

DHT 网络基于债务关系的公平文件交换*

于 坤^{1,2+}, 吴国新¹, 许立波¹, 陈 刚¹

¹(计算机网络和信息集成教育部重点实验室(东南大学),江苏 南京 210096)

²(淮阴工学院 计算机系,江苏 淮阴 223001)

Debt Relationship Based Fair File Exchange in Distributed Hash Table Network

YU Kun^{1,2+}, WU Guo-Xin¹, XU Li-Bo¹, CHEN Gang¹

¹(Key Laboratory of Computer Network and Information Integration (Southeast University) Ministry of Education, Nanjing 210096, China)

²(Department of Computer Science, Huaiyin Institute of Technology, Huaiyin 223001, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-25-83792310, E-mail: varguard@yeah.net

Yu K, Wu GX, Xu LB, Chen G. Debt relationship based fair file exchange in distributed hash table network. *Journal of Software*, 2007,18(7):1778–1785. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/18/1778.htm>

Abstract: The selfishness of nodes degrades the system usability of P2P network. Debt relationship based file exchange network constructs an incentive mechanism which induces cooperation and guarantees fairness in file exchange. The key point of the mechanism is finite neighbors, an inherent characteristic in DHT (distributed hash table) networks and so is the interacting between nodes form a repeated games. DFFE (debt relationship based fair file exchange in DHT network) protocol only needs to maintain a little local interacting information, so the protocol cost is low and scalable for large network. In routing, one-hop information based greedy arithmetic is used. Game among rational nodes exists a Nash equilibrium and the approximate algorithm of strategy selection gradually converges. Simulations indicate the validity of incentive mechanism and the steady performance in dynamic networks.

Key words: P2P (peer to peer); DHT (distributed hash table); incentive mechanism; Nash equilibrium

摘 要: P2P(peer to peer)网络中,节点的自私行为极大地降低了系统的可用性.基于债务关系的文件交换网络,构建了一种促进合作的激励机制.同时,该机制保证了文件交换的公平性.激励机制的关键在于 DHT(distributed hash table)网络邻居有限的固有特征,因而节点间的交互易于形成重复博弈.DFFE(debt relationship based fair file exchange in DHT network)协议只需维护很少的本地节点交互信息,协议开销小、网络扩展性好.网络路由采用基于一跳信息的贪婪算法.理性节点间的博弈存在纳什均衡,其策略选择的近似算法具有渐进收敛性.仿真实验表明了激励机制的有效性和在动态网络中性能的稳定性.

关键词: P2P(peer to peer);DHT(distributed hash table);激励机制;纳什均衡

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

* Supported by the National Development and Reform Commission High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.CNGI-04-16-18 (国家发改委高技术发展计划)

Received 2006-08-13; Accepted 2006-11-16

P2P 网络是一种由大量自治节点组成的覆盖网络,而节点自治往往产生自私性行为.1968 年,Hardin 从博弈论的角度提出公共悲剧问题,指出个人利益和社会利益的矛盾冲突.对于文件交换网络,这种矛盾表现为:用户只想从其他用户处获取文件,而不愿为别人提供文件服务,即 Free-riding 行为问题;在具有信任机制的系统中,虽然可用降低信用等级的方式排斥用户的 Free-riding 行为,但却无法遏止用户以新的身份注册并加入系统,即存在 White-Washing 问题.节点自私性所带来的严重问题引起了人们的广泛关注.2001 年对 Gnutella 的统计结果^[1]表明,80%的文件是从 20%的节点下载的,这样的系统就退化到传统的 C/S 模式.自私节点的行为极大地降低了系统的性能,危及到系统的可用性.对于一个商用系统而言,这样的 P2P 技术是不成熟的.因此,建立有效的激励机制,促进用户间的合作关系,是目前促进 P2P 应用迫切需要解决的问题.本文试图从 DHT 网络的有限邻居属性出发,引入不可交换的债务关系,从而构造一种新型的具有激励机制的 P2P 网络.

