

P2P 文件共享系统行为特性模型分析*

陈宝钢¹, 许勇², 胡金龙²

(1. 河南农业大学 信息与管理科学学院, 郑州 450002; 2. 华南理工大学 广东省计算机网络重点实验室, 广州 510641)

摘要: 由于 P2P 文件共享系统具有自组织的特点, 其行为特性很大程度上影响了系统可靠性和性能。为了解这种性质, 利用统计方法研究了 Maze 系统用户行为特性分布模型及特点。结论表明, 用户上传流量和下载流量、上传带宽和下载带宽可以使用对数正态混合分布来描述, 活跃时间和传输时间可以使用对数正态分布来拟合, 而请求次数和被请求次数可以使用指数分布和 Pareto 分布的混合分布来表达。

关键词: P2P 文件共享系统; Maze; 行为特性; 模型; 混合分布

中图分类号: TP393.07 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)05-1842-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.064

Modeling and analysis on behavioral characteristics of P2P file-sharing system

CHEN Bao-gang¹, XU Yong², HU Jin-long²

(1. College of Information & Management Science, Henan Agriculture University, Zhengzhou 450002, China; 2. Communication & Computer Network Laboratory of Guangdong Province, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Due to the properties of self-organization, behavior characteristics affect the reliability and performance in P2P file-sharing system significantly. In order to understand this nature, this paper investigated properties and distribution model of users' behavior characteristics in MAZE system through statistical methods. And the results indicate that upload and download traffic, upload and download bandwidth of users' can be modeled by lognormal mixture distribution; active time and transmission time of users' can be fitted using the lognormal distribution; while the number of requests and the requested number of users' are modeled by the mixed exponential distribution and Pareto distribution.

Key words: P2P file-sharing system; Maze; behavior characteristics; models; mixture distributions

0 引言

文件共享是目前 Internet 上最主要、最成功的 P2P 应用, 且该应用已经成为当今互联网流量的重要组成部分^[1]。在 P2P 文件共享系统中, 参与的节点以自组织的方式建立 P2P 网络。由于节点参与的随意性和自发性, P2P 文件共享系统中必然会表现出许多与用户的社会行为有关的特点, 如 Churn^[2]、Pollution^[3]等特性。因此, 研究 P2P 文件共享系统的行为特性有助于深入了解 P2P 文件共享系统, 并可以从中获得 P2P 文件共享系统的性能和属性等各方面的特点, 为模拟和仿真 P2P 文件共享系统及其网络流量、提高现有的 P2P 文件共享系统的性能、实现对网络流量合理有效的管理具有重要的作用。

本文利用统计学方法来研究文件共享系统中用户行为的一些特点和分布特征。根据 Maze 系统用户日志中的内容, 本文分析了用户的上传流量和下载流量、用户上传带宽和用户下载带宽、用户的请求次数和被请求次数, 以及用户的活跃时间和传输时间情况的统计分布模型。

1 Maze 系统及其日志

Maze 是北京大学网络实验室开发的一个中心索引与对等

连接相融合的 P2P 文件共享系统, 是中国教育科研网上最大的非商业性、以科研为目的的 P2P 系统。由于 Maze 系统的客户端实现了在结束一个下载或上传后向日志服务器报告其结果的功能, 这些日志记录了用户的请求时间、下载方的系统 ID 和被下载方的系统 ID、下载开始时间、下载结束时间、开始排队时间、请求文件的路径和文件名、请求文件长度、实际下载量、文件下载者的 IP 和端口等信息。因而 Maze 系统可以记录整个系统的所有在线用户的文件请求和下载情况, 这对准确理解和分析 P2P 文件共享系统的用户行为和特点提供了极大帮助。

2 模型过程

随机变量的模型过程可以大致分为分布选择、参数估计、拟合优度检验。

2.1 分布选择

识别随机变量所服从的分布族主要是通过探索性数据分析来完成的。对数据进行多种可视化检查和摘要统计可以实现探索性数据分析。可视化检查的主要工具是柱状图和分布图, 利用可视化检查能够消除很多候选分布, 并且判断一个单

