

Peer-to-Peer 文件共享系统的测量研究^{*}

刘琼⁺, 徐鹏, 杨海涛, 彭芸

(中国科学院 软件研究所, 北京 100080)

Research on Measurement of Peer-to-Peer File Sharing System

LIU Qiong⁺, XU Peng, YANG Hai-Tao, PENG Yun

(Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-10-62645405, Fax: +86-10-62645410, E-mail: liuqiong@ios.cn, <http://www.isdn.ios.cn>

Liu Q, Xu P, Yang HT, Peng Y. Research on measurement of peer-to-peer file sharing system. *Journal of Software*, 2006,17(10):2131-2140. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/17/2131.htm>

Abstract: With the progress of peer-to-peer (P2P) technology, the Internet applications model is in a great reformation. In order to get an all-win solution among the Internet users, Internet service providers and content providers, it is necessary to measure and analyze the P2P applications from their perspectives. In this paper, the content of P2P measurement is introduced firstly, and then the existing research on P2P measurement is classified into 3 areas: topology measurement, traffic measurement and availability measurement. After comparing between measurement methods, the comprehensive survey on P2P measurement is given, and then the existing measurements and their results are analyzed in depth, furthermore, the shortcomings and problems are outlined. In the end, the future trend of the P2P measurement is discussed.

Key words: peer-to-peer (P2P) network; network measurement; topology measurement; traffic measurement; availability measurement

摘要: Peer-to-Peer(P2P)技术的发展引发了 Internet 应用模式的变革.为了寻求网络运营商、内容提供商和 Internet 用户三方共赢的解决方案,必须从他们各自的角度出发对 P2P 应用进行系统的测量与分析.首先概述了 P2P 测量的研究内容,并将现有的 P2P 测量研究划分为 P2P 拓扑特征的测量、P2P 流量特征的测量、P2P 可用性的测量 3 类.在对 P2P 测量方法进行对比分析之后,详细综述了 P2P 测量的研究现状,对现有的各种测量方案以及研究成果进行了深入的分析,指出了其中存在的问题和缺陷.最后讨论了 P2P 测量未来的研究方向.

关键词: 对等网络;网络测量;拓扑测量;流量测量;可用性测量

中图法分类号: TP393 文献标识码: A

近年来,随着 Internet 的迅速发展,对等网络技术(peer-to-peer,简称 P2P)已经逐渐成为各方关注的热门话题,财富杂志更是将 P2P 列为影响 Internet 未来的 4 项科技之一.

目前,P2P 应用技术主要有如下 4 类:P2P 文件共享技术、P2P 实时通信技术、P2P 协同计算技术以及 P2P 流媒体传输技术,其中 P2P 文件共享技术的应用最为广泛.P2P 文件共享技术采用了与客户/服务器模式完全不同的资源共享方式,它不依赖于提供服务的中心节点,而是通过用户之间的对等连接实现资源共享,突破了服务

^{*} Received 2006-04-08; Accepted 2006-06-23

器瓶颈.

P2P 文件共享技术如同一把双刃剑,在给 Internet 用户共享资源带来方便的同时,也给网络运营商和内容提供商带来了棘手的问题.为了提高资源获取速度,P2P 文件共享系统通常启动多条并发进程进行数据传输,极大地增加了网络负担,使网络拥塞现象日益严重.非对称数字用户环路(asymmetrical digital subscriber loop,简称 ADSL)是我国当前主流的宽带接入技术,该技术在流量规划时就设定用户的上行流量远远小于其下行流量;然而,P2P 文件共享技术恰恰违背了这种设定,使网络用户的上行流量与下行流量趋于相等.这种上层应用模式与下层流量规划之间的不匹配,加剧了网络性能的恶化,降低了用户的服务质量,已经成为导致近年来宽带用户投诉日益增多的重要原因之一.

此外,P2P 文件共享技术对用户共享的内容缺乏有效的管理,大量的影音文件被非法传播,给内容提供商带来了巨大的经济损失.近年来,关于 P2P 的版权官司已经在全球相继开审,封杀 P2P 的呼声此起彼伏.但是,简单的封杀并不能最终解决问题,如何利用网络测量技术从不同角度对 P2P 文件共享网络进行全面的测量和分析,寻求 Internet 用户、网络运营商和内容提供商三方博弈的解决方案,是一个值得深入研究的问题.