1 相关工作

文献[2]指出,重复交互模式可以促进合作关系的形成.以文件共享为例,假设节点 s, d 邻接.当 s, d 之间存在长期的文件交换关系时,合作很容易达成.也就是说,当 s 从 d 获得资源时, d 也就获得了从 s 获得资源的权利.这种互利的关系有时也被称为重复博弈.

但是在 P2P 网络中存在的是大量的一次性交互过程,重复博弈很难形成.大量研究^[3-6]通过建立信任或名誉系统来促进合作,使声誉或信任值高的节点获得更好的服务.本质上,此类系统构建了自治节点和信任系统之间的重复博弈.而各种基于微支付的激励机制^[7-10]通过刻画 P2P 网络的经济关系,在促进合作行为的基础上,也给网络设计带来了更大的灵活性.但是,这些系统存在巨大的挑战:需要维护一个安全、高效的认证机构,而这在 P2P 网络中实现难度很大.

在 Ad hoc 网络中,各节点只能与邻居节点交互,因此,相邻节点间自然地形成了重复博弈,更容易形成合作关系^[11,12].而在 P2P 网络中,虽然不存在物理上的限制,但是 DHT 网络在逻辑网络上形成了有限邻居节点,因此也可以形成重复博弈.

微支付方案的一种简化版本是物物交换,也即交互节点进行等价交换,这种原始的交换方式不需要建立复杂的监测和评价机构,也不存在节点间勾结欺骗行为.在不安全、动态性很强的 P2P 网络中,这种方案具有很大的优势.为了获得更多的物物交换机会,文献[13]提出了多方参与的交换环,但是由于物物交换存在时间上的强约束,寻找这样的环并不容易,使得许多潜在的交易活动无法实现,系统效率较低,方案缺乏必要的弹性.

综合以往的研究成果,本文提出了基于债务关系的激励机制.这一方案的要点在于释放了物物交换的时间约束,通过引入债务关系来保证公平交易,参与方通过放贷获得未来请求服务的机会,从而促进了参与者的合作.但是由于取消了等价交换同时性的约束,也就产生了参与者未来毁约的可能,如能把节点限定在较小的网络空间范围内,通过建立节点间有限、稳定的邻接关系来实现重复博弈框架,可以解决这一问题.相对于信任或微支付,本方案对于网络附加设施的要求大为降低,增强了系统的扩展性.

2 基于债务关系的文件交换

本文提出的文件交换方案是在 DHT(distributed hash table)网络基础上的改进.对 DHT 协议的细节感兴趣可参阅文献[14,15].为描述方便,本文以 Pastry 网络作为协议的基础.

2.1 网络基本模型

N 个自治节点相连,组成自组织的 Pastry 网络.节点 i 的路由表的叶子集和路由表项集组成下游节点集 RT_i .

定义 1. 若 $j \in RT_i$, 则称 j 为 i 的下游节点, i 为 j 的上游节点,表示为 $i \rightarrow j$.若 $i \rightarrow j$ 时,构造一条 i 指向 j 的有向边,则节点间的下游节点关系形成了有向图 G ,如图 1 所示.

定义 2. 债务关系:当 i 从 j 下载了一个文件时, i 和 j 之间形成了债务关系, i 为借方, j 为贷方,表示为 $j > i$.债务关系只能发生在相邻节点之间.当 j 不与 i 邻接时,必须通过中间结点充当中继来形成债务关系链.如图 2 所示,中间节点 k 为 i 提供担保,使得 j 同意给 i 上传所需文件.这时形成了 $j > k, k > i$ 的关系链. k 称为关系链中的中继.

当 i 和 j 之间不存在债务关系时,必须有其中一个节点首先主动向另一节点放贷.放贷需满足约束:借方为上游节点,这一约束把可借贷节点数控制在可控范围内.

当存在 $j > i$ 关系时,节点 j 可以要求 i 为它提供服务或要求其为某服务请求充当中继.当服务满足后, $j > i$ 关系取消,即关系 $j > i$ 被新的借贷行为中和.

