- (1) $F'(x_1=0) < 0$
- (2) $F'(x_2=1) < 0$
- (3) $0 < x_3 = \frac{p-s}{r-d+p-s} < \frac{1}{2}$

由以上三个条件得: $p > s, r > d$ 且 $r-d > p-s$,并可得到如图2所示的复制动态方程局部相位图。由此,在网络生态进化中引入

以下机制,就可使信任策略成为网络信任博弈的唯一进化稳定策略:

(1)使 s 变小或 p 变大,使 $p-s$ 增大,即建立相应的惩罚机制,并加大惩罚力度,使选择不信任策略将是一种风险很大收益很小的行为。

(2)使 r 变大或 d 变小,使 $r-d$ 增大,即提高选择信任策略的收益,鼓励和促进信任策略的选择,降低失信的机会收益,使信任成为一种自动约束机制。

(3)使 $r-d$ 远大于 $p-s$,这样 x_3 趋向 0,初始状态选择信任策略的概率大于选择不信任策略的概率。

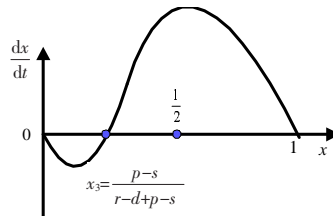


图2 网络初始的复制动态微分方程局部相位图

虽说 $x_1=0$ 在最初状态也是一个稳定解,但随着博弈次数的增加,网络生态的进化, x_3 逐步退化为 x_1 ,此时 $F'(x_1=0) > 0$, $x_2=1$ 就成为唯一的一个进化稳定策略, $x_1=0$ 就不再是一个稳定策略。这样系统的性能和稳定性就能得到很好的保证。最终复制动态方程的局部相位图就会如图3所示。

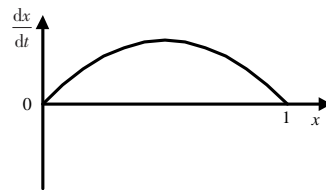


图3 网络进化后的复制动态微分方程局部相位图

因此,只要在网络最初状态同时满足以上三点,信任就会成为了生态网络进化的唯一稳定策略。

4 仿真分析

通过以上分析,将 P2P 网络假定为社会生态系统,在单种群的生态系统中,每个节点为一个生物个体,它们之间为生存进行着竞争与合作,选择的策略为信任与不信任。由此,本文在基于多 Agent 的生物网络仿真平台上实现了单种群个体间的信任博弈进化模型,并进行了仿真实验。实验中的博弈参与方即生态节点为智能 Agent,它们的生存能量值为重复博弈过程中的收益值^[8,19]。当一个 Agent 的能量值小于某个阈值(在实验中设定为 0)时,Agent 退出生态网络,即为死去。实验中设置了 1 000 个 Agent,进行随机策略选择配对博弈,假定 $x=0.8$,博弈重复进行了 100 次,图4和5显示了博弈过程中个体数量的变化情况。

图4是 $r=10, s=-4, d=6, p=-1$ 的网络系统进化的速度和稳定性,图5是 $r=10, s=-3, d=4, p=-2$ 的网络系统进化的速度和稳定性,从图中可以看出参数的调整对于系统进化的影响。随着博弈次数的不断增加,选择不信任策略的 Agent 在进化博弈过程中出现了分化,小部分在过程中因能量值小于 0 而退出,大部分通过模仿、学习及时调整策略,适应网络生态环境而存活下来,最后网络生态进化趋于稳定,呈现出优化的信任网络。

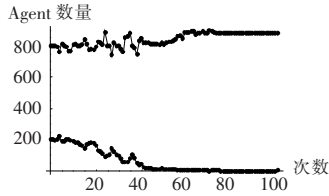


图4 两种策略的 Agent 的信任博弈进化

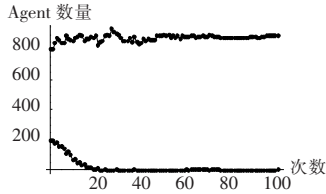


图5 两种策略的 Agent 的信任博弈进化

5 结语

本文借用生态进化机理,将P2P网络假定为社会生态网络,运用进化博弈和复制动态机制分析了其演化趋向,并进行单种群即网络单服务的仿真。可以看出,要使网络稳定进化,服务性能优化,成为一个可信的网络环境,可以通过调整博弈交互策略的收益值,建立相应的激励和惩罚机制,使节点之间达到有效合作进化的目的。最终信任策略成为网络稳定进化、安全服务的有力保障。

本文通过简化信任博弈模型讨论了网络信任安全的有效性和可行性。在将来的研究工作中,将进一步讨论多种群(多服务)多策略随机配对进行信任博弈的可行性和可操作性,为网络的服务优化和整体网络的稳定性提供可参考模型,完善网络安全的信任机制,为P2P网络的进一步稳定进化和优化服务提供更为有力的保证。(收稿日期:2007年4月)