本文系统分析了当前 P2P 测量中的主要方法和测量指标,研究了如何从不同角度对 P2P 应用进行系统的测量,并指出了今后的研究方向.

本文第 1 节介绍 P2P 测量的基本概念,包括 P2P 测量的内容和 P2P 测量的分类.第 2 节讨论 P2P 测量的方法,对主动测量方法和被动测量方法进行分析和比较研究.第 3 节分析各类 P2P 测量的研究现状,指出各类研究存在的不足和亟待解决的关键问题.第 4 节讨论 P2P 测量的未来发展方向.第 5 节总结全文.

1 P2P 测量研究概述

网络测量的主要任务是对实际网络进行指标测量,评估网络的运行状况,构建基于测量的网络行为分析模型.一般的网络测量主要关注于待测网络的 QoS 属性,如网络的带宽、延迟、丢包率等;然而,面向应用的网络测量则更关注于应用自身的性能指标以及该应用对下层承载网络的影响.P2P 文件共享系统是建立在 Internet 上的大规模分布式协作网络,针对这类网络应用进行测量,不仅需要考虑上述两个方面的内容,尤其还需要关注用户行为与 P2P 系统性能之间的相互影响.面向 P2P 应用的网络测量根据研究内容的不同可以划分为以下 3 类:

- (1) P2P 拓扑特征的测量:描述不同 P2P 应用的覆盖网络拓扑,分析相应拓扑的图属性和动态属性,探索邻居选择策略和用户动态行为对网络拓扑结构的影响,改进 P2P 文件共享系统的性能;
- (2) P2P 流量特征的测量:获取 P2P 流量的各项统计参数,分析 P2P 流量的空间特性和时间特性,构建相应的 P2P 流量模型,探寻有效的 P2P 流量控制策略;
- (3) P2P 可用性的测量:描述用户从特定 P2P 文件共享系统中获得的服务水平,分析用户行为和 P2P 系统可用性之间的相互影响,寻找合理的 P2P 赢利模式.

从测量关注的角度来看,(1)类、(2)类是从网络运营商和 P2P 系统开发者的角度出发,而第(3)类是从 Internet 用户和内容提供商的角度出发,分别针对 P2P 网络进行测量研究.

2 P2P 测量方法的研究

P2P 网络测量是进行 P2P 流量监控和网络行为学分析的基础.根据测量方式的不同,P2P 网络的测量方法可以分为主动测量方法和被动测量方法两种.

2.1 主动测量方法

P2P 网络的主动测量方法是使用网络爬虫(crawler)主动加入 P2P 网络,获取相关的网络特性和对等体(单个对等体用“Peer”,多个对等体用“Peers”)的属性.该技术一般通过修改普通的 P2P 客户端来进行 P2P 测量,Crawler 像普通节点一样加入 P2P 系统,然后尽可能多地收集相关信息.这些信息通常包括 Peer 的 IP 地址、端口号以及所有可以通过 P2P 协议获取的元数据(metadata)信息.主动测量方法主要用于测量 P2P 网络的拓扑、延迟、内

容可用性、上传/下载比等微观行为特性.Saroiu 等人^[1]率先使用主动 Crawler 对当时最为流行的两种 P2P 系统 Napster 和 Gnutella 进行了测量研究.针对 Gnutella 等开源 P2P 系统修改客户端进行主动测量相对简单;而对于 KaZaA 等私有协议进行主动测量则要困难得多,测量者必须对待测 P2P 系统进行大量的反向工程,在获取足够多的相关信息之后,才能设计出合适的 Crawler 进行主动探测.Liang 等人^[2,3]对 KaZaA 系统的网络行为进行了深入的探索与分析,设计出专门的 Crawler,首次对 KaZaA 系统中的文件污染状况^[4]进行了测量与分析.

主动测量方法能够直接探测获取 P2P 网络的特征信息,具有可信度高、准确性好的特点.但是,它需要相当的先验知识,而且是针对特定应用的测量,通用性较差.此外,基于 Crawler 的主动测量方法引入了额外的探测流量,增加了网络的负担.

