

基于在线概率的 P2P 网络系统动力学模型^①

王继奎, 殷保群

(中国科学技术大学 自动化系, 合肥 230027)
通讯作者: 殷保群, E-mail: bqyin@ustc.edu.cn

摘要: 为了更好地刻画 P2P 文件共享系统中节点行为的随机性, 提出了一种基于在线概率的动力学模型. 首先, 引入节点的在线概率来刻画节点行为的随机性, 并通过分析系统中节点之间交互演化的过程, 建立了基于在线概率的动力学模型. 然后, 通过对模型的分析, 研究了影响系统演化的多个因素, 这主要通过对相关算法的具体形式分析来体现. 之后, 对算法进行改进, 提出了基于在线概率的节点选择算法、带宽分配算法与节点阻塞算法. 最后, 通过仿真实验对模型进行了验证和分析.

关键词: P2P 文件共享系统; 在线概率; 算法; 动力学模型

引用格式: 王继奎, 殷保群. 基于在线概率的 P2P 网络系统动力学模型. 计算机系统应用, 2018, 27(2): 85-90. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6173.html>

Dynamic Model of P2P Network Systems Based on Online-Probability

WANG Ji-Kui, YIN Bao-Qun

(Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In order to accurately depict the randomness of the node behavior of the P2P file-sharing systems, a dynamic model of the P2P file-sharing systems based on the online-probability is proposed. Firstly, we introduce the online-probability of the nodes and analyze the process of the evolution of the systems. Furthermore, we propose a dynamic model of P2P file-sharing systems based on the online-probability. Through the model, the factors that influence the system are studied. These factors are embodied in the central policies of the system. The relevant algorithms of the dynamic model of the P2P file-sharing systems is improved. The relevant algorithms based on the online-probability are proposed. These policies include peer selection policy, bandwidth allocation policy and peer choking policy. Finally, some experiments are carried out to validate the model.

Key words: P2P file-sharing system; online-probability; algorithm; dynamic modeling

随着计算机网络的快速发展, 人们对各种信息、服务以及资源获取的要求变得越来越高. 传统基于 C/S 架构的应用由于采用的是集中式的结构, 使客户端承担着网络拥堵所产生的巨大风险. 为了改善这种问题, 研究人员提出了 P2P 技术, 通过 Internet 网络, 把加入到网络中的各个节点连接起来, 实现节点之间资源、服务和信息的共享. P2P 文件共享系统中的节点

不仅可以向其它节点请求文件, 也可以在本地存储文件并为其它节点提供相关服务. 从微观的角度来看, 系统中节点从其它节点获取所需文件的过程就是该节点与其它节点的交互过程. P2P 文件共享系统中影响节点之间交互过程的算法有很多, 主要有节点选择算法、带宽分配算法、文件阻塞算法等.

以 P2P 文件共享系统和流媒体服务系统为代表的

^① 基金项目: 国家自然科学基金 (61233003, 61174124)

收稿时间: 2017-04-24; 修改时间: 2017-05-11; 采用时间: 2017-05-16

网络服务系统的流行使得 P2P 网络的研究工作越来越热, 针对 P2P 网络的研究主要包括基于实际测量流量数据和用户数据的研究方法和基于模型的研究方法. 很多学者基于实际测量的网络数据以及系统用户日志等用户数据, 对 P2P 文件共享系统中的用户行为特征进行分析, 建立基于用户行为的系统模型. Feng QY 等人通过分析 MAZE 系统的用户日志, 对加入系统中用户节点的重下载、文件审查、文件删除以及搭便车行为进行建模, 并分析了用户节点行为特征的统计规律^[1]. 山秀明等人以 P2P 文件共享系统中用户节点所拥有的共享文件数量为主要参数, 建立了用户共享行为的复杂网络演化模型, 研究了 P2P 网络中不同的用户节点在文件共享行为上的差异^[2]. 还有一些学者通过对系统演化过程的分析, 建立系统的数学模型, 进而对系统的演化规律进行研究. Qiu DY 等人提出了一个 BT 系统的流体模型, 从宏观角度分析系统中节点数目的演化过程和不同因素对系统的影响, 但没有考虑系统中各个节点状态的变化^[3]. Yin BQ 等人提出了一个 P2P 媒体分发网络的动力学模型, 并且分析了节点选择算法和带宽分配算法对系统的影响^[4,5]. 不同于文献[3], 文献[4,5]是从微观角度对 P2P 文件共享系统进行研究的.

