

P2P 网络激励兼容的声誉评价及服务分配

于 坤

(淮阴工学院 计算机工程学院, 江苏 淮安 223002)

摘 要: 由自私节点组成的 P2P 网络常常采用基于声誉的机制激励节点间的合作。当前已经提出了一类基于声誉的方案,但其中大部分方案都忽视了方案的分布式实现中惩罚的激励兼容性问题。在社会学或生态学领域,该问题常被称为二阶搭便车问题:拒绝低声誉节点的服务请求会降低惩罚者自身的声誉,因此对于自私节点而言,这种惩罚并不总是有利的选择。以 P2P 文件共享为例对该问题进行了分析,提出了一种连续型二阶声誉评价模型及两种服务分配规则,即概率分配规则和比例分配规则,实验表明只有概率分配规则是激励兼容的。

关键词: P2P 网络; 声誉评价; 激励机制; 二阶声誉

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)06-2317-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.06.084

Incentive compatible reputation evaluation and service assignment in P2P networks

YU Kun

(Dept. of Computer Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an Jiangsu 223002, China)

Abstract: P2P networks are usually made of selfish nodes where the incentive mechanisms based on reputation are often used to induce cooperation. A class of schemes based on reputation has been proposed, but almost all of them ignore the incentive compatibility of punishment when the schemes are implemented in distributed model. It is usually called second-ordered free riding in the researches of sociology or ecology: refusing service request from nodes with low reputation will increase the punisher's own reputation, so refusing isn't always a favorable choice for selfish node. The paper discussed this problem in P2P file sharing networks and proposed a continuous second-ordered reputation evaluation model and two service assignment rules: probabilistic assignment rule and proportional assignment rule. The experiments show that only the first one is incentive compatible.

Key words: P2P network; reputation evaluation; incentive mechanism; second reputation

0 引言

由于 P2P 网络节点普遍存在决策理性与行为自私性,各种合作的增进方法正受到广泛的研究与应用,声誉机制是其中较为常用的方法。在文件共享系统中,声誉常被刻画为节点合作倾向的量化指标,如节点向其他节点贡献的服务数量。客户声誉值作为服务节点提供差异化服务的依据,已经广泛应用于常见系统中,如 peer-approved 及 service-quality 等^[1-4]。

声誉的激励兼容性是合作机制的基本问题。声誉对合作的促进依赖于可信且有效的惩罚机制,然而惩罚常会给执行者增加执行的开销。若声誉测度仅反映节点提供服务的程度,即采用一阶声誉,惩罚将导致执行者声誉的下降。在分布式合作机制中,惩罚者往往在另一交互中充当请求者,声誉的降低直接影响其可获得的服务,因此惩罚作为一种威胁的可信度值得商榷。激励兼容性普遍存在于 P2P 网络的报文转发、路由、服务等多个应用层次,是分布式合作激励机制的普遍问题。

例如,Maze^[1]是一种采用 P2P 结构的文件共享网络。在 Maze 系统中,用户每 MB 的文件上传可获得 1.5 points 的点数奖励,而 1 MB 的成功下载将消耗点数 1.0 points。用户的下载请求在服务节点处排队,并根据用户声誉 T 确定排队次序,

$T = \text{requestTime} - 3 \log P$,其中 P 为用户的总点数。Maze 系统的服务节点可以获知客户节点的声誉值,并通过增加等待时间的方式对低声誉节点进行惩罚。然而,该服务规范并不具有激励兼容性,服务节点是否遵从该规范并不影响节点所获得的点数。显然,服务节点优先为大带宽节点提供服务,而不是采用基于声誉的排队规则,可以更快地提升点数收益。

演化博弈模型 image scoring^[5]是社会学与生态学对声誉机制的典型分析模型。该模型采用了随机匹配的用户交互方式,服务者的策略空间包含三类服务策略:无条件合作(Allc)、无条件背叛(Alld)及区分策略(Disc),只有采用区分策略时服务方才考虑对方声誉。其动力学系统的相图存在连续平衡点构成的边,这些点最终导致 Alld 占优的系统状态。Panchanathan 等人^[6]存在错误时,系统只存在 Alld 占优的唯一的进化稳定点。

