

BitTorrent 激励机制的建模与分析

李晓义, 李治军, 姜守旭

(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 150001 哈尔滨, lixiaoyisuper@gmail.com)

摘要: 为了考察影响 BitTorrent 激励机制的因素, 进行了建模和分析. 针对激励机制存在随机选择这个特点, 采用了马尔可夫过程进行建模. 建模中首先得出转移概率矩阵, 然后计算转移概率矩阵的极限. 理论分析及实验表明: 相同上传带宽的节点会聚类, 通过调整随机选择的节点可以影响聚类速度. 该模型符合激励机制的运行过程, 可以通过改变模型中的相应参数来改善系统性能.

关键词: BitTorrent 系统; 激励机制; 马尔可夫过程; 聚类

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)11-0065-05

Modeling and analysis of BitTorrent incentive mechanism

LI Xiao-yi, LI Zhi-jun, JIANG Shou-xu

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, lixiaoyisuper@gmail.com)

Abstract: To investigate the factors that affect incentive mechanism of BitTorrent system, this paper makes a modeling analysis. Because there are random selections, we use Markov process to model the incentive mechanism. We first get the transition probability matrix and then calculate the limit of the transition probability matrix. Theoretical analysis and experiment results show that peers with same upload bandwidth cluster, and adjusting randomly selected nodes can affect the speed of clustering. The model is consistent with the incentive mechanism, and by adjusting parameters we can improve the performance of the system.

Key words: BitTorrent system; incentive mechanism; Markov process; clustering

随着 Internet 的迅速发展, P2P 的应用逐步受到重视, 其中 P2P 模式文件传输变得越来越流行. 现有许多 P2P 文件共享协议, 如 BitTorrent, Kazaa, eMule 等, 而 BitTorrent 是最成功的一种. 据文献[1]的统计, 在 2004 年 BitTorrent 占据整个网络流量的 35%, 同时占据了 P2P 流量的 53%. 在 2007 年, 德国互联网调研机构 Ipoque^[2]称, P2P 已经占据了互联网的大部分流量, 其中 73.79% 的总流量都来自 P2P 程序. BitTorrent 之所以取得成功, 来自于协议的精巧设置, 而激励机制对于提高系统性能具有重要作用^[3], 即可以有效鼓励用户共享资源, 减少系统中搭便车现象的发生. 因此针对激励机制的相关研究大量展开, Qiu 等^[4]提出了一种简单流体模

型来分析 BitTorrent 系统处于稳态的性能, 同时指出 BitTorrent 中搭便车者可以下载的带宽为 20%. Levin 等^[5]提出了一种基于拍卖的模型来分析 BitTorrent 的激励机制, 指出了 BitTorrent 易于受到的攻击并且提出了改进. 余一娇等^[6]对现有的 P2P 网络的搭便车行为进行了详细的分类讨论, 将已有搭便车抑制机制进行了分析和比较. Legout 等^[7]从实验的角度得出了 BitTorrent 节点聚类的结果, 但是没有给出严格的数学推导. Liogkas 等^[8]指出了高带宽节点完全聚类可能引起低带宽节点下载到完整文件, 但没有给出解决办法. Sirivianos 等^[9]指出了针对 BitTorrent 随机选择部分的一种搭便车攻击: Large View Exploit 攻击. 然而上述研究都没有分析影响激励机制的因素, 因此本文对激励机制进行了建模分析.

1 BitTorrent 激励机制建模

定义 1 集合 $D(i, t)$ 为时刻 t 向节点 i 提供

收稿日期: 2010-09-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60803148).

作者简介: 李晓义 (1981—), 男, 博士生;

姜守旭 (1968—), 男, 教授, 博士生导师.

数据的节点集合;集合 $U(i, t)$ 定义为时刻 t 从节点 i 下载数据的节点集合. 其中: $D(i, t)$ 称为下载节点集; $U(i, t)$ 称为上传节点集. 略去时间的影响, 可以分别简记为 $D(i)$ 和 $U(i)$.

