一种新的基于博弈论的 P2P 激励机制*

徐海湄[1,2]，郑相全[2]，齐守青[2]，聂晓文[1]
(1. 电子科技大学 计算机科学与工程学院，成都 610054; 2. 解放军重庆通信学院，重庆 400035)

摘　要: 针对 P2P 系统中的搭便车和公共悲剧问题，提出了一种基于博弈论的激励机制。每个节点从个人理性出发，在最大化个人收益的同时根据请求者的贡献分配带宽，并利用动态规划方法求出了最优解，实现了有限资源的帕累托配置，达到了社会收益最大化的目的。仿真实验表明，该激励机制促进了社会收益的快速增长，达到了激励节点参与资源共享的目的。

关键词: 不完全信息静态博弈; 帕累托; 社会收益; 个人收益; 动态规划
中图分类号: TP393　　**文献标志码**: A　　**文章编号**: 1001-3695(2008)09-2787-03

Novel incentive based on game theory in P2P networks

XU Hai-mei[1,2], ZHENG Xiang-quan[2], QI Shou-qing[2], NIE Xiao-wen[1]
(1. School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. College of Chongqing Communication of PLA, Chongqing 400035, China)

Abstract: In order to solve free rider and tragedy of the commons problems in peer-to-peer(P2P) systems, this paper proposed a novel incentive based on game theory. While trying to maximize its own utility subjected to individual rationality, every peer allocated bandwidth resources efficiently according to competing peers' contribution values to maximize the social utility. The simulation result shows that the incentive increased the social utility of the whole P2P system rapidly and incentive every peer to share resources effectively.

Key words: static game with incomplete information; Pareto; social utility; individual utility; dynamic programming

传统的 P2P 系统没有提供有效的激励机制，导致了搭便车和公共悲剧的发生。文献[1]指出，在 Gnutella 中，70% 的用户从来不共享任何文件，50% 的文件查询响应来自 1% 的共享用户。文献[2]提出的 Eigentrust 和文献[3]提出的 Peertrust 是比较经典的用来解决搭便车现象的声誉模型，每个节点通过文件交易累积声誉，声誉值大的享受更好的 QoS。但是声誉的累积需要目击者(witness)提供信息[4]，并且容易受到洗白(whitewash)和共谋(collusion)行为的攻击[5]。文献[6]首次提出将微支付的方法引入激励机制，并用博弈论分析了可行性。微支付强调上传文件收费，下载文件付费，因此不存在洗白和共谋现象。但是微支付要求第三方进行繁杂的审计工作，这与 P2P 理念相背，容易造成单点失效现象。还有大量文献[7～9]致力于激励机制的研究。

在 P2P 文件共享系统中，节点通过下载文件获得收益，通过上传文件作出贡献。当多个节点向同一个节点申请下载文件时，贡献越多的节点应该得到更多的资源分配。但是在节点的互动博弈[10]中，每个节点都从个人理性(individual rationality)出发，以最大化自身收益为目标选择决策行为，而不考虑其他节点。能否通过机制设计(mechanism design)使个人收益最大化的同时实现社会收益(social utility)最大化呢？这就是激励机制要达到的目的：a) 公平性，贡献越多，收益应该越多；b) 资源的有效利用，资源的配置可否达到帕累托(Pareto)最优；c) 个体理性与激励兼容的实现，即个体收益最大化的同时实现系统收益最大化。

1　不完全信息静态博弈模型的建立

在 P2P 系统中，每个节点都是对等的，既是客户机又是服务器。以文件传输过程中不同节点通过竞争带宽资源获得收益，最后达到一个均衡为例建立博弈模型。

为了叙述方便，引入以下符号：

N 为 P2P 系统的节点个数；

$x_i(t)$ 为在 t 时刻，当节点 i 要求文件下载时，得到的实际下载带宽；

$d_i(t)$ 为在 t 时刻，节点 i 要求的最大下载带宽；

u_i 为节点 i 的最大上传带宽；

$c_i(t)$ 为在 t 时刻，节点 i 的贡献值；

为了讨论方便，以 x_i 代替 $x_i(t)$，d_i 代替 $d_i(t)$，以 c_i 代替 $c_i(t)$；

R_k 为向节点 k 申请文件下载的节点集合，如图 1 所示。

$R_k=[1,2,3,4]$，表示节点 1、2、3、4 向节点 k 要求分别以速度 d_1, d_2, d_3, d_4 下载文件，而节点 k 分配给它们的实际带宽为 x_1, x_2, x_3, x_4；