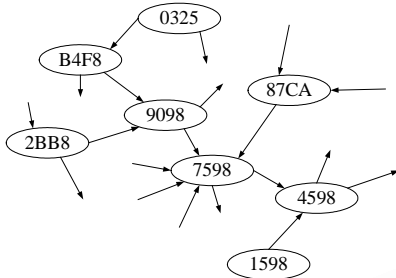


Fig.1 Basic topology of DHT network

图 1 DHT 基本网络拓扑

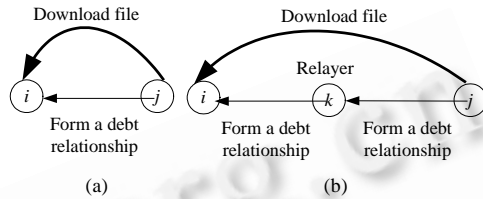


Fig.2 Forming of debt relationship

图 2 债务关系的形成

定义 3. 集合 $\{ij > i\}$ 的大小称为 j 的债务总额 out_j ,集合 $\{k|k > j\}$ 的大小称为 j 的债务总额 in_j .节点 j 维护一个借方(debit)集合 D_j .

债务关系具有以下性质:

- (1) 互斥性:同一链路任意时刻只能存在一个债务关系;
- (2) 不可传递性:与货币不同,债务关系为节点间的私有关系,债务关系不可以转让;
- (3) 有向性:只存在能由下游节点指向上游节点的债务关系.

2.2 基于债务关系的网络拓扑及路由

在图 G 的基础上,由于节点交互形成了债务关系图 G' .节点间的链路具有两种状态:占用、开放.当 $i > j$ 时,链路 (i,j) 处于占用状态,在图 G' 中表示为 j 指向 i 的有向实边.当 i,j 之间不存在债务关系时,若 $j \rightarrow i$,则链路 (i,j) 处于开放状态,在 G' 中形成 j 指向 i 的有向虚边.如图 3 所示.

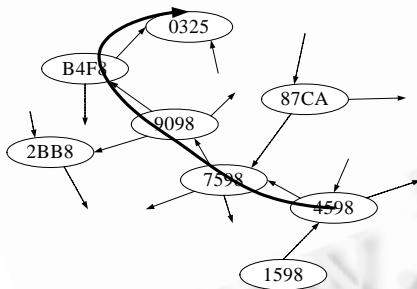


Fig.3 Debt relationship graph

图 3 债务关系图

网络中分布 m 个文件,文件内容通过哈希得到关键字 key 并存储在相应的节点上.由以上讨论可知,节点 i 请求某关键字为 key 的文件,实际上就是在有向图 G' 中寻找 $host(key)$ 的借贷关系链($host(key)$ 为 key 文件的宿主机),其等价于以 key 为目标的路由过程,直到找到宿主机 $host(key)$.

由于网络拓扑随着债务关系的分布变化而变化,因此,任何全局确定性路由算法都是不可行的.本文采用一种贪婪算法 Local-Pastry,该算法包括两个不同的过程 $query$ 和 $relay$,分别处

理节点是源节点和不是源节点的情况.下面描述了对应算法:

```

Procedure query (){
    /* i is the source*/
    While (TRUE){
        request packet=construct packet(key(file))
        for ( $j \in RT_i$  or  $j \in D_i$ ) send packet to j
        wait for next turn /*only one query can be issued one turn */
    }
}
Procedure relay()// i is the relayer

```

```

key=draw-out(request packet)
if (key=i) then reply the query
else {
  nexthop= arg minj |j, key| j ∈ RTi or j ∈ Di /*|j, key| is local distance between j and key*/
  if (|<nexthop, key|<|i, key|) then send packet to nexthop
  return
}
}

```

定理 1. 该路由算法不产生环路.

证明:假设路由过程产生了环路(i,j,...,i),|x,y|表示 x 与 y 之间的逻辑距离,则|i,key|>|j,key|>...>|i,key|.矛盾.

路由中不会产生环路是路由算法的一个很好的特性,具有这一特性会给算法设计带来很大的便利,由定理 1 可知,本算法满足这一要求.

请求节点收到应答,表示找到了一条到 host(key)的借贷关系链.这时,请求节点通知该借贷关系链上的相关节点更新借贷关系,并从 host(key)下载文件.