根据节点上传带宽的不同将节点分类. 不失一般性, 本文将节点分为 2 类: 高带宽节点 P_h 和低带宽节点 P_l . 所有高带宽节点上传带宽都相同, 所有低带宽节点上传带宽也相同, 节点的下载带宽无限制, 这符合现实的应用, 因为总是认为节点的上传带宽是瓶颈.

根据 BitTorrent 协议, 节点 i 采用下列带宽分配策略为:

- 1) (接受传入) 在时刻 t 节点 i 接受所有 $D(i, t)$ 中的节点传入带宽;
- 2) (平均分配) 在时刻 $t+1$ 从 $D(i, t)$ 中选择 m 个 (在 BitTorrent 中为 4) 向自己提供带宽最大的节点, 将自己的上传带宽分为 $m+1$ 份, 向这 m 个节点每个传送 $1/(m+1)$ 的带宽;
- 3) (随机选择) 在时刻 $t+1$ 随机选择一个节点 (不考虑其传入带宽), 向其传送 $1/(m+1)$ 带宽.

为了讨论方便, 假设系统中的节点均匀分布. 设系统中高带宽节点个数为 N_h , 低带宽节点个数为 N_l , $N = N_h + N_l$, 这样高带宽节点通过一个随机连接找到一个高带宽节点的概率为 $p = N_h/N$, 找到一个低带宽节点的概率为 $q = N_l/N$. 同理, 高带宽节点被一个高带宽节点通过一个随机连接找到和被一个低带宽节点通过一个随机连接找到的概率也分别为 p 和 q , $p + q = 1$.

根据上述带宽分配过程, $U(i, t)$ 将影响 $D(i, t+1)$, 而 $D(i, t+1)$ 又影响 $U(i, t+2)$, 其依赖关系如图 1 所示. 由于带宽分配过程中引入的随机性, 可用马尔可夫过程对这些依赖关系进行数学分析. 根据图 1 可以看出, $\{U(i, 1), U(i, 3), U(i, 5), \dots\}$, $\{U(i, 2), U(i, 4), U(i, 6), \dots\}$ 分别形成马尔可夫过程, 并且其规律类似.

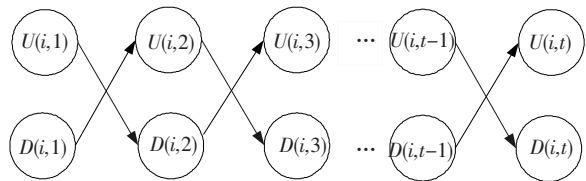


图1 节点上传节点集合之间的依赖关系

定义2 定义 $O_i(m, n, t)$ 为节点 i 在时刻 t 的上传状态, 其中: m, n 分别为 $U(i, t)$ 中高带宽节点个数和低带宽节点个数, m 和 n 都为非负整数且 $m + n = 5$. 当大部分高带宽节点的 m 接近于

5 时, 称为高带宽节点聚类; 当大部分低带宽节点的 n 接近于 5 时, 称为低带宽节点聚类.

根据 Tit-For-Tat 协议, 节点 i 上传并不考虑具体的时刻, 因此在分析时可以忽略 t , 即只分析 $O_i(m, n)$ 的变化规律即可. 因为 $m + n = 5$, 所以 $O_i(m, n)$ 形成的状态空间为 $\{O_i(0, 5), O_i(1, 4), O_i(2, 3), O_i(3, 2), O_i(4, 1), O_i(5, 0)\}$, 可以简记为状态 0 ~ 状态 5.

用随机变量 $X_i(i)$ 表示节点 i 在 t 时刻的上传状态, 即 $X_i(i) \in \{O_i(m, n) \mid m + n = 5\}$. 则 $\{X_i; t = 2k, k \text{ 为自然数}\}, \{X_i; t = 2k + 1, k \text{ 为非负整数}\}$ 分别形成马尔可夫过程. 以 $\{X_i; t = 2k + 1, k \text{ 为非负整数}\}$ 为例进行分析, 称该马尔可夫过程的一步转移概率矩阵为 P_i .