$\Theta=(\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_N)$，$\Theta$ 是所有参与竞争节点的类型，对于每个节点 i，θ_i 是要求下载带宽 d_i，上传带宽 u_i 和贡献值 c_i 的

收稿日期：2007-11-19；修回日期：2008-01-23　　基金项目：国家自然科学基金资助项目(10577007)；重庆市重点自然科学基金资助项目(CSTC, 2007ab2017)

作者简介：徐海湄(1974-)，女，博士研究生，主要研究方向为分布式计算、操作系统、激励协议(xuhaimei@uestc.edu.cn)；郑相全(1972-)，男，副教授，博士，主要研究方向为无线自组网技术与网络仿真技术；齐守青(1974-)，硕士研究生，主要研究方向为通信对抗与电子干扰；聂晓文(1972-)，男，博士研究生，主要研究方向为 P2P 应用、分布式计算.

函数, 如 $\theta_i = (4, 2, 5)$ 表示节点最大要求下载带宽为 4 Mbps, 上传带宽为 2 Mbps, 贡献值为 5, 每个节点的贡献值对于系统的所有节点是公开信息;

$U_i = (d_i, x_i)$ 为节点 i 的收益函数, 其中 U_i是节点 i 要求的最大下载带宽 d_i 与分配带宽 x_i 的非负函数。

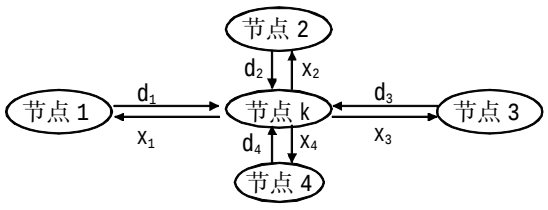

图 1 节点竞争带宽资源图

分析图 1, 在 t 时刻, 四个竞争节点 1、2、3、4 向节点 k 要求文件下载服务, 节点 k 的上传带宽为 u_k, 这些竞争节点分别发送决策信息 d_1、d_2、d_3、d_4 给节点 k, 告知需要多少下载流量, 节点 k 从自身利益最大化出发, 决策如何分配带宽资源。节点之间可以动态调整决策信息, 直到达到一个均衡。显然节点间的互动博弈是一个不完全信息静态博弈[11], 因为每个节点并不完全了解其他节点的类型信息, 并且多个节点竞争同一带宽资源时的决策与时间顺序无关。

2 激励机制

传统的激励机制类似文献[2, 3], 仅仅以节点的贡献值作为激励值, 没有考虑每个节点的收益。博弈论认为, 用个体收益激励节点更理性。

定义 1 节点贡献值。节点 i 的贡献值等于所有请求节点通过从 i 处下载所获得的收益之和减去节点 i 从其他节点处下载所获得的收益, 即

$$C_i(t) = \int_0^t \sum_{j=1}^{N} U_j(d_j, x_j)\,\mathrm{d}t - \int_0^t U_i(d_i, x_i)\,\mathrm{d}t \quad \mathrm{P}\ t > 0 \tag{1}$$