以上所述即为所谓二阶搭便车问题,只要采用分布执行方式,声誉机制就将面临二阶搭便车困境,导致惩罚者的角色缺失,最终导致整个合作激励机制的失效。声誉评估应区分恶意行为与正当惩罚行为。正当惩罚不降低声誉值,从而激励节点自主维护约定的行为准则,如 Blanc 等人^[7]为 P2P 路由设计的基于离散声誉值的社会规范等。二阶声誉通过引入双方的声

收稿日期: 2011-09-29; 修回日期: 2011-11-09

作者简介: 于坤(1972-),男,江苏淮安人,讲师,博士,主要研究方向为计算机网络(vanguard@yeah.net)。

誉来区分正当惩罚与背叛,正当惩罚可赢得积极的声誉评价,从而满足了惩罚的激励兼容性。本文提出了时间相关的连续性二阶声誉以及两种分布式服务分配方案,并分析了在多种负载条件下该分配方案的适用性。

1 演化博弈模型

本文对声誉机制的分析主要针对如下的 P2P 文件共享:节点根据应用需求产生一定量的文件请求,P2P 网络执行文件的查询与定位,并由服务节点根据请求者的声誉与服务分配规范提供文件服务。假设节点交互以轮为单位,每一轮节点可发出的文件下载请求数相同。节点效用函数采用以服务量为自变量的线性效用函数,提供单位服务给服务者带来效用 $-c$,给请求者带来效用 d 。服务者包含无条件合作、无条件背叛及区分策略三类基本的服务策略。

演化博弈模型假设:a)用户服务需求的期望服从随机分布;b)服务节点根据客户声誉自主选择自身的服务策略,服务节点能够获得任意节点的准确声誉值;c)P2P 系统可通过多种方式促进节点间的策略学习和模仿。

假设任意节点 i 的用户类型是可变的,每轮结束时节点 i 随机选择一个对等节点 j ,模仿或学习对方上一轮的策略选择及由此获得的用户效用 u_j ,并以一定概率 g_i 选择节点 j 的策略作为新策略,通常 g_i 与用户效用差 $u_j - u_i$ 正相关,在演化博弈中这种策略演化过程称为复制者动态^[8]。

2 连续型二阶声誉评价模型

当前 P2P 系统普遍采用声誉评价模型为一阶的,服务质量是唯一的评价依据。Panchanathan 等人^[6]指出一阶声誉易产生二阶搭便车问题,并提出了二阶声誉 Standing。声誉评价具有服务质量及请求者的声誉两个参照量。其核心思想是:用户对高声誉节点的合作态度以及对低声誉节点的不合作态度都应得到肯定,声誉评价需区分正当的惩罚和不正当的背叛行为。

采用连续型声誉值可以描述更细粒度的用户合作水平并实施更有效的服务区分。由于存在服务质量在时间维度上的波动性、报文传输错误或者声誉信息的更新延时等不稳定因素,而用户策略往往具有一定的延续性,依据较长时间跨度内的节点交互可以更准确地评估节点的声誉,但最近时期的交互在声誉评估中应占用更大权重。

定义 1 协议服务质量 $SQ(\text{Bob}, \text{Alice})$ 。根据系统指定的服务分配规范,Bob 应为 Alice 提供服务的质量或数量。协议服务质量与 Alice 的声誉以及 Bob 的最大服务能力(或称服务容量)有关。

定义 2 二阶连续型声誉 c-Standing。节点 Bob 的声誉 c-Standing 表示为

$$r_{\text{Bob}} = \lambda r_{\text{Bob}}^0 + \frac{(1-\lambda)}{m} \sum_{i=1}^m \min(1, \frac{q_i}{SQ(\text{Bob}, i)})$$