2 BitTorrent 激励机制分析

2.1 高带宽节点的转移概率矩阵

定理1 对于高带宽节点 i , 一步转移概率矩阵 P_i 为

$$P_i = \begin{pmatrix} q^2 & 2pq & p^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q^2 & 2pq & p^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q^2 & 2pq & p^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q^2 & 2pq & p^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & p \end{pmatrix} \quad (1)$$

证明 以 p_{22} 为例. 即当时刻 t 节点 i 的上传节点集 $U(i, t)$ 中高低带宽节点个数分别为 2 与 3 时, $U(i, t+2)$ 中高低带宽节点个数仍分别为 2 与 3 的概率. $U(i, t+2)$ 中高低带宽节点个数分别为 2 与 3 包含 2 种情况: 1) 从 $D(i, t+1)$ 中根据 Tit-For-Tat 选择 2 个高带宽节点和 2 个低带宽节点 (该事件用 C_2 表示), 同时随机选择一个低带宽节点 (该事件用 $\bar{R}_h$ 表示); 2) 从 $D(i, t+1)$ 中根据 Tit-For-Tat 选择 1 个高带宽节点和 3 个低带宽节点 (该事件用 C_1 表示), 同时随机选择一个高带宽节点 (该事件用 R_h 表示). 由于 Tit-For-Tat 和随机选择独立, 所以

$$p_{22} = P(C_2 \bar{R}_h) + P(C_1 R_h) = P(C_2)P(\bar{R}_h) + P(C_1)P(R_h) = P(C_2)q + P(C_1)p.$$

因为 $U(i, t)$ 中高低带宽节点个数分别为 2 与 3, 根据 Tit-For-Tat 原则, 这些节点会在 $t+1$ 时刻向高带宽节点进行传输, 因此 $D(i, t+1)$ 中至少有 2 个高带宽节点. 用事件 B 和 C 分别表示 $D(i, t+1)$ 中有 3 个高带宽节点和有 2 个高带宽节点, 出现 B 是因为有高带宽节点随机传了进来, 所以

出现事件 B 的概率 $P(B) = p$. 由于 $D(i, t+1)$ 只出现这 2 种情况, 所以出现事件 $P(C) = q$.

$P(C_2 | B)$ 为 $U(i, t+2)$ 从 $D(i, t+1)$ 中选择 2 个高带宽节点, 而此时 $D(i, t+1)$ 中有 3 个高带宽节点, 根据 Tit-for-Tat 协议, $P(C_2 | B) = 0$. 同理可知 $P(C_2 | C) = 1$. 因此根据全概率公式

$$P(C_2) = P(C_2 | B)P(B) + P(C_2 | C)P(C) = 0 \times p + 1 \times q = q.$$

同理 $P(C_1) = 0$.

所以 $p_{22} = q \times q + 0 \times p = q^2$.

类似可以求解其他状态转移概率, 证毕.

因此针对高带宽节点 i , 其状态转移图如图 2 所示.

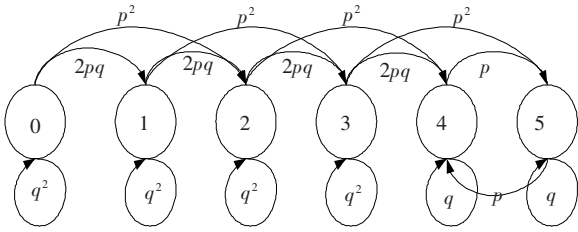


图 2 高带宽节点马尔可夫过程对应的状态转移图

2.2 转移概率矩阵的极限

定理 2 设 $P^{(n)}$ 为 P_i 的 n 步转移概率矩阵, 转移概率矩阵的极限 $P^{(\infty)} = \lim_{n \rightarrow \infty} P^{(n)}$, 那么

$$P^{(\infty)} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & q & p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & p \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q & p \end{pmatrix}. \quad (2)$$

证明 定义 $p_{ij}^{(n)} = P\{X_{m+n} = j | X_m = i\}$ 为马尔可夫过程在时刻 m 处于状态 i 的条件下, 在时刻 $m+n$ 处于状态 j 的概率; $p_{ij}^{(\infty)} = \lim_{n \rightarrow \infty} p_{ij}^{(n)}$, $f_{ij}^{(n)}$ 为从状态 i 出发在时刻 n 首次到达状态 j 的概率.