定义 2 P2P 系统总收益(social utility, SU)。系统总收益等于每个节点的贡献值之和, 即

$$SU = \sum_{i=1}^{N} C_i(t) \quad \forall t > 0 \tag{2}$$

定义 3 节点的个体收益。在 t 时刻, 节点 j 向节点 k 要求文件下载流量 d_j, 一旦获得下载流量 x_j, 节点就会获得收益, 即

$$U_j(d_j, x_j) = x_j / d_j \quad \text{s. t.} \quad x_j \le d_j \tag{3}$$

式(3) 表示节点 j 的收益等于分配到的带宽与最大要求下载带宽的比值。收益类似于满意度, 要求的少, 得到的多, 满意度就越高, 收益就越大, 就越愿意贡献资源给系统, 当 $x_j = d_j$ 时, 收益为 1, 满意度最高。

2.1 个体收益最大化

博弈论中指出: 个人理性使个体追求自身利益最大化, 即当 n 个节点 $1 \cdots n$ 向节点 k 申请下载文件时, k 会通过分配传输带宽使收益最大, 即

$$F(x) = \arg\max \left(\sum_{i=1}^{n} U_i(d_i, x_i) \right) \quad \text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^{n} x_i \le u_k \tag{4}$$

定理 1 式(4) 的解是一个纳什均衡解。

证明过程见文献[11] 中囚徒困境的纳什均衡解。但是囚徒困境的纳什均衡解揭示: 从个体理性出发的决策行为不能实现团体的最大利益, 最终也不能真正实现个体的最大利益。

2.2 社会收益最大化

式(4) 仅仅考虑了个体收益最大, 如果将每个节点的贡献因子也考虑进去, 合理分配带宽资源, 能否达到资源分配的 Pareto 最优, 从而实现社会收益的最大化呢?

因为节点 $1 \cdots N$ 对 P2P 系统的贡献值各不相同, 所得到的收益就应该有所区别, 贡献越多, 收益应该越大, 从而激励活跃节点贡献更多资源, 懒惰节点变为活跃节点。因此加上贡献因子 a_i, 式(4) 演变为

$$F(x) = \arg\max \left(\sum_{i=1}^{N} a_i x_i / d_i \right)$$
$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^{N} x_i \le u_k \quad x_i \le d_i \tag{5}$$

其中: $a_i = c_i / \sum_{i=1}^{n} c_i$。

2.3 具有激励机制的传输带宽分配算法(TBDA)

式(5) 主要考虑节点的收益和贡献两个竞争因素作为激励因子。对于请求者来说, 在请求带宽不变的情况下, 贡献越多, 其获得的带宽就越多; 另外在贡献相同的情况下, 请求的带宽越少, 其获得带宽的可能性就越大。

对于式(5), 可以用动态规划方法求出最优解。

用动态规划求解问题的最优解的基本思想是: 首先求解部分问题的最优解, 再求更大部分的最优解, 直到最后求出整个问题的最优解。

设用 $F_m(x)$ 表示节点 k 将上传带宽 u_k 分配给 $1 \cdots n$ 个请求节点中的前 m 个节点所能得到的最大总收益, 则由最优原理可以导出如下递归方程:

$$\begin{cases} F_1(x) = U_1(x) \\ F_m(x) = \arg\max\limits_{0 \le x_m \le x} \{U_m(x_m) + F_{m-1}(x - x_m)\};\ m = 1, 2, 3, \cdots, n \\ 0 \le x \le u_k \\ 0 \le x_m \le d_m \end{cases} \tag{6}$$

由式(6) 递推地求出 $F_1(u_k), F_2(u_k), \cdots, F_n(u_k)$ 以及 x, $F_n(u_k)$ 就是问题的最优解。例如, 已知 $d = [1, 2, 5, 2, 5, 4]$, $c = [2, 5, 1, 2, 5, 4]$, $u_k = 7.0$, 由式(6) 求得 $x = [1, 1, 2.5, 2.5]$, 此时节点 k 的最大收益为 0.79。