2.3 激励模型和网络行为分析

通过引入债务关系,节点间形成一个有效的激励机制.为了揭示该激励机制的具体性质,本文对一个简化的协议模型从博弈论的角度加以分析.

博弈模型可表示为三元组:{G',S₁,...,S_n,u₁,...,u_n};G'为基于债务关系的网络拓扑,S_i=[0,m]为节点 i 的策略空间,表示单位时间内共享的文件数,节点 i 在该博弈中的可行策略为选择不同的共享文件数.m 为最大可提供的文件数.显然,m 是有限的.假定文件的分布、请求某文件的节点的分布都是均匀分布的,文件大小相同.在博弈分析时暂不考虑文件流行度及节点共享时对不同文件的策略选择,这样,我们可以把注意力集中在服务的提供与获得之间的简单数量关系上.

节点 i 由于下载所需文件获得效用 u_i,u_i(d)=f_i(d)-w_i(d).d 为文件下载量,f_i(d)为 i 的服务满意度,w_i(d)为代价.由经验可知,节点的边际满意度随着下载量 d 的增加而减少,但不小于 0.因此,f_i(d)为非降单调凹函数.w_i(d)=d·c,c 为单位文件的传输开销.因此,u_i(d)是有极大值的凹函数.

定理 2. 债务关系中的中继对节点的效用没有影响.

证明:只有实际的文件下载才会产生效用和开销,债务关系的中继不直接产生效用和开销,且中继行为不会影响其自身未来下载和上传.假设当前指向节点 i 的债务关系、从 i 发出的债务关系、可用的下游链路、可用的上游链路的数目分别为 p,q,r,s,因此,i 可用于请求服务的链路数为 p+r,可接受服务的链路数为 q+s.这时,如果节点 i 接受 x 个中继请求,则相应的各类链路的数目变为 p+x,q+x,r-x,s-x.i 可用于请求服务的链路数、可接受服务的链路数仍为 p+r,q+s.节点未来提供服务及接受服务的概率并没有发生变化,因此对节点的效用不会产生影响.

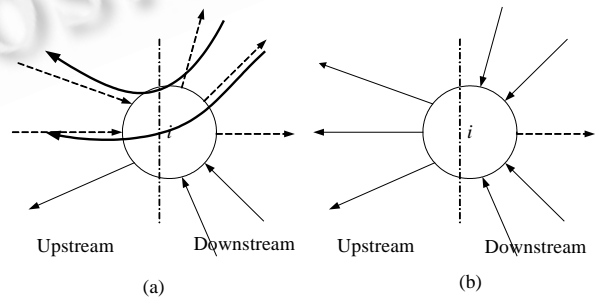


Fig.4 Relaying of debt relationship

图 4 债务关系的中继

该结果说明,节点并没有激励去为其他节点提供中继服务,但是提供它也没有损失,因此,可以在基本协议中设置中继服务功能.这时,非恶意节点并没有激励去修改协议,拒绝提供中继服务.如图 4 所示.

定理 3. 在足够长的时间段内,节点提供服务的速度 f_{offer} 和被服务的速度 f_{use} 趋于相等.任意时间段内,节点 i 总服务占用和提供之差不过下游链路数|RT_i|.

证明:(1) 首先,暂不考虑节点作为中继的情况.由协议性质 1 可知,在任意时间段 T 内,每条链路的两个方向上债务关系的总数最多相差 1.若节点共使用 n 条链路,则 T 时间段内,总的入度和出度之差不超过 n .同时,由性质 3 可知,节点只能使用下游节点获得服务.因此,任意时间段内,节点总服务占用和提供之差不得超过下游链路数 $|RT_i|$.当 T 足够长时,

$$\left| \int_{t_0}^{t_0+T} (f_{offer}(t) - f_{use}(t)) dt \right| \leq n \cdot \lim_{T \rightarrow \infty} (f_{offer} - f_{use}) = 0.$$

(2) 由定理 2 可知,中继不影响节点提供和占用服务,因此,该结论在存在中继的情况下依然成立.

在 DHT 网络中,节点的下游链路数 $|RT_i|$ 是一个常数,一般不是很大.因此,即使节点不提供服务,只是使用服务,其获得的利益也不是很大.当节点需要网络的长期服务时,合作对节点更有利.