这些研究工作大多是对系统中用户日志和网络测量数据进行总结, 分析用户行为的统计规律, 建立系统的用户行为模型; 或通过对系统演化过程进行分析, 建立系统的动力学模型, 并没有将用户行为的统计规律和系统演化统一起来, 因此研究结果的适应性较差. 实际上, 系统中用户行为和系统演化过程是交互影响、不可分割的整体, 应该将两者统一起来进行研究. 本文将系统中用户行为的统计规律和 P2P 文件共享系统的结构以及相关的算法结合起来研究, 提出了一种基于在线概率的动力学模型来研究 P2P 文件共享系统的演化过程.

由于系统中用户行为的随机性以及其它的随机因素的影响, 节点加入和退出网络的行为同样是随机的, 为了更好地刻画节点行为的随机性, 本文引入了节点的在线概率, 然后, 从微观的角度研究了系统中节点之间文件的传输过程, 并以节点待发送的数据量为状态变量, 建立了基于在线概率的动力学模型. 在此基础上, 分析了节点选择算法、带宽分配算法与节点阻塞算法的具体形式, 并对算法进行改进, 提出了基于在线概率的节点选择算法、带宽分配算法与节点阻塞算法. 最

后通过仿真实验对模型的正确性进行了验证, 并分析了在线概率对系统演化过程的影响.

1 动力学模型

系统中节点通过 P2P 文件共享系统向其它节点发起文件下载请求. 其它节点在收到该节点发出的请求之后, 根据既定的策略为其分配上传带宽. 系统中每个节点从其它节点下载所需文件的同时也为这些节点分配上传带宽.

为了增加模型的拓展性, 简化研究工作, 我们对系统做了一些必要的假设: 节点上线和下线的流量变化过程持续的时间可以忽略不计; 系统下载带宽远大于上传带宽, 也就是影响节点下载速度的瓶颈为节点的上传带宽; 忽略节点之间握手信息的流量以及时间延迟. 模型中定义了以下参数:

N 表示系统中在线的用户节点数目. 由于我们引入了在线概率, 所以系统的拓扑结构是稳定的;

$p_i(t)$ 表示 t 时刻系统中用户节点 i 的在线概率, 其中, $0 \leq p_i(t) \leq 1$;

$x_i(t)$ 表示 t 时刻节点 i 收到请求但还没有发送出去的数据量, 为 t 时刻节点 i 的状态量;

M 表示系统中文件片的数目;

c_i 表示节点 i 的上传带宽;

D_m 表示编号为 m 的文件片的大小;

$p_{mi}(t)$ 表示 t 时刻节点 i 是否拥有第 m 个文件片, 当节点 i 存储第 m 个文件片时, $p_{mi}(t)=1$, 否则 $p_{mi}(t)=0$;

$P(t)$ 表示 t 时刻系统的文件存储矩阵, 其中, $P(t) = [p_{mi}(t)]$;

$q_{ij}(t)$ 表示 t 时刻系统中节点 i 和节点 j 之间的连接关系. 当节点 j 向节点 i 发出下载请求, 并且节点 i 还没有发完节点 j 请求的文件时, $q_{ij}(t)=1$; 当节点 i 已经将节点 j 请求的数据发送完成或者节点 j 没有向节点 i 发出下载请求时, $q_{ij}(t)=0$;

$Q(t)$ 表示 t 时刻系统中节点之间的连接关系矩阵, $Q(t) = [q_{ij}(t)]$;

N_{cap} 表示系统中每个节点最多可以服务的节点数目;

N_{req} 表示单个节点单位时间内可以向其它节点请求的文件片的最大数目.