传输带宽分配算法(transfer bandwidth distribution algorithm, TBDA) 的伪代码如下:

```
(1) Sort c_i* (1/Σ_{i=1}^{n} c_i) * (1/d_i) in descending orders. store values
and node index in array a and t
(2) F_n(u_k) = 0; // initialize max utiliy = 0
(3) Store the number of peers with the same value in array a to array t1
(4) i = 1 ; //initialize index variable
(5) Vol = d[ t[ 1] ;
//peer with larger value in array a will get bandwidth in priority
(6) do{
(7) num = t1[ i] ;
//the number of peers with the same value in array a
(8) if ( vol* num > = u)
//the same peers will get the same bandwidth
(9) { for( k = 0; k < num; k + + )
(10) { x[ t[ i + k] ] = u / num;
(11) u = 0; } //bandwidth used up
(12) else{ //move to next peer
(13) { for( k = 0; k < num; k + + )
(14) { x[ t[ i + k] ] = vol;
(15) i = i + num;
(16) u = u - vol* num;
(17) vol = d[ t[ i] ] ; }
(18) }
```

```
(19) while( u > 0) ;
(20) for ( i = 1; i < = n; i + + )
(21) F_n( u_k) = F_n( u_k) + ( c_i / Σ_{i=1}^{n} c_i ) * (1/d_i)
//store the max utility in Fn( uk)
(22) Return x; //peers' bandwith stored in array x
```

定理 2　利用动态规划法求出的带宽分配向量 $x = [x_1, x_2, \cdots, x_n]$ 是 Pareto 最优的[11]。

证明　当所有节点要求的带宽 $\sum_{i=1}^{n} d_i \le u_k$ 时, $x_i = d_i$, 每个节点都得到最大收益 1, 当所有节点要求的带宽 $\sum_{i=1}^{n} d_i \ge u_k$ 时, u_k 被充分利用, 任何一个节点的收益增加都会损害另外节点的收益。因此在带宽资源的分配存在着的 pareto 最优配置, 这在博弈论中是一个人人欢喜的结局[11]。

3　实验仿真

为了评估基于激励机制的带宽分配算法, 进行了仿真实验, 在 P2P 仿真系统中, 假设有 1 500 个节点, 节点分为三类: 30% 为自私节点(selfish node) , 该节点的贡献值为 0, 30% 的节点为无私节点(altruistic node) , 该类节点贡献值大于 0, 40% 为混合节点(mixed node) , 该类节点有时候自私, 有时候无私。

首先, 对比了基于激励机制的 P2P 系统和没有引入激励机制的情况下, 利用式(2) 计算出的 P2P 系统总收益随时间的变化。结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 引入了激励机制的 P2P 系统, 系统总收益随着时间逐渐递增, 而没有激励机制的 P2P 系统, 在前 20 min 内, 系统总收益逐渐递增, 之后直线下降, 这是因为随着搭便车行为的增多, 无私节点和混合节点逐渐加入了自私节点的阵营。

其次对比了基于激励机制的 P2P 系统和没有引入激励机制的 P2P 系统的情况下, 各类节点服务质量的情况。服务质量用成功下载率 SDR(successful download ratio) 衡量。SDR = 下载成功次数/要求下载的总次数, 结果如图 3 所示。

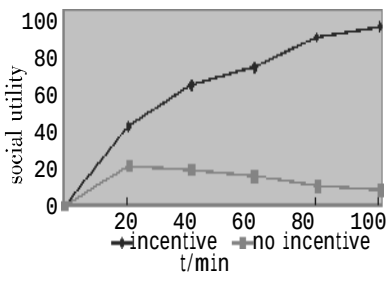

图 2　系统中社会收益随时间的变化图

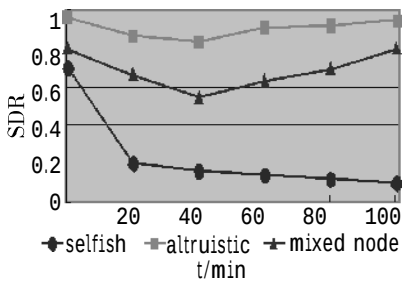

图 3　系统中各类节点的 SDR 随时间的变化图

从图 3 中可以看出, 在一开始时, 文件交换还不频繁, 各类节点下载成功率比较高, 随着文件交换越来越频繁, 贡献值小的节点获得的带宽越来越小, 最后减至 0; 而无私节点的贡献值大, QoS 得到了保证, 成功下载率就维持在一个比较高的水平; 混合节点为了得到较好的服务, 逐渐终止自私行为, 向无私节点转换。