收稿日期: 2011-08-24; 修回日期: 2011-10-14 基金项目: 国家“973”计划资助项目(2003CB314805, 2009CB320505)

作者简介: 陈宝钢(1973-), 男, 河南荥阳人, 讲师, 博士, 主要研究方向为网络测量、P2P 网络、无线传感器网络(bgchen@scut.edu.cn); 许勇(1971-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为网络流量分析、图像识别和处理; 胡金龙(1977-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为网络监控和管理。

分布能不能符合需要。当一个单分布不能满足要求时,就需要考虑选择混合分布。

2.2 参数估计

极大似然估计是一种常见的参数估计方法,它以观测值出现的概率最大作为准则,其基本思想是建立似然函数并求解似然方程。设 x 为连续随机变量,其分布密度函数为 $p(x|\theta)$,并完全由参数 θ 决定这个密度函数。

已知 N 个观测值 $x_1, \dots, x_N$, 假设它们是从分布密度为 $p(x|\theta)$ 的总体中独立抽取的,记 $X = \{x_1, \dots, x_N\}$, 则

$$p(X|\theta) = \prod_{i=1}^N p(x_i|\theta) \triangleq L(\theta|X) \quad (1)$$

函数 $L(\theta|X)$ 被称为似然函数。当 X 固定时, $L(\theta|X)$ 是 θ 的函数。极大似然估计的实质就是求出使 $L(\theta|X)$ 达到极大时的 $\hat{\theta}$ 值,即

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} L(\theta|X) \quad (2)$$

为了便于求出使 $L(\theta|X)$ 达到极大的 $\hat{\theta}$, 通常对式(2)取对数后再极大化,即求出对数似然函数解。

2.3 拟合优度检验

Chi-Square 检验和 Kolmogorov-Smirnov (KS) 检验是两种常用的拟合优度检验方法。KS 检验更适合被检验函数是连续函数的情况。KS 检验的统计量按如下方法定义。

首先求出样本数据的经验分布函数 $F_n(x)$ 。若 $F_0(x)$ 是被拟合的分布函数, K-S 检验的统计量 D_n 可以定义为 $F_n(x)$ 与 $F_0(x)$ 在所有 x 点取值的垂直距离的上确界,即

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F_0(x)| \quad (3)$$

基于这个定义, Stephens^[4] 后来提出了更加精确、实用的统计量:

$$D = (\sqrt{n} + 0.12 + \frac{0.11}{\sqrt{n}}) = (\sqrt{n} + 0.12 + \frac{0.11}{\sqrt{n}}) \sup_x |F_n(x) - F_0(x)| \quad (4)$$

检验的置信水平 α 可以直接由式(5)获得。

$$\alpha = 2 \sum_{i=1}^{+\infty} (-1)^{i-1} \exp(-2i^2 D) \quad (5)$$

对于给定的显著性水平 α' , 如果根据 D 值计算所得的 α 值大于 α' , 则接受 H_0 ; 否则, 拒绝 H_0 。

2.4 混合分布

有限混合分布是由多个分布的加权和组成的分布^[5,6], 是为了解决单分布无法满足分布拟合精度要求的情况下出现的, 并在现代统计的发展过程中作为一个模型得到广泛的研究和应用。

设 x 为一随机变量, 其概率密度函数为

$$p(x) = \pi_1 f_1(x) + \pi_2 f_2(x) + \dots + \pi_k f_k(x) \quad (6)$$

其中: $0 \leq \pi_i \leq 1 (i = 1, \dots, k)$, 并且 $\sum_{i=1}^k \pi_i = 1; f_i(\cdot) \geq 0, \int_{\Omega} f_i(x) dx = 1 (i = 1, \dots, k)$, Ω 为 x 的取值空间, 则称 x 为一有限混合分布; $p(\cdot)$ 是有限混合分布的密度函数; 参数 $\pi_1, \dots, \pi_k$ 称为混合权重; $f_1(\cdot), \dots, f_k(\cdot)$ 称为混合分布中各成分的密度函数。