参考文献:

- [1] Baras J S, Jiang Tao. Cooperation, trust and games in wireless networks[C]//Proceedings of Symposium on Systems, Control and Networks, in Honor of Varaiya P, June 2005.
- [2] Saroiu S, Gummadi P K, Gribble S A. A measurement study of peer-to-peer file sharing systems[C]//Multimedia Computing and Networking (MMCN02), San Jose, CA, 2002.
- [3] Kamvar S D, Schlosser M T, Molina H G. The eigentrust algorithm

for reputation management in P2P networks [C]//WWW '03: Proceedings of the Twelfth International Conference on World Wide Web. [S.l.]: ACM Press, 2003: 640-651.

- [4] Kamvar S D, Schlosser M T, Molina H G. EigenRep: reputation management in P2P networks [C]//Proceedings of the Twelfth International World Wide Web Conference. Budapest: ACM Press, 2003: 123-134.
- [5] Xiong L, Liu L. A reputation-based trust model for peer-to-peer E-commerce communities [C]//IEEE Conf on E-Commerce (CEC'03), Newport Beach, California, USA, 2003.
- [6] Stoica I, Morris R, Karger D, et al. Chord: a scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications [C]//Proc of the ACM SIGCOMM 2001, San Diego, 2001.
- [7] Aberer K. P-Grid: a self-organizing access structure for P2P information systems [C]//Sixth International Conference on Cooperative Information Systems, 2001.
- [8] Sztompka P. Trust: a sociological theory [M]. [S.l.]: Cambridge University Press, 1999.
- [9] Mui L. Computational models of trust and reputation: agents, evolutionary games, and social networks [D]. Massachusetts Institute of Technology, December 2002.
- [10] Rigdon M L, McCabe K A, Smith V L. Sustaining cooperation in trust games [J]. The Economic Journal, 2007, 117(522): 991-1007.
- [11] Alchian A. Uncertainty, evolution, and the economic theory [J]. The Journal of Political Economy, 1995, 58(3): 211-221.
- [12] Smith J M. Evolution and the theory of games. Cambridge, 1982.
- [13] Clark D. Face-to-face with peer-to-peer networking [J]. IEEE Computer, 2001, 34(1): 18-21.
- [14] 丁永生, 任立红. 一种基于免疫突现计算的生物网络结构的设计 [J]. 控制与决策, 2003, 18(2): 185-189.
- [15] 任立红, 丁永生. 一种新颖的基于生态网络计算的仿真平台 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(11): 1497-1499.
- [16] 皋磊. 基于生态网络的下一代 Internet 资源动态服务的研究 [D]. 东华大学, 2005.
- [17] Myerson R B. Game theory: analysis of conflict [M]. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1991.
- [18] 张向锋, 任立红, 皋磊, 等. 生态网络仿真平台的能量服务管理 [J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(31): 145-148.
- [19] 皋磊, 任立红, 张向锋, 等. 基于市场经济的生态网络能量管理服务 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1): 1-4.

(上接 20 页)

否可以将概率删除和概率克隆量子计算机与纠缠态结合起来考虑(因为真正的量子计算机里一定存在着量子纠缠态),也是一个相当有意义的研究课题,而且是要真正实现量子计算机必须解决的首要问题。(收稿日期:2007年4月)

参考文献:

- [1] Wootters W K, Zurek W H. A single quantum cannot be cloned [J]. Nature, 1982(299): 802-803.
- [2] Feng Y, Zhang S Y, Ying M S. Probabilistic cloning and deleting of quantum states [J]. Phys Rev A, 2002(65).
- [3] Pati A K. Quantum superposition of multiple clones and the novel cloning machine [J]. Phys Rev Lett, 1999(83): 2849-2852.
- [4] Pati A K, Braunstein S L. Impossibility of deleting an unknown

quantum state [J]. Nature, 2000(404): 164-165.

- [5] Feng Yuan, Zhang Sheng-yu, Sun Xiao-ping. Universal and original-preserving quantum copying is impossible [J]. Phys Lett A, 2002: 97.
- [6] Nielsen M A, Chuang I L. Quantum computation and quantum information [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 354-365.
- [7] Duan L M, Guo G C. Probabilistic cloning and identification of linearly independent states [J]. Phys Rev Lett A, 1998(22): 4999-5002.
- [8] Bennett C H, Brassard G, Crepeau C. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and EPR channels [J]. Phys Rev Lett, 1993(70): 1895-1899.
- [9] Bennett C H, Wiesner S J. Communication via one- and two-particle operators on Einstein-Podolsky-Rosen states [J]. Phys Rev Lett, 1992(20): 2881-2884.