2.2 被动测量方法

P2P 网络的被动测量方法通常是在网络的不同位置部署一定数量的测量点,使用特定的软、硬件设备被动监测相关的 P2P 流量信息.为了保证测量数据的代表性,测量点通常位于骨干网络的核心路由器或某个 ISP 网络的边缘出口.被动测量方法主要用于测量 P2P 网络的流量大小、Peer 数量、连接持续时间等宏观流量特性.最早的被动测量方法是基于应用端口的测量,Sen 等人^[5]通过捕获特定端口的流量,对当时最为流行的 3 种 P2P 文件共享系统 Gnutella, FastTrack, DirectConnect 进行了全面的测量与分析.随着 Napster 的关闭,越来越多的 P2P 应用开始使用端口跳变(port hopping)技术来逃避基于应用端口的流量检测^[6,7].为了更为准确地获取 P2P 流量信息,Sen 等人^[8]又提出了基于 P2P 内容特征的被动测量方法,该方法通过识别包载荷中的特征字段来捕捉相应的 P2P 流量.但是,这种识别方法依赖于报文内容,面对负载加密的 P2P 流量或者内容特征尚未公布的新型 P2P 流量显得力不从心.Karagiannis 等人^[9]随后提出了基于传输层行为特征的识别方法,该方法只根据少量的传输层包头信息准确识别出 99% 的 P2P 流.但是,这种方法目前仅能用于事后分析.表 1 从准确性、健壮性和实时性 3 个方面对上述 3 种典型的 P2P 流量识别方法进行了比较,从中可以看出:基于传输层行为特征的 P2P 流量识别方法准确性最好.而如何提高该方法的实时性,成为该领域亟待解决的问题.

Table 1 Comparison among 3 kind of identification methods for P2P traffic

表 1 3 种 P2P 流量识别方法的比较

	Accuracy	Robustness	Real-Time
Port-Based identification	Bad	Good	Good
Content-Based identification	Good, but declining	Bad	Good
Behavior-Based identification	Good	Good	Bad

被动测量方法属于非侵扰性的,被动收集流量信息既不会增加网络负载,也不会对 Peer 本身造成影响.该方法可以用于测量多种 P2P 应用,通用性较好,而且通过控制测量点的位置,还可以给出 P2P 流量对特定网络区域的影响.被动测量方法的主要缺点是无法深入了解 P2P 网络行为,而且对测量设备的软、硬件要求较高.此外,被动测量的基础是对数据包进行检测,随着网络流量的高速增长,如何实现准确、高效的实时测量则变得更加困难.

2.3 P2P网络测量方法的分析

对于不同测量方法,P2P 网络测量的难点各不相同.在 P2P 网络的主动测量中,Crawler 收集相关信息的速度是关键,而在 P2P 网络的被动测量中,准确、高效的 P2P 流量识别则显得尤为重要.

P2P 网络是一种高度异构、快速变化的网络,每时每刻都有大量的 Peers 加入或离开系统.如果 Crawler 收集信息的时间过长,加入/离开系统的 Peer 数量较多,将会导致系统视图的不一致性,直接影响测量结果的准确性.如何快速获取整个网络的视图是改进 P2P 主动测量方法的关键.

由于端口跳变、负载加密等流量隐藏技术的发展,利用应用端口和内容等的显式特征 P2P 流量识别方法已经逐步被淘汰.基于传输层行为特征的 P2P 流量识别方法,是目前较为准确的一种方法.但是,该方法并不成熟,只适用于事后的流量记录分析,还不能用于实时的流量识别.如何改进基于行为特征的 P2P 流量识别算法、降低计算复杂度、提高实时性能,是当前 P2P 流量识别方面亟待解决的一个重要问题.此外,Karagiannis 等人^[10]

已开始使用应用层行为特征作为流量识别的主要依据.虽然这些方法在当前流量识别中已获得了不错的结果,但是,传输层行为特征和应用层行为特征都是比较简单的用户行为特征,设计回避这类表面行为特征的 P2P 协议并不困难.如何提取更为有效的 P2P 内在行为特征,将是未来 P2P 流量识别中的重要工作.目前,随着数据挖掘技术的不断发展,已经有很多研究人员开始将机器学习中的贝叶斯分类^[11]、雅各布算法^[12]等常用手段引入到流量识别的研究当中,如何利用这些数学工具,深入挖掘 P2P 流量的内在行为特征,将成为未来 P2P 流量识别中新的研究热点.此外,英国曼彻斯特大学的 Dedinski 等人^[13]新近提出一种利用主动探测协同被动监听的 P2P 流量识别方案,虽然其有效性和实用性还有待进一步探讨,但它毕竟为 P2P 流量识别中主动方法与被动方法的有效结合进行了一次探索性的尝试.