由于混合分布需要比单分布更多的参数, 所以混合分布的

参数估计方法比单分布要复杂一些。Everitt 和 Hand 提出了使用 EM 算法来拟合混合分布^[7]。其基本思想是首先在给出缺失数据的情况下, 估计模型参数的值; 再根据参数值估计出缺失数据的值。根据估计出的缺失数据的值对参数值进行更新, 如此反复迭代, 直至收敛。文献[8,9]则提出了利用函数最小化方法来计算混合分布的参数, 这种方法比 EM 算法更快也更稳定。本文使用函数最小化方法来计算混合分布的参数。

3 用户行为模型和分析

许多针对 P2P 文件共享系统行为的研究, 没有分析特定行为的分布特点。而已有的针对特定行为的分析只是近似地拟合了数据的分布, 没有给出一个准确的分布模型^[10,11]。这些分布还无法在模拟和仿真 P2P 文件共享系统及其流量的过程中使用。

本文对 2009 年 12 月获得的一周用户日志信息中的数据进行了分析, 这部分数据出现了十三万的活跃用户、上百 TB 的传输流量。本文的所有数据均采用了显著性水平为 $\alpha' = 0.05$ 的拟合优度检验, 并使用了对数正态分布、指数分布、Pareto 分布三种基本的单分布模型。以小写字母表示概率密度, 以大写字母表示分布函数, 以表 1 的简写形式来代表这些分布的分布函数和密度函数式。

表 1 分布的密度函数和分布函数表示

分布名称	密度函数	分布函数
指数分布	$\exp_X(x; 1/\mu)$	$\text{EXP}_X(x; 1/\mu)$
对数正态分布	$\ln_X(x; \mu, \sigma)$	$\text{LN}_X(x; \mu, \sigma)$
Pareto 分布	$\text{pa}_X(x; \alpha, \beta, \xi)$	$\text{PA}_X(x; \alpha, \beta, \xi)$

3.1 上传流量和下载流量

本文研究的上传流量和下载流量是指在 Maze 系统中一个用户所有的上传文件流量和所有的下载文件流量。表 2 列出了用户的上传流量和下载流量的统计信息。表 2 及此后的对数据的各个统计表中所说的样本数量指的都是建立分布模型拟合时所用的有效样本数量, 并非全部统计数据数量。从表 2 中可以看到, 用户上传流量的行为和下载流量的行为有一些区别, 上传用户中有占 8% 的用户上传流量超过 10 GB, 而下载用户中只有 0.86% 的用户下载流量超过 10 GB。原因很可能和 Maze 系统的激励机制有关, 在此机制下用户上传获得积分, 而下载则会失去积分。由于用户在一段时期内通过上传获得的积分有限, 且在积分使用完后就不能再下载文件, 使得一定时期内观察到的下载量很大的用户数量不多。另外, 许多用户上传文件只是为了增加积分。在 3080 个上传流量超过 10 GB 的用户中只有 143 个用户的下载流量也超过了 10 GB, 比例仅为 0.046。由于数据的分布范围很大, 本文将其转换为对数形式后进行观察, 并除去了上传流量和下载流量为 0 的数据。在以自然对数为坐标的直方图中, 可以看到上传流量和下载流量数据的分布都有一个较为明显的峰值, 而直方图中的一些数据相对于这个峰值有对称的趋势; 并且图形中还有一个不太明显的峰值部分, 可以看做是钟形曲线的一部分。因此, 可以使用两个对数正态分布的混合分布来描述用户的上传流量和下载流