由定理可知 $f_{offer} = f_{use}$,因此,该协议提供的等价交换,交换是公平交换.

引理 1. 当 $f(\cdot), g(\cdot)$ 为单调增的凹函数时,复合函数 $(f \circ g)(x) = f(g(x))$ 也为单调增的凹函数.证明略.

引理 2. 纳什均衡存在性定理^[16]:若博弈的策略空间为欧氏空间上的非空紧凸集,且所有参与者的效用函数是拟凹的,则存在一个纯策略纳什均衡.证明略.

定理 4. 对于无限用户群的网络,用户的博弈行为存在纳什均衡.

证明:设当前网络中,路由长度的期望为 \bar{l} ,每跳平均成功率为 γ .假设所有文件的期望访问频度相等,可用需求速度 v 表示.节点 i 目前共享文件数 s_i ,单位时间内的平均上游债务数为 a_i ,平均下游可用链路数为 b_i .因此,单位时间内可获得的服务为 $g(s_i), g(s_i) = (a_i + b_i) \gamma^{l-1}$.

c_i 表示 i 的上游节点数.设 i 增加一个共享文件,即共享文件数为 $s_i + 1$,则单位时间内可获得的服务为 $g(s_i + 1)$,

$$g(s_i + 1) = \left(a_i + b_i + \gamma^{l-1} \frac{c_i - a_i v}{c_i} \right) \gamma^{l-1}.$$

$g(s_i + 1) > g(s_i)$,即函数 $g(\cdot)$ 单调增,且 $g(\cdot) < (c_i v + b_i) \gamma^{l-1}$.

$g(\cdot)$ 为单调增的凹函数.

用户的效用为 $u_i(g(s_i)) = f(g(s_i)) - c g(s_i)$, c 为单位文件服务接受方所需付出的代价,比如带宽消耗,假设为常量. $f(\cdot)$ 为用户满意度,为获得的服务的单调增严格凹函数.

由引理 1 可知, $f(g(s_i))$ 为单调增凹函数.

又 $g(s_i)$ 为单调增凹函数,

$u_i(g(s_i))$ 为凹函数.

显然, $u_i(g(s_i))$ 满足连续性.该博弈的策略空间为 $(S_1, S_2, \dots, S_i, \dots)$,其中, S_i 为单位时间内平均共享文件数,满足连续性,则策略空间为紧凸集.由引理 2 可得,该博弈存在纳什均衡.

纳什均衡的存在,表明系统存在这样的状态:所有节点的策略都是对手当前状况下它的最佳策略^[17].从而系统达到一个稳定状态.下一步必须证明纳什均衡处节点是否有效率.我们将在仿真实验中加以验证.

2.4 策略选择算法

博弈的纳什均衡,要求节点具有完全的理性,这显然是不可能的.但在现实生活中,许多博弈问题的确收敛于纳什均衡.对此,进化博弈理论给出较为成功的解释.其中,最优反应动态是一种常用的进化博弈模型.可以证明,最优反应动态的稳定点就是博弈的一个纳什均衡.因此它反过来提供了一种向均衡点逼近的分布式算法.

理论上,节点可以用全局最优化算法来求解当前最优反应动态.但是在大型网络中,只能采用近似算法.这里应用优化算法中的 0.618 搜索法来求解问题,以 20 轮为一个调整周期,其中前 8 轮用于在一定策略范围内以 0.618 法搜索最优反应,后 12 轮应用该最优反应.然后根据新的网络状态进入下一个调整周期.算法描述从略.仿真实验表明,该策略选择算法是收敛的.

3 威胁模型

由于节点的自治性,网络中存在着各种自私的行为.本节讨论与激励机制有关的一些主要问题及解决方法.

本文仅讨论理性节点的自私行为,而恶意节点及安全方面的问题这里不作介绍.