3 P2P 测量的研究现状

3.1 P2P 拓扑特征的测量

P2P 文件共享系统是建立在 Internet 上的应用层覆盖网络,其拓扑结构主要描述系统中各个 Peer 的排列方式以及它们相互之间的连接形式.由于 P2P 应用是由大量 Peers 根据特定协议构成的大规模协作网络,协议的邻居选择策略和用户的加入/退出行为都会使 P2P 应用具有天然的动态特性.但这种动态特性给大规模的 P2P 拓扑测量带来了巨大的困难:一方面,由于 P2P 网络规模日益增大,为了保证拓扑快照(snapshot)的完整性,必须延长测量时间以尽可能多地遍历拓扑节点;而另一方面,由于 P2P 拓扑在测量过程中的动态变化,为了保证拓扑快照的准确性又必须缩短测量时间以减少拓扑变化带来的误差.如何寻求准确性和完整性之间的合理折衷是 P2P 拓扑特征测量的关键问题.目前,P2P 拓扑特征的测量主要包括图属性测量和动态属性测量.

3.1.1 P2P 拓扑的图属性测量

P2P 拓扑的图属性主要包括以下 4 项指标:节点连通度的分布、节点对距离的分布、拓扑的小世界属性以及拓扑的弹性.

2002 年,Saroiu 等人^[1]率先使用主动测量方法对当时最为流行的 Gnutella 和 Napster 进行了拓扑测量,他们的研究表明,Gnutella 的节点连通度符合幂律分布(power-law distribution).此后不久,Ripeanu 等人^[14]推翻了这一结论,他们认为 Gnutella 的节点连通度符合两段式幂律分布.2005 年,Stutzbach 等人^[15]在前人的工作基础上改进了主动测量方法,发现使用 LimeWire 和 BearShare 两种不同 Gnutella 实现的超级节点(ultrapeer)分别倾向于连接 30 个和 45 个叶节点,而两者都倾向于在顶级拓扑中维持 30 个邻居节点.这个结论与前人的结果大相径庭,为此,他们验证了前人的实验结果都是由于 Crawler 爬行速度太慢而导致的错误结论.因此,如何提高 Crawler 的爬行速度将是未来提高拓扑测量准确性的关键问题.此外,2005 年,Liang 等人^[2]首次对非开放源码的 KaZaA 网络进行了拓扑测量,他们的研究表明:KaZaA 网络中的超级节点 SN(super node)倾向于连接 60~150 个叶节点,并连接 40~60 个邻居 SN 节点.但他们的测量仅局限于节点连通度的测量,并没有对 KaZaA 网络拓扑的图属性和动态属性进行全面的分析.

节点对距离的分布是指拓扑快照中各个节点到其他节点最短路径长度(按跳数计算)的分布.Ripeanu 等人^[14]分别在 2000 年 11 月和 2001 年 6 月对 Gnutella 网络的节点对距离进行了两次测量,测量结果表明:所有路径中 40%~50%具有 4 跳或 5 跳的长度,而且两次测量的结果在一定程度上有所不同.2005 年,Stutzbach 等人^[15]又对新版 Gnutella 网络的节点对距离进行了 4 次测量,测量结果表明:大约有 60%的路径长度为 4 跳,而且 4 次测量的结果非常一致.从以上结果的比较可以看出,新版的 Gnutella 网络具有更短的节点对距离,而且分布更加均匀、稳定.

拓扑的小世界属性是指与具有相同节点数和边数的随机图相比,拓扑具有更短的节点对距离以及更高的聚簇程度.图的聚簇程度通常由聚簇系数 C_{actual} 来表示:

$$C(i) = \frac{D(i)}{D_{\max}(i)} \quad (1)$$

$$C_{actual} = \frac{\sum_i C(i)}{|V|} \quad (2)$$

在式(1)、式(2)中: $D(i)$ 代表节点 i 的邻居之间互连的边数; $D_{max}(i)$ 代表节点 i 的邻居数目; $C(i)$ 代表中间变量; $|V|$ 代表图的节点数.Jovanovic 等人^[16]在 2001 年的研究表明,Gnutella 网络具有小世界属性.2005 年,Stutzbach 等人^[15]对新版 Gnutella 的测量也验证了这一结果.此外,他们的研究结果还表明,新版 Gnutella 的聚簇程度略低于旧版的 Gnutella.一个可能的解释是新版的 Gnutella 具有更大的网络规模,从而增加了与不同节点建立连接的机会.根据目前的研究结果,拓扑的聚簇程度可能与节点引导(peer bootstrapping)、节点发现机制和覆盖的动态特性等诸多因素有关,但是对于小世界属性的成因还有待于进一步研究.