量分布。图1为用户上传流量的直方图。根据数据的特点分别对上传流量和下载流量的分布模型选取初值。上传流量分布函数初值设置为 $P=0.18, u_1=14.55, s_1=2.08, u_2=20.67, s_2=1.79$, 下载流量分布函数初值设置为 $P=0.15, u_1=15.04, s_1=3.88, u_2=20.15, s_2=1.41$ 。R统计软件包中的`optim()`函数主要利用Nelder-Mead算法来完成多维优化, 本文利用R统计软件包完成参数的计算。经过对初值的优化计算本文获得了关于用户的上传流量和下载流量分布的分布参数, 并对结果进行了显著性水平为 $\alpha'=0.05$ 的拟合优度检验, 结果如表3所示。为了比较拟合的模型和实际数据的差异, 在图1(用户上传流量的直方图)中增加模型的密度曲线, 可以发现模型的概率密度曲线和数据的直方图的变化趋势是一致的。而通过图2也可以看到, 数据的分位点和模型的分位点值是一样的。这也表明模型的拟合结果是可以接受的。

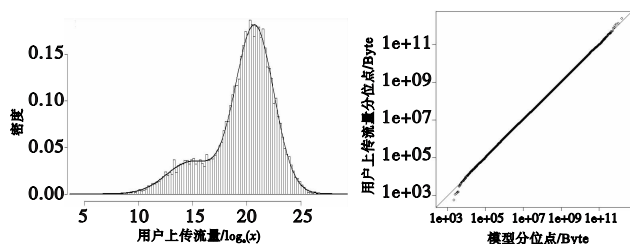


图1 用户上传流量的直方图

图2 用户上传流量的QQ图

表2 用户上传流量和下载流量的统计

类型	均值	中值	最小值	最大值	标准差	=0	≤100 MB	≥10 GB	样本数量
上传流量/Byte	3.4G	544.1M	0	720.5G	11.42G	178	11 071	3 080	38 449
下载流量/Byte	1.14G	447.4M	0	294.2G	2.30G	270	29 786	979	113 953

表3 用户上传流量和下载流量的统计分布模型

类型	模型	D	a
上传流量	$0.19\text{LN}_X(x; 14.81, 2.25) + 0.81\text{LN}_X(x; 20.72, 1.77)$	1.094	0.192
下载流量	$0.16\text{LN}_X(x; 15.23, 2.80) + 0.84\text{LN}_X(x; 20.17, 1.38)$	1.051	0.213

3.2 上传带宽和下载带宽

用户的上传带宽和下载带宽是用户行为的重要特征。表4、5列出了其相关的统计信息。由于有些用户实际的上传流量或下载流量很少, 且用户下载速度又较快, 而记录时间精度是以秒为单位, 于是出现一些下载时间被记录为0。本文除去了这部分下载流量不为0而下载时间为0的样本。另外对数据利用自然对数形式进行转换后, 也除去了上传时间或下载时间不为0但上传流量或下载流量为0的样本。图3为用户上传带宽直方图。通过直方图来观察带宽分布情况, 可发现用户的下载带宽中高带宽的用户数量比用户的上传带宽中的高带宽用户多且比例要高, 但是两个直方图都出现了两个较为对称的峰值, 具有对数正态混合分布的特点。在图4中显示了优化计算后模型的参数和拟合优度检验的置信水平。

3.3 请求次数和被请求次数

在表6的统计信息中, 用户请求数很少的用户具有较大比例, 用户请求数低于10的用户占了下载用户数量的26.45%, 被请求用户中也有20.41%的用户收到下载请求数量少于10。

请求次数和被请求次数为1的用户分别为用户数量的3.94%和2.87%。

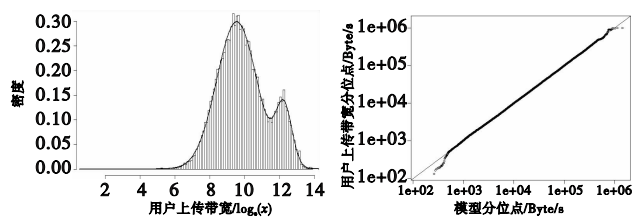


图3 用户上传带宽直方图

图4 用户上传带宽QQ图

表4 用户上传带宽和下载带宽的统计

类型	均值	中值	最小值	最大值	标准差	=0	≤100 KB	≥1 MB	样本数量
上传带宽/Byte/s	201.8K	155.5K	0	2.33M	215.31K	129	13 242	174	38 367
下载带宽/Byte/s	215.3K	141.3K	0	2.72M	201.79K	200	46 443	879	113 840