下面介绍基于在线概率的 P2P 网络系统的一般模型.

函数 $f_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q, p_i, c_i)$ 表示 t 时刻节点 i 分配给

节点 j 的上传带宽,反映了节点的带宽分配算法;

函数 $k_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q)$ 表示 t 时刻节点 i 对来自节点 j 的文件下载请求的态度,如果节点 i 不想为节点 j 分配上传带宽,则会拒绝来自节点 j 的文件下载请求,反映的是节点阻塞算法;

函数 $\alpha_{im}(P, N_{req})$ 表示 t 时刻节点 i 对文件片 m 的请求情况;

函数 $h_m^{ij}(x_1, \dots, x_n, \alpha_{im}(P, N_{req}), p_j)$ 表示 t 时刻节点 i 向节点 j 发出的关于文件片 m 的文件下载请求,反映了节点选择算法;

函数 $f_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q, p_i, c_i) \times k_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q)$ 表示在考虑节点阻塞算法的情况下, t 时刻节点 i 分配给节点 j 的上传带宽;

函数 $\sum_{j=1, j \neq i}^N f_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q, p_i, c_i) \times k_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q)$ 表示在考虑节点阻塞算法的情况下, t 时刻节点 i 分配给系统中其它节点的总上传带宽,是 $x_i(t)$ 的减少率。

函数 $\sum_{m=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^N h_m^{ij}(x_1, \dots, x_n, \alpha_{im}(P, N_{req}), p_j) \times D_m$ 表示 t 时刻节点 i 收到的其它节点请求的下载文件量,是状态 $x_i(t)$ 的增加率。

通过以上的分析,我们得到系统动力学模型微分方程的一般形式为:

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^N h_m^{ij}(x_1, \dots, x_n, \alpha_{im}(P, N_{req}), p_j) \times D_m - \sum_{j=1, j \neq i}^N f_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q, p_i, c_i) \times k_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q) \quad (1)$$

通过上述方程可以知道节点的状态演变过程是由节点的带宽分配算法、节点选择算法、节点阻塞算法共同决定的。当我们确定了这些算法的具体形式,我们就得到了动力学方程的具体形式。然后通过对得到的具体的动力学模型进行实验仿真,就可以分析 P2P 文件系统中相关参数的演变,验证系统模型的正确性。

2 模型分析

根据上面的讨论,我们得到了基于在线概率的 P2P 网络系统动力学模型的一般形式,下面我们将根据具体的算法,对 P2P 文件共享系统进行分析,并给出基于在线概率的改进算法。

2.1 带宽分配算法

带宽分配算法就是源节点将上传带宽按照某种策

略分配给那些向它请求文件的节点。

2.1.1 基准算法

一种简单地带宽分配算法就是将源节点的上传带宽平均分配给所有向该节点发出文件请求的节点。此时,我们得到等概率的带宽分配算法的表达式如式 (2)。

$$f_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q, c_i, p_j) = \begin{cases} \frac{q_{ij}c_i}{\sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in}}, & \sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in} > 0, \\ 0, & \sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in}$ 表示向源节点 i 发出文件请求但是还没有获取到所请求的文件片的用户节点数。

2.1.2 改进算法

我们考虑节点行为的随机性,不同的用户节点的在线概率是不同的。在线概率越大的用户节点应该获得更多的上传带宽。此时,我们得到基于在线概率的带宽分配算法的表达式如式 (3)。

$$f_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q, c_i, p_j) = \begin{cases} \frac{q_{ij}p_jc_i}{\sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in}p_j}, & \sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in} > 0 \\ 0, & \sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 节点阻塞算法

节点阻塞算法就是当向源节点发出文件请求的用户节点数超出源节点服务能力的时候,源节点将按照某种策略为其中部分节点提供服务,拒绝其它节点所发出的文件下载请求。

2.2.1 基准算法

一种简单的节点阻塞算法是每个发出请求的节点都有相同的概率获得源节点提供的服务。此时,我们得到等概率的节点阻塞算法的表达式如式 (4)。

$$k_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q) = \begin{cases} \frac{q_{ij}N_{cap}}{\sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in}}, & \sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in} > N_{cap} \\ q_{ij}, & \sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in} \leq N_{cap} \end{cases} \quad (4)$$