其中: r_{Bob}^0 为上轮节点 Bob 的声誉, λ 为时间折算因子。若本轮 Bob 为 m 个节点提供了服务,其中用户 i 获得的实际服务量为 q_i 。以文件共享应用为例, q_i 表示单位时间内 Bob 提供的实际文件传输流量。

由定义 2 可知,当 Bob 提供的服务 $q_i > SQ(\text{Bob}, i)$ 时可获

得的声誉与 $q_i = SQ(\text{Bob}, i)$ 时相等,而相应的服务开销 $q_i c$ 增加。因此任意条件下 $q_i = SQ(\text{Bob}, i)$ 都占优于 $q_i > SQ(\text{Bob}, i)$, $q_i > SQ(\text{Bob}, i)$ 不可能是理性用户的占优策略,Bob 提供的实际服务质量必定满足 $q_i \leq SQ(\text{Bob}, i)$ 。

因此,理性用户 Bob 的声誉测度可简写为

$$r_{\text{Bob}} = \lambda r_{\text{Bob}}^0 + \frac{(1-\lambda)}{m} \sum_{i=1}^m \frac{q_i}{SQ(\text{Bob}, i)} \quad (1)$$

式中, $q_i \leq SQ(\text{Bob}, i)$ 。

3 两类服务分配规范

由式(1)可知,声誉值与协议服务量密切相关,服务分配规范对协议服务量的分配作了具体规定。但是系统不能强制用户使用指定的服务策略,服务分配规范只能作为用户服务策略选择的推荐。只有满足激励兼容性的推荐才能够引导用户自发地采用该服务策略。本文研究两类典型的服务分配规范,即 RAL 及 PAL。

1)比例分配规范 RAL 服务方同时为多个请求者分配服务容量,设某轮服务者 Bob 收到 m 个用户请求,其用户声誉分别为 $r_1, r_2, \dots, r_m$,RAL 规定,Bob 为任意请求者 Alice 分配的协议服务量为

$$SQ(\text{Bob}, \text{Alice}) = \frac{1}{m} \frac{\min(r_{\text{Bob}}, r_{\text{Alice}})}{r_{\text{Bob}}} p_{\text{Bob}} \quad (2)$$

2)概率型服务规范 PAL 在多个请求节点间以用户声誉的概率选择某个服务对象并分配服务容量。服务分配以轮为周期,在每轮的开始时刻,服务方 Bob 收集到达的服务请求,并在每轮结束时选择其中一个请求者提供相应服务。假设上一轮周期内 Bob 收到 m 个用户请求,其用户声誉分别为 $r_1, r_2, \dots, r_m$,则请求者 Alice 获得服务响应的概率为

$$P_{\text{Alice}} = r_{\text{Alice}} / \sum r_i \quad (3)$$

一旦 Alice 获得服务响应,应获得的协议服务量为

$$SQ(\text{Bob}, \text{Alice}) = \frac{\min(r_{\text{Bob}}, r_{\text{Alice}})}{r_{\text{Bob}}} p_{\text{Bob}} \quad (4)$$

其中: p_{Bob} 为 Bob 的服务容量,以文件共享应用为例,表示 Bob 可提供的最大文件下载带宽。

4 RAL 的激励兼容性分析

4.1 RPFS 策略

定义 3 基于声誉的步进填充策略 RPFS。服务节点 Bob 将该轮接收的所有服务请求根据请求者声誉的升序进行排列,然后依次给各请求者 i 分配服务,分配的服务量为 $SQ(\text{Bob}, i)$,直至服务总量达到 Bob 的服务容量。

定义 4 为请求节点分配的服务量为 RPFS 策略的 ρ 倍的策略表示为 ρ -RPFS;将实际提供的服务量为 RAL 规范指定服务量 ρ 倍的策略称为 ρ -Disc;若服务分配时不区分节点声誉,而按请求数平均分配的策略称为 ρ -NonDisc。