表5 用户上传带宽和下载带宽的统计分布模型

类型	模型	D	a
上传带宽	$0.85\text{LN}_X(x; 9.54, 1.14) + 0.15\text{LN}_X(x; 12.25, 0.46)$	1.022	0.248
下载带宽	$0.61\text{LN}_X(x; 10.06, 1.28) + 0.39\text{LN}_X(x; 11.99, 0.63)$	1.031	0.236

表6 用户请求次数和被请求次数的统计

类型	均值	中值	最小值	最大值	标准差	=1	≤10	≥100	样本数量
用户的请求次数	54	25	1	11 490	170.24	4 488	30 146	13 664	113 953
用户的被请求次数	160	33	1	37 177	594.59	1 102	7 850	10 387	38 449

如图5所示, 在用户的请求次数和被请求次数的直方图中, 虽然后面更长的尾部已经被截去, 但仍然可以看到前部有一个较快的衰减, 而后部显示了长的拖尾。这表明分布很可能是由指数分布和Pareto分布的混合分布组成的。在图6的对数坐标系下的CCDF图中可以看到, 用户请求次数的数值在100以后的形状近似于直线, 同样用户被请求次数的数值在大约80左右以后的形状也可近似为直线。

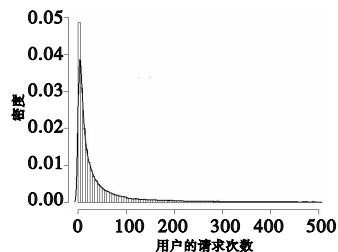


图5 用户请求次数直方图

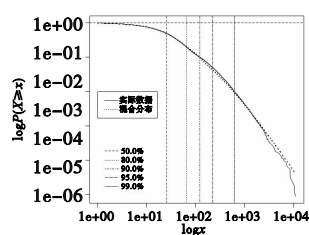


图6 用户请求次数CCDF图

以 u_1 表示指数分布的均值, ξ, β, α 分别为Pareto分布的位置参数、尺度参数和形状参数, 优化计算和KS检验的结果如表7所示。图5中用户请求次数模型的概率密度曲线和图6

中的 CCDF 曲线显示,模型和数据具有良好的拟合结果。

表 7 用户请求次数和被请求次数的统计分布模型

类型	模型	<i>D</i>	<i>a</i>
用户的请求次数	$0.90\text{EXP}_X(x;30.49) + 0.10\text{PA}_X(x;0.49,121.41,100.98)$	1.219	0.171
用户的被请求次数	$0.68\text{EXP}_X(x;20.19) + 0.32\text{PA}_X(x;0.56,192.17,78.99)$	1.531	0.093

3.4 活跃时间和传输时间

P2P 文件共享系统中的用户具有三种状态:离线,即用户未连接到系统;不活跃状态,即用户连接到系统中但没有任何上传和下载行为;活跃状态,即用户在系统中有上传或下载行为。

把会话定义为用户提出下载请求并在对方的下载队列中开始排队和结束下载之间的时间段,把会话中的传输过程看做用户下载开始和下载结束之间的时间段。每个用户的所有会话时间称为活跃时间,而传输过程的时间称为传输时间。从表 8 可以看到,活跃时间和传输时间中出现了为 0 的值。活跃时间值为 0 可能是由于用户已经将共享文件删除,但是目录服务器尚未得到即时更新,因此,当另一用户搜索到该文件且提出下载请求后,该下载请求不会被执行并记录会话时间为 0。而传输时间为 0 表明用户在其活跃时间内没有得到下载。除去样本中为 0 记录,做出样本取自然对数后的直方图。如图 7 所示为用户活跃时间直方图。使用对数正态分布进行拟合,表 9 显示了拟合的结果。对拟合的结果进行图形检验,从图 8 中可以看到,大部分数据范围内拟合的效果还是很好的。但是在 QQ 图的两端,较低的一侧和较高的一侧都出现了一定的偏移。较低的一侧向左偏,这是因为所取的用户活跃时间值都大于 0 且最小值为 1,而所拟合的模型的数据最小值由于没有受到限制所以图形显示向左偏。较高的一侧向右偏,这是由于受到所测量的时间限制,用户活跃时间值有一个最大值限制,而模型的数据最大值没有这种限制,所以 QQ 图形就向右偏。传输时间的 QQ 图也显示了同样的情况。