2.2.2 改进算法

我们考虑节点行为的随机性,源节点会对那些对自己价值更大的节点也就是在线概率大的节点更加积极,会优先满足这些节点的文件请求,而对于那些对自己价值小的节点,则会拒绝为其分配上传带宽。此时,我们得到基于在线概率的节点阻塞算法的表达式如

式(5).

$$k_{ij}(x_1, \dots, x_n, Q) = \begin{cases} \frac{q_{ij}N_{cap}p_j}{\sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in}p_j}, & \sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in} > N_{cap} \\ q_{ij}, & \sum_{n=1, n \neq i}^N q_{in} \leq N_{cap} \end{cases} \quad (5)$$

2.3 节点选择算法

节点选择算法就是节点会根据服务器所返回的拥有所需文件片的节点列表,按照某种策略选择源节点发出文件片下载请求。

2.3.1 基准算法

一种简单地节点选择算法就是有文件片下载需求的节点以相同的概率向返回列表中的所有节点发出文件请求.此时,我们得到等概率的节点选择算法的表达式如式(6).

$$h_m^{ij}(x_1, \dots, x_n, \alpha_{im}(P, N_{req}), p_j) = \begin{cases} \frac{p_{mi}\alpha_{im}(P, N_{req})}{\sum_{n=1, n \neq i}^N p_{mn}}, & \sum_{n=1, n \neq i}^N p_{mn} > 0, \\ 0, & \sum_{n=1, n \neq i}^N p_{mn} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

2.3.2 改进算法

节点在选择源节点时会优先选择在线概率大的节点作为文件服务的提供者,这样可以减少因源节点在文件传输过程中退出系统而导致传输中断,减少用户节点重新向其它节点发起文件请求所引起的网络抖动.此时,我们得到基于在线概率的节点选择算法的表达式如式(7).

$$h_m^{ij}(x_1, \dots, x_n, \alpha_{im}(P, N_{req}), p_j) = \begin{cases} \frac{p_{mi}\alpha_{im}(P(t), N_{req})p_i}{\sum_{n=1, n \neq i}^N p_{mn}}, & \sum_{n=1, n \neq i}^N p_{mn} > 0, \\ 0, & \sum_{n=1, n \neq i}^N p_{mn} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

根据文献[6]中提出的同ISP节点优先选择算法,我们对上述算法做出改进,此时,算法的表达式如式(8).

$$h_m^{ij}(x_1, \dots, x_n, \alpha_{im}(P, N_{req}), p_j) = \begin{cases} \frac{p_{mj}\alpha_{im}(P, N_{req})p_j I(i, j)}{\sum_{n=1, n \neq i}^N p_{mn} p_i I(i, j)}, & \sum_{n=1, n \neq i}^N I(i, n) p_{mn} > 0, \\ \frac{p_{mj} p_j \alpha_{im}(P, N_{req})}{\sum_{n=1, n \neq i}^N p_{mn} p_j}, & \sum_{n=1, n \neq i}^N I(i, n) p_{mn} = 0, \sum_{n=1, n \neq i}^N p_{mn} \neq 0, \\ 0, & \sum_{n=1, n \neq i}^N I(i, n) p_{mn} = 0, \sum_{n=1, n \neq i}^N p_{mn} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

其中, $I(i, j) = 1$ 表示两节点处于同一个ISP网络中, $I(i, j) = 0$ 表示两个节点不处于同一个ISP网络中。

3 实验及分析

本节通过两组仿真对基于节点在线概率的动力学模型进行分析.首先对采用等概率算法的动力学模型和在线概率算法的动力学模型进行仿真,通过对比节点状态演化曲线来验证基于在线概率的动力学模型正确性.然后对在线概率服从不同正态分布的系统动力学模型进行仿真,分析在线概率变化对系统演化过程的影响。