Bob 采用 ρ -Disc 策略需为 i 提供服务量 $\rho SQ(\text{Bob}, i)$;而 ρ -RPFS 策略对应的服务量为 ρx , x 为采用 RPFS 策略时 Bob 应提供的服务量。

图 1 将 Bob 为请求节点分配的服务量比做底面积为 $\min(r_{\text{Bob}}, r_i)$ 的水桶注入的水量, i 为请求节点的排列次序, $i = 1, 2, 3, \dots, r_i < r_{i+1}$ 。根据 RAL 服务规范,1-Disc 策略提供的服务量

等于协议服务量 $SQ(\text{Bob}, i)$, 对应于水面高度为 $\frac{1}{m} \frac{p_{\text{Bob}}}{r_{\text{Bob}}}$, 而采用

ρ -Disc 策略时对应于水面高度为 $\frac{1}{m} \frac{\rho p_{\text{Bob}}}{r_{\text{Bob}}}$, 如图 1 的虚线所示。

图 1(a) 的阴影部分表示 Bob 采用非区分策略 ρ' -NonDisc 时的服务分配情况, ρ' 的取值满足条件: 采用 ρ' -NonDisc, Bob 的总服务量与采用 ρ -Disc 策略时相等。各请求节点获得相等的服务量 q/m , q 为采用 ρ -Disc 策略时 Bob 的服务总量, $q = \rho \sum_i SQ(\text{Bob}, i)$ 。

图 1(b) 的阴影部分表示策略 ρ'' -RPFS 的服务分配情况, ρ'' 满足约束: ρ'' -RPFS 策略与 ρ -Disc 策略的总服务量相等。服务分配过程可以看做向高度为 $\frac{1}{m} \frac{p_{\text{Bob}}}{r_{\text{Bob}}}$ 的一系列水桶 i 中注水, $r_i \leq r_{i+1}$ 。只有前一个水桶注满后才能为下一个水桶注水, 而总水量为 $q = \rho \sum_i SQ(\text{Bob}, i)$ 。

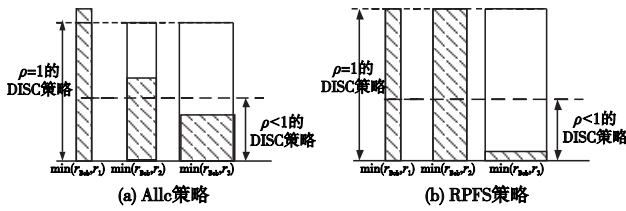


图1 RPFS服务分配策略的示意图

定理1 RPFS 策略占优于 ρ -Disc。

证明 设有 m 个请求者等待服务节点 j 的服务, j 对请求者 i 采用区分策略 ρ -Disc, 则节点 j 提供的服务总量为 $\rho \sum_{i=1}^m \frac{\min(r_j, r_i)}{r_j}$, 而 j 获得的声誉增量 $\Delta r_j = \rho$ 。

假设有两个请求者 user_1 及 user_2 , 两者的声誉分别为 r_1 和 r_2 。

当 $r_1 \leq r_2, r_2 \leq r_j$, 计算 ρ -Disc 及 RPFS 策略获得同等声誉所付出的服务量如下:

a) 当 $\rho \geq 1/2$ 时

若采用 ρ -Disc 策略, 节点 j 支出的服务量为 $w_{\text{Disc}} = \rho \frac{p}{mr_j} (r_1 + r_2)$, 可获得相应声誉增量 $\Delta r_j = \frac{2\rho}{m}$ 。

采用 RPFS 策略时, 节点 user_1 若可获得服务量 $w_{\text{RPFS}}^{(1)} = \frac{p}{mr_j} r_1$, 可获得的相应声誉增量为 $\frac{1}{m}$ 。

这时, 若保证总的声誉增量 Δr_j 不变, 节点 j 还需从 user_2 获得声誉增量 $\frac{2\rho-1}{m}$, 对应的服务量 $w_{\text{RPFS}}^{(2)} = \frac{2\rho-1}{m} SQ(j, \text{user}_2) = (2\rho-1) \frac{p}{mr_j} r_2$ 。