由于状态 0, 1, 2, 3 是非常返态, 状态 4, 5 是常返态, 因此 $p_{ij}^{(\infty)} = 0$, 其中 $i \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, $j \in \{0, 1, 2, 3\}$. $p_{44}^{(2)} = \sum_{k=0}^5 p_{4k} p_{k4} = q$, 经过归纳得出 $p_{44}^{(n)} = q$, 因此 $\lim_{n \rightarrow \infty} p_{44}^{(n)} = q$, 求解 $p_{14}^{(\infty)}$.

$$\begin{aligned} p_{14}^{(n)} &= \sum_{t=1}^n f_{14}^{(t)} p_{44}^{(n-t)} = \\ &= \sum_{t=1}^N f_{14}^{(t)} p_{44}^{(n-t)} + \sum_{t=N+1}^n f_{14}^{(t)} p_{44}^{(n-t)}, \\ p_{14}^{(\infty)} &= \lim_{n \rightarrow \infty} p_{14}^{(n)} = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^N f_{14}^{(t)} p_{44}^{(n-t)} + \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{t=N+1}^n f_{14}^{(t)} p_{44}^{(n-t)}. \end{aligned}$$

固定 N 后, 整理公式为

$$\begin{aligned} &\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{t=1}^N f_{14}^{(t)} p_{44}^{(n-t)} + \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{t=N+1}^n f_{14}^{(t)} p_{44}^{(n-t)} = \\ &\left(\sum_{t=1}^N f_{14}^{(t)} \right) \lim_{n \rightarrow \infty} p_{44}^{(n-t)} + \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{t=N+1}^n f_{14}^{(t)} p_{44}^{(n-t)} = \\ &\left(\sum_{t=1}^N f_{14}^{(t)} \right) p_{44}^{(\infty)} + \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{t=N+1}^n f_{14}^{(t)} p_{44}^{(n-t)}. \end{aligned}$$

再令 $N \rightarrow \infty$, 而 $\lim_{N \rightarrow \infty} \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{t=N+1}^n f_{14}^{(t)} p_{44}^{(n-t)} = 0$, 所

以 $p_{14}^{(\infty)} = \left(\sum_{t=1}^{\infty} f_{14}^{(t)} \right) p_{44}^{(\infty)}$. 而 $\sum_{t=1}^{\infty} f_{14}^{(t)}$ 为从状态 1 ~ 状态 4 的概率, 其值为 1, 因此 $p_{14}^{(\infty)} = p_{44}^{(\infty)} = q$.

同理可以求得 $P^{(\infty)}$ 中的其他项. 证毕.

2.3 高带宽节点聚类

定理 3 高带宽节点马尔可夫过程的极限分布 $\pi = (0, 0, 0, 0, q, p)$, 且与初始分布无关.

证明 设系统中高带宽节点上传状态的初始分布 $\pi_0 = (v_0, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5)$, 其极限分布为 π , 那么

$$\pi = \pi_0 \times P^{(\infty)}.$$

代入式(2)求得极限分布 $\pi = (0, 0, 0, 0, q, p)$, 且与初始分布无关, 证毕.

定理 4 Tit-For-Tat 会导致系统中的节点按照带宽聚类.

证明 由定理 3 可知, 最终高带宽节点选择高带宽节点进行传输. 根据 Tit-For-Tat 原则, 低带宽节点也不向高带宽节点传输, 因此低带宽节点聚类, 证毕.