3.1 模型验证

假设系统拥有10个节点,分别用PN1, ..., PN10来表示;系统中有30个文件片,我们把这30个文件片均存储在PN1上;文件片的大小为20KB;节点的上传带宽均为100KB/s;我们规定,每个节点每时刻只能向其它节点请求2个文件片.实验一中采用等概率的算法,实验二中采用基于在线概率的算法,并且节点的在线概率服从正态分布 $N(0, 0.81)$,实验中采用的算法如表1所示。

表1 实验中采用的算法

	节点选择算法	带宽分配算法	节点阻塞算法
实验一	等概率算法	等概率算法	等概率算法
实验二	在线概率算法	在线概率算法	在线概率算法

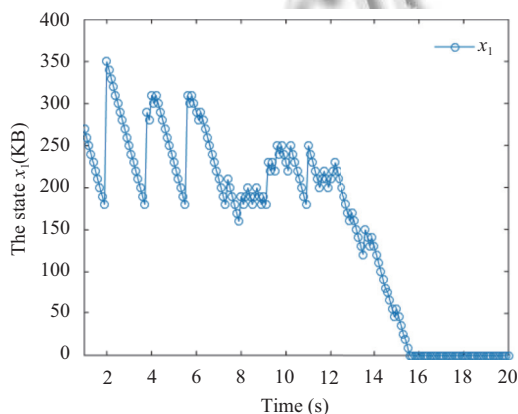


图1 实验一中节点PN1状态演化曲线

如图1所示,实验一中PN1的文件传输过程在16s之前就已经结束了,其余节点的文件传输也均在16s之前完成(见图2及图3).从图4至图6中可以看出,在基于在线概率算法的动力学模型中,节点PN1的文件传输过程一直持续到仿真结束.节点PN2在仿真时间内没有完成文件的传输.因为实验一中各节点是一

直处于在线状态的,也就是节点的在线概率均为1,而实验二中各节点的在线概率是满足正态分布的随机数,均小于1.所以,与实验一相比,实验二中的节点完成文件传输所需的时间更长.对比实验一和实验二中对对应状态演化曲线,可以看出与实验一相比,实验二中相应节点的状态演化曲线抖动更厉害.这是由于实验二是基于在线概率的算法进行文件传输的,当系统中某一节点的在线概率较小时,该节点在线的时间就比较短,在该节点在线状态结束后,向其发出文件片请求的节点需要

对比得到的节点状态演化曲线,分析在线概率大小对系统文件传输过程的影响.

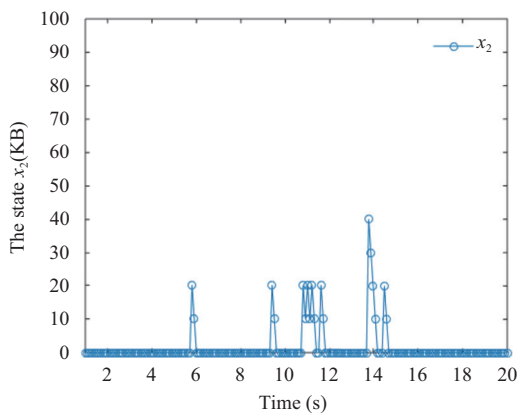


图2 实验一中节点 PN2 状态演化曲线

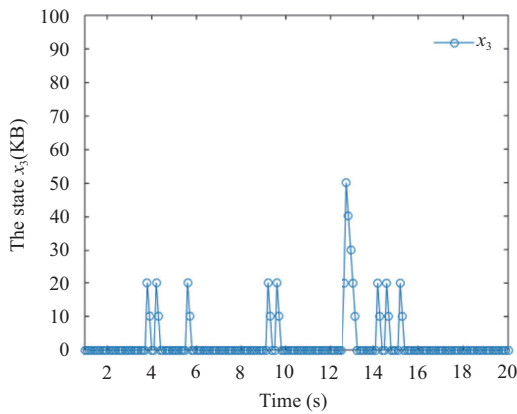


图3 实验一中节点 PN3 状态演化曲线

重新寻找新的节点发起文件请求,这导致基于在线概率的动力学模型中各节点的状态演化曲线抖动更厉害,从而我们验证了基于在线概率动力学模型的正确性.