由此可得:

$$w_{\text{Disc}} - (w_{\text{RPFS}}^{(1)} + w_{\text{RPFS}}^{(2)}) = \rho \frac{p}{mr_j} (r_1 + r_2) - \left[\frac{p}{mr_j} r_1 + (2\rho-1) \frac{p}{mr_j} r_2 \right] = \frac{p}{mr_j} (\rho-1)(r_1 - r_2) \geq 0$$

b) 当 $\rho < 1/2$ 时

参看图 1(b) 可知, 采用 RPFS 策略时 user_1 的最大服务量为 $\frac{p}{mr_j} r_1$; 因为 $\rho < \frac{1}{2}$, 所以 $\frac{p}{mr_j} r_1 > 2\rho \frac{p}{mr_j} r_1$ 。

因此, 为获得声誉增量 $\Delta r_j = \frac{2\rho}{m}$, 节点 j 只需为 user_1 提供

服务, 服务量为 $2\rho \frac{p}{mr_j} r_1$; 这时 user_2 没有获得任何服务。

这时, $w_{\text{Disc}} - (w_{\text{RPFS}}^{(1)} + w_{\text{RPFS}}^{(2)}) = \rho \frac{p}{mr_j} (r_1 + r_2) - 2\rho \frac{p}{mr_j} r_1 \geq 0$ 。

当 $r_1 > r_j$ 时, $\min(r_1, r_j) = r_j$, 因此 $r_1 > r_j$ 的服务分配等同于 $r_1 = r_j$, 后一种情况已包含在分析过程中; 同理可得, $r_2 > r_j$ 的服务分配等同于 $r_2 = r_j$ 。

综上所述, 为获得相等的声誉增量, 优先满足低声誉者协议服务质量的 RPFS 策略所需提供的服务量比 ρ -Disc 分配策略低。因此, RPFS 策略为占优于 ρ -Disc, 命题得证。

定理2 当用户实际提供的总服务量一定时, RPFS 策略为占优于 ρ -NonDisc。

定理的证明类似于定理1, 故省略证明过程。

4.2 仿真实验

实验通过 MATLAB 7.0 编写 m 文件类型的仿真程序, 在单机上模拟了节点模型及节点交互, 并将 P2P 网络简化为全连接的点对点链路, 忽略了底层网络的实现。

实验首先考察了采用 c-Standing 声誉时 RAL 分配规则的有效性, 博弈模型见第 1 章。定理 1 和定理 2 表明, 若采用 RAL 理性用户将采用策略 ρ -RPFS, 而非 ρ -Disc 或 ρ -NonDisc 策略。因此, 该演化博弈模型的策略空间可简化为由不同合作程度 ρ 的 ρ -RPFS 策略构成的集合, 其中 ρ 有 11 种取值, 分别为 $0, 0.1, \dots, 1$ 。系统初始化时各策略的比例服从随机分布, 各节点的声誉值为 $(0, 1)$ 之间的随机值。声誉评价的时间参数 $\lambda = 0.9$, 单位服务收益 $d = 10$, 单位服务开销 $c = 1$ 。设执行错误率 $w = 0.01$, 同时用户对服务质量的主观评价服从以真实服务质量为期望、以 $u = 0.1$ 为方差的正态分布。

每轮用户可发出一个或多个请求, 但不同用户发出的请求数相同。假设系统资源随机分布于网络中, 节点间不存在严格的两两服务配对, 节点可能在同一轮收到零个或多个服务请求。每轮结束, 用户 i 以概率 0.2 随机选择另一用户 j , 根据双方策略和该策略下取得的收益调整自己的策略, 最终采用 j 的策略概率为 p_i , $p_i = \max(0, (u_j - u_i) / u_j)$ 。为了提供演化的多样性, 假设每轮结束时节点策略具有变异概率 0.01, 变异后的 ρ 值满足 $[0, 1]$ 均匀分布。