3.1 伪造文件及虚假报告问题

当在债务关系链中存在中间节点 k 时,接受节点 i 可能控诉服务方 j 未提供服务,或者指责 j 提供伪文件, k 很难确定真实情况.文献[18]证明,当不存在可信的第三方时,想获得严格一致的分布式交换协议是不可能的.因此,我们提出了基于认证中心 CCS(central control server)的协议.协议分两轮:第 1 轮, i 与 j 交互并提交结果,若 i 投诉 j 违约,则 CCS 介入,要求 j 通过 CCS 向 i 重传文件.这时 j 仍然可以选择传、不传或伪造文件,CCS 根据结果为债务关系链上的中继节点分配债务关系.

首先分析当 j 的策略空间为{传,不传}、 i 策略空间为{投诉,沉默}时的策略选择.假设 i 从该文件可获得效用 u ,但上传和下载文件消耗带宽,因此付出代价 $c, u > 2c$.而建立债务关系将使 j 获得未来请求文件的权利,即未来可获得效用 u ,而 i 有义务为在未来某个时刻为 j 提供服务,即未来将付出代价 c (不考虑贴现因子).同时,CCS 提供认证将使 i, j 付出代价 $w, w < c. w$ 可以表示认证导致的时延或附加的传输数据量.该博弈问题如图 5 所示.

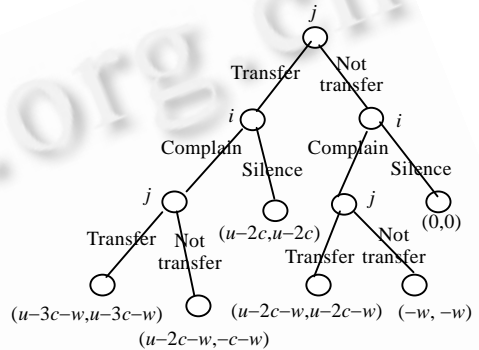


Fig.5 Game tree

图 5 博弈树

可以看出,(沉默,传)是该博弈的子博弈精炼解.

对于 j 传输伪文件的情况可以作类似的分析.

因此在 CCS 存在时,原协议将被忠实地执行,违背对双方都没有好处.因此,虽然采用了集中式的认证机构,但是理性的参与人不会去违背协议,因而理论上,CCS 的负荷为 0,CCS 只起威慑作用.即使考虑到链路可能存在错误和系统的不完美性,这种负荷也很小,因为 P2P 网络处在传输层的上层,传输层提供的是有保证的服务,因此出错概率很小.

3.2 自私节点的勾结问题

许多基于信任的激励机制都必须单独考虑节点勾结的问题,但是本协议对于勾结问题具有良好的抵御能力.试考虑,为了提高节点 i 的放货总额,节点 j 与 i 相勾结, j 谎称 i 向他提供了服务.但是这样对勾结的群体而言,它可使用的资源总额并没有增加.对于中间节点,根据定理 2 可知,中继请求对它的效用没有影响.因此,无论是作为中间节点还是端节点,勾结并不能带来效用的增加.

3.3 White-Washing问题

为了研究廉价的假名给系统效率带来的损害,文献[19]提出了假名的社会代价的概念,并采用入场费来克服这一问题.对应于上述文件交换网络,可以对基本协议作如下修改:当节点加入网络时,节点不能马上获得服务,而是首先要主动为邻居节点提供服务,包括下游节点.因此,债务关系的性质 3 不再成立,即存在上游指向下游的债务关系.债务关系建立后,节点利用债权请求服务.

4 仿真及分析

理论证明均衡是存在的,但是并没有证明动态网络中均衡的存在性.如果存在,该均衡点是否有效率;同时,局部的最优化算法是否收敛也是未知的.这些问题需要借助仿真实验来求解和验证.

4.1 仿真环境

在 Windows 环境下选择 VC++6.0 作为编程语言,以 Pastry 作为基本的网络结构,实现了新的文件交换协议.

实验节点数为 1 024,节点 id 的基为 2^4 ,路由由表 5 行 16 列.实验由 1 000 轮组成,每轮周期 1 分钟.在每一轮中,节点向各可行链路发布一个文件请求.当每轮结束时,节点根据网络目前的状态调整自己的策略:共享文件数.设节点的带宽和存储空间足够充足,文件大小为 5M.服从均匀分布.Peer 之间每个连接的传输带宽为 100k.假设

节点 i 的效用函数为 $\log(s_i + 1)^{a_i} - s_i$, 其中, s_i 为节点 i 的共享文件数, a_i 为节点相关的参数. 除待考察节点 i 以外, 其他节点 a 在实验中不变, $a=5$.