3.2 在线概率对系统演化的影响

在上面仿真的基础上,我们通过对系统中节点在线概率服从不同正态分布所对应的动力学模型进行仿真,得到文件传输过程中各节点的状态演化曲线,通过

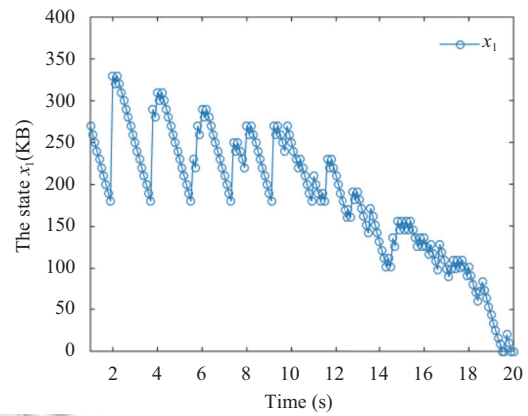


图4 实验二中节点 PN1 状态演化曲线

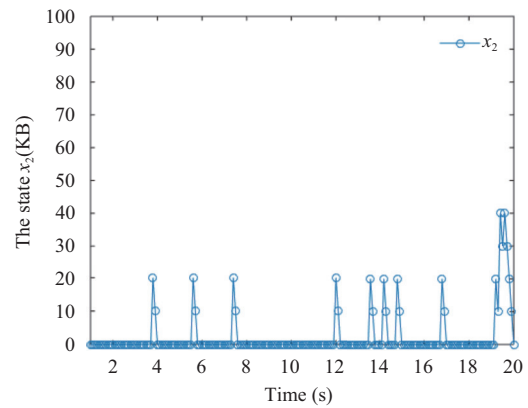


图5 实验二中节点 PN2 状态演化曲线

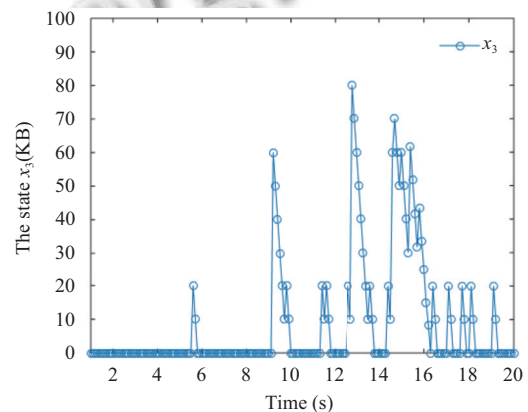


图6 实验二中节点 PN3 状态演化曲线

假设实验三中系统节点的在线概率服从正态分布 $N(0, 0.64)$, 其余参数同实验二. 仿真结果如图7至图9所示. 从图7至图9中可以看出, 实验三中节点 PN1, PN2, PN3, 在仿真时间内均没有完成文件的传输. 对比

实验二和实验三中对应节点的状态演化曲线,可以看出实验二中曲线的抖动频次更大,因为实验二和实验三相比,系统中节点的在线概率更小,节点的在线时长更短,系统中节点重新向其它节点发起文件请求的频率更高,系统中文件传输过程持续的时间更长。