拓扑的弹性主要描述了拓扑在节点删除后连通性的变化情况.节点的删除策略主要有两种:一种是随机删除;一种是高连通度优先的病态删除.Saroiu 等人^[1]基于部分 Snapshot 得出了以下结论:Gnutella 的拓扑能够应对随机节点删除,但当面对病态节点删除时,仅删除了其中连通度最高的 4%的节点.拓扑图便迅速被割断.然而,Stutzbach 等人^[15]的测量结果却表明:随机删除 85%的 Peers,剩余 Peers 中的 90%仍保持连通;病态删除 50%的 Peers,剩余 Peers 中仍有 75%保持连通;新版的 Gnutella 拓扑对于随机删除和病态删除都具有良好弹性.造成两次测量结果不同的原因可能是:(1) 新版 Gnutella 的节点平均连通度高于旧版 Gnutella;(2) 在文献[1]的研究中,只依赖于部分 Snapshot,可能遗漏了部分不可忽略的 Snapshot.

3.1.2 P2P 拓扑的动态属性测量

由于 P2P 连接的持续变化,P2P 拓扑具有天生的动态性,这些动态性会对整个 P2P 网络的性能造成显著的影响.准确描述拓扑动态特性并分析它们对 P2P 网络性能的影响,对于网络运营商和 P2P 协议开发者来说都具有重要的参考价值.目前,P2P 网络拓扑动态特性的研究还处于起步阶段,主要的研究工作包括稳定核心覆盖(stable core overlay,即顶级拓扑中在线时间超过特定门限值的 Peers 集合)连通性的变化、Peer 会话时间和下载时间的分布以及会话时间的关联性.

Stutzbach 等人^[15]率先对新版 Gnutella 的汇聚动态性进行了测量.他们的方法是对稳定核心覆盖的内部连通性和外部连通性进行详尽的分析.他们的研究表明:长期存在的 Ultrapeers 构成了密集连通的稳定核心覆盖,该覆盖为所有参与的 Peers 提供稳定而有效的连通,即使其他参与的 Peers 具有高度的动态性.稳定核心覆盖的内部连通性具有洋葱状分层偏移,而且稳定核心覆盖的外部连通性明显弱于内部连通性.这些现象都表明:在线时间越长的 Peer,就越倾向于与在线时间大于或等于自己的 Peers 连接.

P2P 网络中的扰动(churn)是指用户加入/退出 P2P 系统所引起的动态变化.目前,描述扰动常用的指标是会话时间(session time,即从用户加入 P2P 系统起,到离开 P2P 系统为止的时间).Sen^[5]和 Gummadi^[17]等人采用被动捕获流量的方法对会话时间的分布进行了统计,但当 Peer 没有产生流量时,被动测量方法将明显低估会话时间,而且被动测量的地域性也限制了测量结果的代表性.因此,人们更多地采用了主动测量方法.2002 年,Chu 等人^[18]对 Napster 和 Gnutella 进行了测量,结果表明,会话时间服从 log-quadratic 分布.同年,Saroiu 等人^[19]给出了会话时间的累积分布函数,表明会话时间的分布具有显著的偏移.2004 年,Liang 等人^[2]也给出了 KaZaA 网络中超级节点会话时间的累积分布函数.由于这些测量的采样没有代表性,所以他们的结果常常互相矛盾.为此,Stutzbach 等人^[20]改进了主动测量方法,并将 Gnutella,BitTorrent,Kademlia 这 3 种 P2P 网络的测量结果进行对比分析,得出以下结论:Peer 的会话时间和下载时间服从幂律分布;Peer 到达的时间间隔服从泊松分布;连续会话时间的长短具有强烈的关联性;而且,前 3 种动态特性在不同的 P2P 协议中具有相似的特点.如何探索不同 P2P 应用间拓扑动态变化的关联,深入挖掘 P2P 动态行为对网络拓扑的影响还需要进一步加以研究.