3 动态调整参数 p

3.1 参数 p 与到达聚合状态所需步数关系

令 $m(i)$ 为从非常返状态 $i, i \in \{0, 1, 2, 3\}$ 出发首次到达常返状态 $j, j \in \{4, 5\}$ 的平均步数, 根据马尔可夫过程中的相关定理, 可知 $m(0), m(1), m(2), m(3)$ 满足关系为

$$\begin{pmatrix} q^2 & 2pq & p^2 & 0 \\ 0 & q^2 & 2pq & p^2 \\ 0 & 0 & q^2 & 2pq \\ 0 & 0 & 0 & q^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m(0) \\ m(1) \\ m(2) \\ m(3) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m(0) \\ m(1) \\ m(2) \\ m(3) \end{pmatrix}.$$

根据上式可以分别求得 $m(0), m(1), m(2), m(3)$.

3.2 参数 p 对系统的影响

3.2.1 增大 p 对搭便车者的影响

随着 p 的增大, 高带宽节点从任何状态出发到达状态 4 或 5 的速度也增大. 因此当 p 值增大时, 高带宽节点可以更快实现聚类.

当系统处于聚类时, 此时所有高带宽节点根

据 TFT 规则向低带宽节点传送的带宽为 0, 根据乐观疏通向低带宽节点传送的带宽与 p 值相关. 增大 p 可以减少高带宽节点向低带宽节点传送的带宽. 此时高带宽节点选择传送的节点更多的是高带宽节点, 低带宽节点和搭便车者获得的带宽减少. 因此增大 p 值, 会使搭便车者下载带宽减少.

3.2.2 增大 p 对文件传输的影响

随着 p 的增大, 高低带宽之间的连接显著减少. 此时文件块由高带宽节点向低带宽节点传输速度会明显降低, 不利于文件在高低带宽节点之间传输. 特别是当高带宽节点拥有完整的文件, 而此时系统中没有种子节点时, 随着高带宽节点下载完文件而离开, 有可能使低带宽节点得不到完整的文件.

3.2.3 p 值对种子节点的影响

随着 p 的增大, 高低带宽节点之间的连接减少, 那么低带宽所需的文件块将大部分由种子节点传输, 此时会加重种子节点的负载.

由上述分析可知, 需要动态调整 p 值.

3.3 动态调整 p 值

现有 BitTorrent 网络都是通过 Tracker 随机向节点返回一些节点作为自己的邻居节点, p 值是随机的. 根据上述分析, p 会对系统性能产生很大影响. 为了能够适应需要, 本文认为 BitTorrent 网络需要进行动态调整 p 值, 而不是完全随机.

根据以上分析, 给出 Tracker 协议为:

- 1) 计算种子节点的负载;
- 2) 如果种子负载 $> M$, 那么减小 p 值 ($p \leftarrow p - 0.1$);
- 3) 如果种子负载 $< M$, 那么增大 p 值 ($p \leftarrow p + 0.1$);
- 4) 根据 p 值, 向节点返回相应类型的节点.

4 实验验证

为验证上述理论分析结果, 本文用 Netlogo 模拟大规模 BitTorrent 中节点之间的交互过程. Netlogo 是人工智能领域中流行的多智能体仿真软件, 可对节点的行为进行快速仿真. 在本文的模拟试验中, 节点分为高带宽节点和低带宽节点 2 类. 每个节点都带有一个上传列表与一个下载列表, 初始设置时 2 个列表中的节点都是随机获得的. 然后以轮为单位进行文件传输模拟, 每经过一轮交互后, 节点都根据 Tit-For-Tat 协议更新自己的上传列表和下载列表. 本文对 1 000 个节点形成的 BitTorrent 网络进行模拟, 文件传输的大小为

20 M, 设置一个种子节点, 通过设置高低带宽节点的个数来实现参数 p 的调节, 进而观察节点聚类情况.

本实验主要观测的参数为: NH_{avg} , NL_{avg} . 其中: NH_{avg} 为每个高带宽节点连接高带宽节点个数的均值, 当 NH_{avg} 接近于 5 时, 表明所有高带宽节点实现了聚类; NL_{avg} 为每个低带宽节点连接低带宽节点个数的均值. 当 NL_{avg} 接近于 5 时, 表明所有低带宽节点实现了聚类.