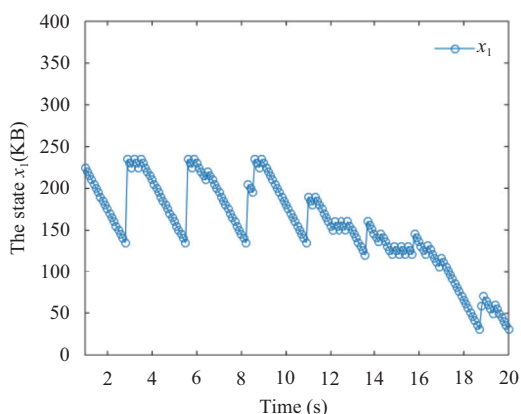


图7 实验三中节点PN1状态演化曲线

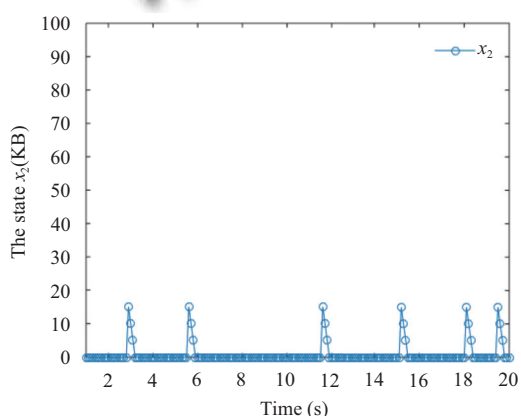


图8 实验三中节点PN2状态演化曲线

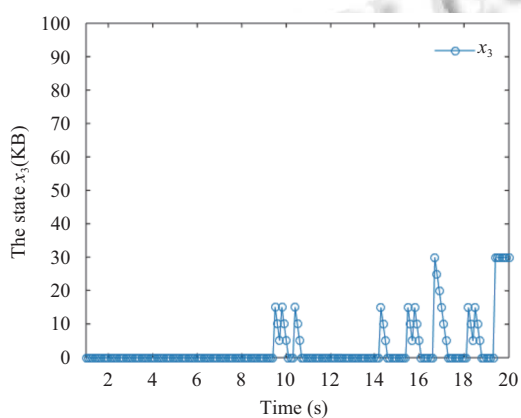


图9 实验三中节点PN3状态演化曲线

在文件传输的过程中,节点在线概率越小,那么向这个节点发出文件请求的节点需要更换源节点的概率越大,对应的节点状态演化曲线的抖动越厉害,完成文件传输所需的时间越长。

4 结语

本文将P2P文件共享系统中用户行为的统计规律和系统的结构结合起来分析,并引入在线概率,建立了基于在线概率的动力学模型。该模型很好的刻画了系统中节点行为的随机性,对实际环境的描述更加准确,更加接近实际系统。本文对系统的节点选择算法、带宽分配算法以及节点阻塞算法进行研究,并提出了基于在线概率的节点选择算法、带宽分配算法以及节点阻塞算法。最后通过仿真实验,验证了基于在线概率动力学模型的正确性,并对比分析了在线概率大小对系统演化过程的影响。该模型为研究P2P系统提供了一个更为有效的方法。

参考文献

- 1 Feng QY, Wu Y, Sun Y, *et al.* User behavior modeling in peer-to-peer file sharing networks: Dissecting download and removal actions. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Taipei, China. 2009. 3477-3480.
- 2 山秀明, 刘旸, 张林, 等. P2P应用系统用户共享行为的复杂网络模型. 计算机应用研究, 2008, 25(6): 1853-1855.
- 3 Qiu DY, Srikant R. Modeling and performance analysis of BitTorrent-like peer-to-peer networks. ACM SIGCOMM Computer Communication, 2004, 34(4): 367-378. [doi: 10.1145/1030194]
- 4 Yin BQ, Guo D, Huang J, *et al.* Modeling and analysis for the P2P-based media delivery network. Mathematical and Computer Modelling, 2012, 55(3-4): 1529-1539. [doi: 10.1016/j.mcm.2011.10.043]
- 5 Zhang HP, Yin BQ, Lu XN. A dynamic model of BitTorrent-like P2P file-sharing system. 2012 31st Chinese Control Conference (CCC). Hefei, China. 2012. 5513-5517.
- 6 Bindal R, Cao P, Chan W, *et al.* Improving traffic locality in BitTorrent via biased neighbor selection. Proceedings 26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. Lisboa, Portugal. 2006. 66-76.