4.2 策略选择算法的收敛性

实验考察不同的节点加入/离开频度 e (表示为每分钟加入/离开网络的节点个数) 下, 逼近算法是否收敛. 如图 6 所示, 其中 X 轴为实验时间, Y 轴为对应时间段内的平均文件共享数. 节点 i 的 $a=8$. 实验表明, 在静态网络中 ($e=0$), 策略选择算法收敛于 8.7. 当 e 增大时, 节点策略在均衡点附近波动, 算法是渐进稳定的.

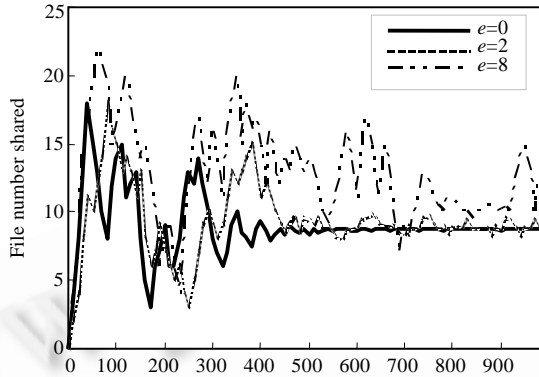


Fig.6 Convergence of the algorithm

图 6 算法的收敛性

4.3 激励机制的有效性

图 7 反映了节点贡献和收益的关系, X 轴为节点 i 所共享的文件数, Y 轴为节点 i 获得的下载带宽. 实验中,

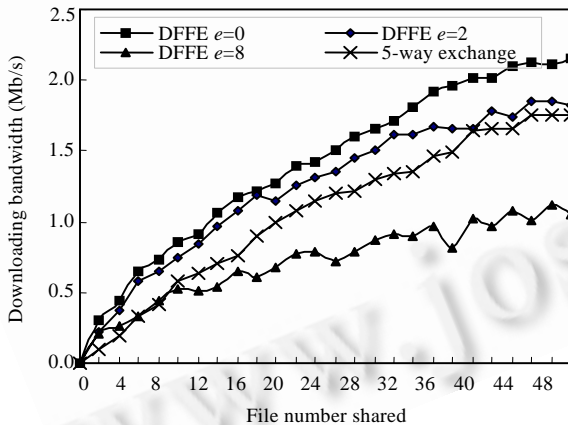


Fig.7 Relationship between benefit and contribution

图 7 收益与贡献之间的关系

通过改变共享文件数来考察其与获得的下载带宽之间的关系. 实验还通过设置 e 参数来考察网络动态性对实际下载速度的影响. 实验表明, 当节点共享文件数增加时, 节点下载带宽始终呈现增加趋势, 也就是说, 节点贡献越多, 获得更多服务的机会越多. 这种性质在动态性很强的网络中 (如 $e=8$) 依然成立. 因此, 该激励机制促进了节点间的合作关系, 获得与付出成正相关. 从这个意义上说, 该激励机制也是公平的.

作为性能对比, 实验同时构造了一个简化的 5-way exchange 协议^[13], 其中最大可同时发出文件请求数为 5, 最大可接受文件请求数为 80, 最大请求树深度为 5, 仅考察静态网络. 结果表明, DFFE 协议较 exchange 协议实际获得的文件下载速度

有一定提高. 其性能提高主要是由于 DFFE 解决了 exchange 协议中交换同时性约束问题.

5 结论及进一步的工作

本文提出了一种新的 P2P 网络激励机制. 事实上, 除了 DHT 文件交换网络, 该机制也可以应用于其他许多网络中. 我们证明该机制有效地促进了节点间的公平合作关系. 同时, 给出的逼近算法具有良好的动态收敛性, 因而算法适用于动态的 P2P 网络. 下一步, 我们将进一步改进协议的性能, 提高网络吞吐量和请求反应速度. 同时将考察协议的安全性, 对存在恶意节点的网络环境中的协议安全作进一步研究.