4.1 初始状态对高带宽节点聚类的影响

在本实验中设置相同的 p , 观察初始状态对高带宽节点聚类的影响. 实验结果如图 3 所示, 结果表明从不同初始状态出发, 系统最终所处状态相同, 而且高带宽节点从初始状态 1 高 4 低状态出发比从 0 高 5 低出发更快的到达聚类, 这说明初始状态会影响系统到达聚类的速度. 但是不论初始状态如何, 最后都达到聚类. 注意到并没有完全聚类到 4 高 1 低, 这主要是因为高带宽节点可能被多个高带宽节点选择, 就会引起震荡.

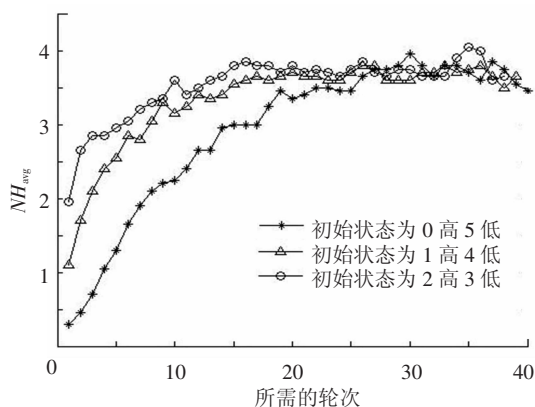


图3 初始状态对高带宽节点聚类的影响

4.2 p 值对高带宽节点聚类速度的影响

在本实验中设置相同的初始状态, 观察 p 值对高带宽节点聚类的影响, 实验结果如图 4 所示. 结果表明: p 值对聚类速度的影响显著, p 值越大, 聚类速度越快. 随着 p 值的增大, NH_{avg} 也增大, 这是因为每个高带宽节点随机找到一个高带宽节点的概率增大.

从实验 1 和实验 2 可以看出, 不论从任何初始状态出发, 也不论 p 值如何, 节点最后都将聚类.

4.3 低带宽节点的聚类

本实验观察了 NL_{avg} 的变化情况, 实验如图 5 所示, 开始时低带宽节点向高带宽节点进行传输. 但在后面的几轮高带宽不再向低带宽节点传输, 那么低带宽节点也不再向高带宽节点传输. 另外, 低带宽节点的 NL_{avg} 收敛于 3.5 左右. 这主要是因为当有高带宽连接低带宽节点时, 低带宽节