图 2 展示了当每轮用户可发出的请求数为 1 时, 该系统的一次动态演化过程。显然, 所有节点采用合作策略时节点可获得的最大效用值为 $d - c = 9$ 。图 2(a) 表明, 在长期的交互过程中, 用户效用一直在 0 附近波动, 这说明 RAL 下基于声誉的合作机制是无效的, 用户间处于不合作状态。实验还抽样了其中三种 RPFS 策略, ρ 分别为 0, 0.5, 1。图 2(b) 表明, 没有任何一种策略最终成为占优策略, 各策略在 0.09 附近上下波动。

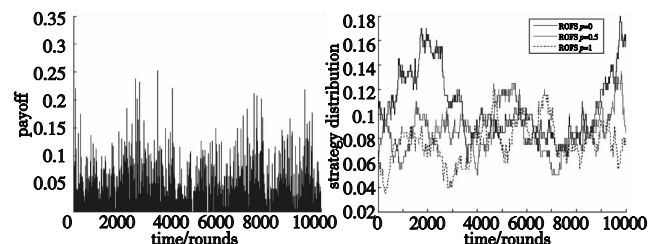


图2 比例分配规则下用户策略的演化及获得的效用

图 3 对每种策略在整个实验中的平均分布进行了统计, 结

果表明,各策略所占比例近似相等,没有任何一种策略明显优于其他策略。

实验表明,根据声誉的比例分配规范 RAL 并非激励兼容的,在该服务规范作用下,系统动态最终导向非合作状态,合作机制是无效的。

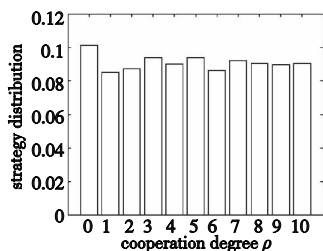


图3 各种策略的平均分布

5 PAL 服务规范的激励兼容性分析

对激励有效性的分析采用实验方法,实验包括区分者 Disc 和不区分者 Allc 及 Alld 三类用户,其中区分者 Bob 根据请求方 Alice 的声誉提供有区分的服务 $SQ(\text{Bob}, \text{Alice})$ 。

实验还分析了更为复杂的网络行为:由于网络的不完美性及节点在策略选择中的随机因素,节点策略并不仅限于完全的合作或不合作,有可能存在一些中间策略。本实验引入其中两类典型的中间策略。

定义 5 ρ -无区分策略(ρ -NonDisc)。服务提供节点 Bob 在决策时不考察请求节点的声誉,假设完全合作的 Bob 为请求节点 Alice 分配服务量为 s ,则采用 ρ -NonDisc 策略的 Bob 为 Alice 分配服务量为 ρs , ρ 称为 Bob 的合作率。

定义 6 ρ -区分策略(ρ -Disc)。Bob 根据 Alice 的声誉分配相应比例的服务量 q_{Alice} , $q_{\text{Alice}} = \rho SQ(\text{Bob}, \text{Alice})$ 。

首先考察节点每轮只能发出服务请求数为 1 时可获得的平均效用和策略分布,实验结果如图 4 所示。图 4(a) 显示,200 轮之后用户的平均效用保持在 5 以上,可见用户仍然可以获得较高的平均效用,系统中存在普遍的合作行为;(b) 给出了各策略的演化过程,当系统演化到 400 轮左右,1-Disc 策略逐渐独占整个系统,并成为稳定的占优策略。显然,当系统中只存在 1-Disc 策略时,该策略不会被其他策略侵入。这时每个节点都将采用合作态度,从而获得趋近于 1 的声誉。