4　结束语

本文提出的基于博弈论的激励机制, 不同于以往的声誉机制与微支付机制, 将个人收益和贡献值综合考虑作为激励因子, 在带宽资源的分配方面实现了 Pareto 最优, 社会收益因此提高。仿真结果证实, 激励机制实现了抑制自私节点, 鼓励无私节点与混合节点多做贡献资源的目的。

参考文献:

[1] DAR E, HUBERMAN B. Free riding on Gnutella[EB/OL] . (2000) . http: //www. comp. nus. edu. sg/ ~bleong/ p2pft/ related/ a-dar00free. pdf.

[2] KAMVAR S D, SCHLOSSER M T. EigenRep: reputation management in P2P networks[C] //Proc of the 12th International World Wide Web Conference. Budapest, Hungary: ACM Press, 2003: 123-134.

[3] XIONG Li, LIU Ling. PeerTrust: supporting reputation-based trust for peer-to-peer electronic communities[J] . IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16(7) : 843-857.

[4] SABATER J, SIERRA C. Review on computational trust and reputation models[M] . Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2005: 33-60.

[5] FELDMAN M, CHUANG J. Overcoming free-riding behavior in peer-to-peer systems[J] . ACM SIGecom Exchanges, 2005, 5(4) : 41-50.

[6] CONE P, LEYTON-BROWN K, MIMNOV I. Incentive for sharing in peer-to-peer networks[C] //Proc of ACM Conference on Electronic Commerce. New York: ACM, 2001: 264-267.

[7] COURCOUBETIS C, WEBER R. Incentives for large peer-to-peer systems[J] . IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006, 24(5) : 1034-1050.

[8] SANGHAVI S, HAJEK B. A new mechanism for the free-rider problem[C] //SIGCOMM '05 Workshops. Philadelphia: [s. n.] , 2005: 122-127.

[9] MA R T B, LEE S C M, JOHN C S, *et al*. An incentive mechanism for P2P networks[C] //Proc of the 24th International Conference on Distributedcomputing Stem. [S. l.] : IEEE, 2004: 516-523.

[10] HARSANYI J. Games with incomplete information played by Bayesian players[J] . Management Science, 1968, 14(5) : 320-334.

[11] SHI Xi-quan. Game theory[M] . Shanghai: Shanghai University of Finance & Economics Press, 2000.

(上接第 2786 页)

参考文献:

[1] KYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, *et al*. Wireless sensor networks: a survey[J] . Computer Networks, 2002, 38 (4) : 393-422.

[2] MANJESHWAR A, AGRAWAL D P. TEEN: a protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks[C] //Proc of the 1st International Workshop on Parallel and Distributed Computing Issues in Wireless Networks and Mobile Computing. San Francisco, CA: [s. n.] , 2001.

[3] LINDSEY S, RAGHAVENDRA C S. PEGASIS: power efficient gathering in sensor information systems[C] //Proc of IEEE Aerospace Conference. Montana: Big Sky, 2002.

[4] YE Wei, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C] //Proc of IEEE Infocom. New York: [s. n.] , 2002.

[5] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J] . IEEE Trans on Wireless Communication, 2002, 4 (1) : 660-670.

[6] LIU Juan, REICH J E, ZHAO Feng. Collaborative in-network processing for target tracking[J] . EURASIP, J of Applied Signal Processing, 2003, 23(4) : 378-391.

[7] LIU Yu, WANG Yu-mei, ZHANG Lin, *et al*. Information-driven sensor selection algorithm for Kalman filtering in sensor networks[C] //Proc of the 3th International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing. Wuhan: [s. n.] , 2006.

[8] HEINZELMAN W. Application specific protocol architectures for wireless networks[D] . [S. l.] : MIT, 2000.