点会选择高带宽连接, 因此高低带宽之间的连接使得低带宽节点之间的聚类比较少, 但是低带宽节点绝大部分连的是低带宽节点, 因此震荡并不明显。

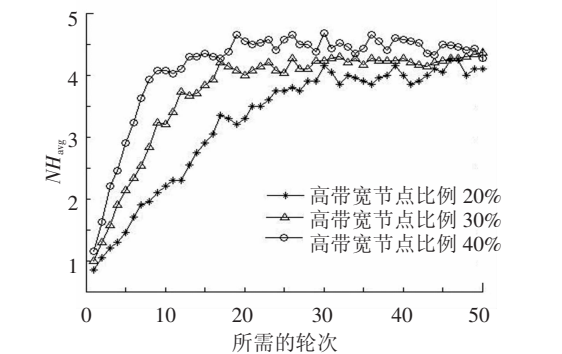


图 4 p 值对高带宽节点聚类的影响

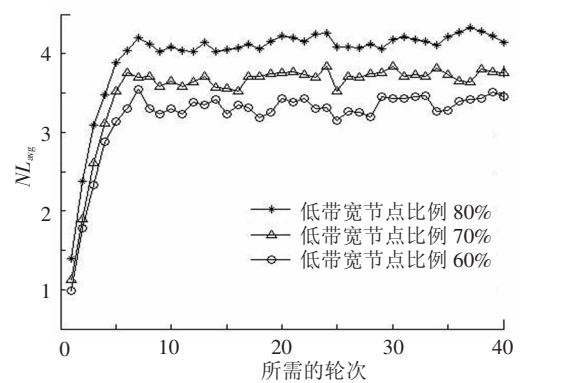


图 5 低带宽节点聚类

4.4 动态调整 p 值

本实验观察动态调整 p 值对种子节点负载的影响. 从图 6 中可以观察随机选择随着低带宽节点数增加, 种子节点的负载显著增加, 而动态调整使得种子节点负载增加并不明显. 这是因为种子节点的负载被高带宽节点所分担, 因此通过动态调整可以显著降低种子节点负载.

总之, 上述实验结果和理论分析结果一致, 验证了理论分析结果的正确性.

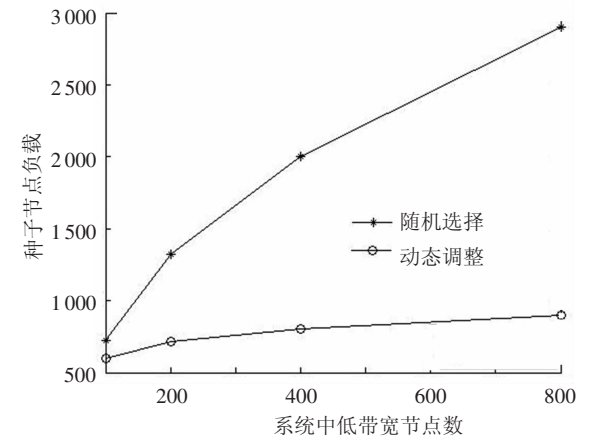


图 6 随机选择与动态调整的比较

5 结 论

1) 使用马尔可夫过程对激励机制建模符合激励机制的实际运行过程.

2) 通过对转移概率矩阵的分析, 可以得出参数 p 对运行过程的影响: 当 p 增大时, 聚类速度变快, 减小时聚类速度变慢.

3) 通过调整参数 p 可以改变激励机制的运行过程.

参考文献:

[1] PARKER A. The true picture of Peer-to-Peer file sharing[EB/OL]. (2004) <http://www.cachelogic.com>.

[2] Ipoque. internet-study-2007[EB/OL]. (2009) <http://www.ipoque.com/resources/internet-studies/internet-study-2007>.

[3] COHEN B. Incentives build robustness in BitTorrent [C]//Proceedings of Workshop on Economics of Peer-to-Peer Systems. New York, NY: ACM, 2003:251 - 260.

[4] QIU D Y, SRIKANT R. Modeling and performance analysis of BitTorrent-Like Peer-to-Peer networks [C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2004 Conference on Data Communication. New York, NY: ACM, 2004:367 - 378.

[5] LEVIN D, LACURTS K, SPRING N, et al. BitTorrent is an auction: Analyzing and improving bittorrent's incentives [C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2008 Conference on Data Communication. New York, NY: ACM, 2008: 243 - 254.

[6] 余一娇, 金海. 对等网络中的搭便车行为分析与抑制机制综述[J]. 计算机学报, 2008, 31(1): 1 - 15.

[7] LEGOUT A, LIOGKAS N, KOHLER E, et al. Clustering and sharing incentives in BitTorrent systems [C]//Proceedings of the 2007 ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York, NY: ACM, 2007: 301 - 312.

[8] LIOGKAS N, NELSON R, KOHLER E, et al. Exploiting BitTorrent For Fun (But Not Profit) [C]//Proceedings of the IPTPS 2006. Santa Barbara: Springer Verlag, 2006.

[9] SIRIVIANOS M, PARK J H, CHEN R, et al. Free-riding in BitTorrent networks with the large view exploit [C]//Proceedings of the IPTPS 2007. Bellevue Way: Springer Verlag, 2007.

(编辑 张 红)