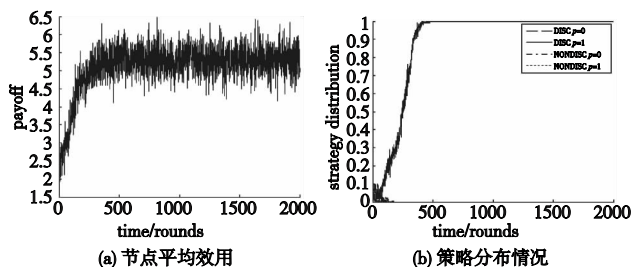


图4 服务方收到多个服务请求时合作机制的有效性

节点效用值比可能的最大效用值 9 有所降低,这是由于当前的服务分配方式不能保证节点在每一轮都能获得被服务的机会:根据 PAL 规范,当多个请求者同时向一个服务方发出服务请求时,最终只有一个请求被接受,同时也存在某些服务方没有被任何请求所命中,这些没有被选择的请求者及未被命中的服务方影响了平均效用的统计结果。

为了证实以上推断,通过增加每轮服务请求数降低未匹配节点的概率:假设每轮节点可顺序发出最多 k 条服务请求,若

当前服务请求没有被服务节点接受,节点可以继续发出对另一节点的服务请求,直到请求被接受;服务节点每隔 $1/k$ 轮收集服务请求,并调用 PAL 规范选择被服务方,直到被服务方被确定。显然,当每轮请求数增加时,节点的未匹配概率单调下降,其极限情况即为两两服务匹配。

图 5 给出了节点效用与最大服务请求数之间的关系。从图中可以看出,随着最大请求数的增加,节点的平均效用也逐渐增加,当最大服务请求数大于 6 时服务匹配近似于两两匹配,这时实验测得的节点效用接近 9。只有节点都采取合作态度才能获得效用 9,因此上述合作机制是有效的,即使在服务请求总量大于系统整体服务能力的高负载条件下。

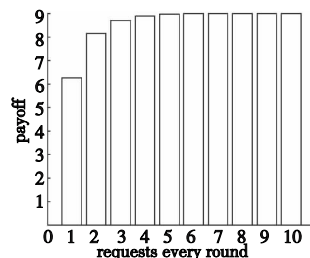


图5 节点的平均效用与最大服务请求数的关系

6 结束语

本文对可应用于实际 P2P 文件共享网络的连续型二阶声誉及服务分配方案进行了初步的理论探讨,重点对两种服务分配规范下合作的有效性进行了全面的讨论,通过实验分析发现,常用的基于比例分配的服务规范 RAL 不能激励用户的合作,而概率选择方案 PAL 是合作有效的,这种有效性包括在动态环境及噪声环境下的合作性。上述结论也可适用于多种网络应用中,如应用层路由、Ad hoc 网络路由及报文转发等。该研究结论具有一定普遍性。

参考文献:

- [1] <http://maze.pku.edu.cn> [EB/OL].
- [2] WANG Chun-zhi, CHEN Hong-wei. A peer-to-peer game model using punishment strategies[J]. *Journal of Networks*, 2010, 5(11): 1357-1364.
- [3] BUCHEGGER S, LEBOUDEC J. Performance analysis of the CONFIDANT protocol: cooperation of nodes: fairness in dynamic Ad hoc networks[C]//Proc of IEEE/ACM Symposium on Mobile Ad hoc Networking and Computing (MobiHOC). 2002:226-236.
- [4] RANGANATHAN K, RIPEANU M. To share or not to share: an analysis of incentives to contribute in collaborative file sharing environments[C]//Proc of Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems. 2003.
- [5] NOWAK M A, SIGMUND K. Evolution of indirect reciprocity by image scoring[J]. *Nature*, 1998, 393(6685): 573-577.
- [6] PANCHANATHAN K, BOYD R. A tale of two defectors: the importance of standing for evolution of indirect reciprocity[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2003, 224(1): 115-126.
- [7] BLANC A, LIU Y K, VAHDAT A. Designing incentives for peer-to-peer routing[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2005:374-385.
- [8] HOFBAUER J, SIGMUND K. Evolutionary games and population dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.