References:

- [1] Adar E, Huberman BA. Free riding on Gnutella. First Monday, 2000,5(10). <http://firstmonday.org/issues/issue5-10/adar/index.html>
- [2] Axelrod R. The evolution of cooperation. Basic Books, 1984.
- [3] Lai K, Feldman M, Stoica I, Chuang J. Incentives for cooperation in peer-to-peer networks. In: Proc. of the Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems. 2003. <http://www2.sims.berkeley.edu/research/conferences/p2pecon/index.html>
- [4] Ranganathan K, Ripeanu M, Sarin A, Foster I. Incentive mechanisms for large collaborative resource sharing. In: Proc. of the IEEE Int'l Symp. on Cluster Computing and the Grid. 2004.
- [5] Gupta R, Somani AK. Game theory as a tool to strategize as well as predict nodes behavior in peer-to-peer networks. ICPADS, 2005,(1):244–249.
- [6] Buragohain C, Agrawal D, Suri S. A game theoretic framework for Incentives in P2P systems. In: Proc. of the 3rd Int'l Conf. on Peer to Peer Computing. Los Alamitos: IEEE Computing Society, 2003.
- [7] Golle P, Leyton-Brown K, Mironov I, Lillibridge M. Incentives for sharing in peer-to-peer networks. In: Proc. of the 3rd ACM Conf. on Electronic Commerce. New York: ACM, 2001.
- [8] Gupta R, Somani AK. A pricing strategy for incentivizing selfish nodes to share resources in peer-to-peer (P2P) networks. In: Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Networks. Piscataway, 2004. 624–629.
- [9] Sanghavi S, Hajek B. A new mechanism for the free-rider problem. In: Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems. New York, 2005. 122–127.
- [10] Li C, Yu B, Sycara K. An incentive mechanism for message relaying in peer-to-peer discovery. In: Proc. of the 2nd Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems. 2004. <http://www.eecs.harvard.edu/p2pecon/program.html>
- [11] Srinivasan V, Nuggehalli P, Chiasserini CF. An analytical approach to the study of cooperation in wireless ad hoc networks. IEEE Trans. on Wireless Communication, 2005,4(2):722–733.
- [12] Félegyházi M, Buttyán L, Hubaux JP. 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. 776–789.
- [13] Anagnostakis K, Greenwald M. Exchange based incentive mechanism for peer-to-peer file sharing. In: Proc. of the 24th Int'l Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS 2004). Los Alamitos: IEEE Computing Society, 2004. 524–533.
- [14] Rowstron A, Druschel P. Pastry: Scalable, distributed object location and routing for large-scale peer-to-peer systems. In: Guerraoui R, ed. Proc. of the 18th IFIP/ACM Int'l Conf. on Distributed Systems Platforms (Middleware 2001). Berlin: Springer-Verlag, 2001. 329–350.
- [15] Stoica I, Morris R, Karger D, Kaashoek MF, Balakrishnan H. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications. In: Proc. of the ACM SIGCOMM 2001 Conf. New York: ACM Press, 2001. 149–160.
- [16] Dasgupta P, Maskin E. The existence of equilibrium in discontinuous economic games. Review of Economic Studies, 1986,53(1): 1–42.
- [17] Nash J. Equilibrium points in N-person games. Proc. of the National Academy of Sciences, 1950,36(1):48–49.
- [18] Pagnia H, Gartner FC. On the impossibility of fair exchange without a trusted third party. Technical Report, TUD-BS-1999-02, Darmstadt, 1999.
- [19] Friedman E, Resnick P. The social cost of cheap pseudonyms. Journal of Economics and Management Strategy, 1998,10(2): 173–199.



于坤(1972 -),男,江苏淮安人,博士生,讲师,主要研究领域为 P2P 网络信任,激励机制.



许立波(1976 -),男,博士生,主要研究领域为流量管理,P2P 网络协议.



吴国新(1956 -),男,教授,博士生导师,主要研究领域为网络协议及标准,网络安全.



陈刚(1978 -),男,博士生,CCF 学生会员,主要研究领域为 P2P 内容分发技术.