表 8 用户活跃时间和传输时间的统计

类型	均值	中值	最小值	最大值	标准差	=0	<3600	≥36000	样本数量
活跃时间/s	16941.16	2381	0	604591	51179.39	12	72119	13271	126289
传输时间/s	7391.02	1564	0	602097	24609.64	259	84510	4816	126289

表 9 用户活跃时间和传输时间的统计分布模型

类型	模型	<i>D</i>	<i>a</i>
用户活跃时间	$\text{LN}_X(x;6.88,2.01)$	1.162	0.203
用户传输时间	$\text{LN}_X(x;6.76,1.94)$	1.221	0.158

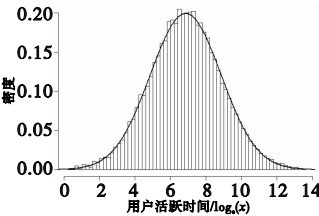


图 7 用户活跃时间直方图

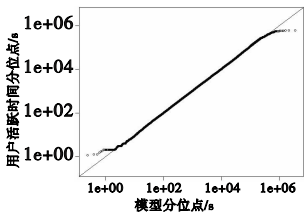


图 8 用户活跃时间 QQ 图

4 结束语

研究 P2P 文件共享系统的行为有助于深入了解 P2P 系统,而统计分布模型对于模拟和分析 P2P 文件共享系统的性能和影响具有重要的作用。利用统计方法获得的系统性能和属性等各方面的特点为模拟和仿真 P2P 文件共享系统及其特性、提高现有 P2P 文件共享系统的性能、实现对网络流量合理有效的管理都具有重要的作用。

参考文献:

[1] TUTSCHKU K. A measurement-based traffic profile of the eDonkey file sharing service [C]//Proc of the 5th Passive and Active Measurement Workshop. Berlin: Springer-Verlag, 2004:12-21.

[2] STUTZBACH D, REJAIE R. Understanding churn in peer-to-peer networks [C]//Proc of ACM SIGCOMM Internet Measurement Conference. New York:ACM,2006:189-202.

[3] LIANG J, KUMAR R, XI Y, *et al*. Pollution in file sharing systems [C]//Proc of IEEE INFOCOM. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc,2005: 1174-1185.

[4] STEPHENS M A. EDF statistics for goodness of fit and some comparisons[J]. *Journal of the American Statistical Association*,1974, 69(347):730-737.

[5] TITTERINGTON D M, SMITH A F M, MAKOV U E. Statistical analysis of finite mixture distributions [M]. New York: Wiley,1985.

[6] YANTIS S, MEYER D E, SMITH J E K. Analyses of multinomial mixture distributions; new tests for stochastic models of cognition and action [J]. *Psychological Bulletin*,1991,110(2):350-374.

[7] DEMPSTER A P, LAIRD N M, RUBIN D B. Maximum-likelihood from incomplete data via the EM algorithm [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*,1977,39(1):1-38.

[8] REDNER R A, WALKER H F. Mixture densities, maximum likelihood and the EM algorithm[J]. *SIAM Review*,1984,26(2):195-239.

[9] INGRASSIA S. A comparison between the simulated annealing and the EM algorithms in normal mixture decompositions[J]. *Statistics and Computing*,1992,2(4):203-211.

[10] GARCIA R, GARCIA V, PANEDA X G, *et al*. Analysis and modelling of a broadband fiber access network with high peer-to-peer traffic load[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*,2006, 14(5):506-526.

[11] HUGHES D, COULSON G, WALKERDINE J. Free riding on Gnute-lla revisited: the bell tolls? [J]. *IEEE Distributed Systems On-line*,2005,6(6):1-18.