3.2 P2P流量特征的测量

随着 P2P 应用的日益普及,P2P 流量已经逐步取代 Http 流量而成为 Internet 流量的主体.P2P 流量的迅速增长不仅带来了网络带宽的快速消耗,而且还以其近乎对称的流量模式加剧了网络的拥塞状况.因此,准确描述 P2P 流量特征、构建相应的流量模型,将对网络运营商进行流量工程和容量规划提供重要的参考依据.

P2P 应用的流量特征通常是采用被动监听网络数据包的方式来获取,但是,随着 P2P 流量隐藏技术的发展以及 Peer 分布的不均匀性,如何确保 P2P 流量统计数据准确性和代表性已经成为 P2P 流量测量的首要问题.目前,P2P 流量特征的测量主要包括空间特性的测量和时间特性的测量.

3.2.1 P2P 流量空间特性的测量

P2P 流量的空间特性包括两个方面:一个是宏观角度来看,P2P 流量在地域分布上的差异性;另一个是从微观角度来看,P2P 流量在不同 Peers 之间分布的非均匀性.

从 CacheLogic 公司 2004 年 6 月发布的统计数据^[21]来看,P2P 应用的流量已经远远超过了 Http 应用的流量,成为 Internet 流量的主体.但是,P2P 流量在所有 Internet 流量中的比例却由于所处地域的不同而存在着相当的差异,见表 2.

Table 2 The distribution of Internet traffic in different areas

表 2 Internet 流量在不同地区的分布

	Asia	Europe	England	America
Popular P2P traffic (%)	64	53	43	61
Other P2P traffic (%)	18	3	17	6
Http traffic (%)	2	12	17	10
Other traffic (%)	16	32	23	24

注:Popular P2P 流量包括 BitTorrent,eDonkey,FastTrack 以及 Gnutella 的流量.

此外,不同 P2P 应用的流量在所有 P2P 流量中的比例反映出不同 P2P 应用在 Internet 上的流行程度,而且这种流行程度也存在着显著的地域性差异,见表 3.

Table 3 The percentage for main P2P applications in different areas

表 3 不同地区的 4 种主流 P2P 应用所占比例

	Asia	Europe	England	America
BitTorrent (%)	90	30	48	57
EDonkey (%)	8	40	16	30
FastTrack (%)	2	20	33	9
Gnutella (%)	0	10	3	4

从表 2、表 3 可以看出:亚洲地区的 BitTorrent 流量远远大于其他地区,这可能与亚洲地区很多网络运营商采用按时计费的策略有关.除了不同的计费策略之外,不同的文化背景、不同的版权管理法令等因素都会对 P2P 流量的地域性差异造成直接的影响.分析 P2P 流量地域性差异的成因、寻求合理而有效的 P2P 流量管理策略将是一个值得深入研究的问题.

2002 年,Sen 等人^[5]率先对 FastTrack,Gnutella,DirectConnect 这 3 种 P2P 应用进行了系统的测量与分析.他们的研究表明:P2P 流量在不同 Peers 之间的分布非常不均匀,10%的“重量级拳击手(heavy hitter)”提供了 99%的流量,而且这种不均匀性并不遵循幂律分布.同年,北京交通大学的张云飞等人^[22]在国内某骨干网运营商的核心路由器上对 P2P 流量进行了测量,他们的测量结果表明:20.7%的 Peers 传输了 90%的 P2P 流量,2.3%的 Peers 传输了 50%的 P2P 流量,而且 P2P 流量在不同 Peers 间的分布服从重尾分布.对比两组测量结果可以看出,P2P 流量在不同 Peers 间确实是非均匀分布的.然而,后者重尾分布结论却是建立在对 Internet 流量进行 1000:1 采样的基础之上,如此稀疏的采样必然导致短数据流的遗漏,而这种遗漏对重尾分布的影响还需要进一步考证.随着网络速度的进一步提高,如何在高速网络上实现对 P2P 流量的无偏采样已成为 P2P 流量测量的关键问题之一.2004 年,Plissonneau 等人^[23]的测量结果不仅验证了不同 Peers 之间整体流量分布的不均匀性,还表明不同 Peers 间流量的上传/下载比也存在着相当的差异,在 P2P 应用 eDonkey 中,有近 20%的 Peers 只下载不上传(free riders),如何利用 P2P 流量在不同 Peers 间的非均匀分布,探寻有效的 P2P 流量控制策略,已成为网络运营商最为关注的问题.

3.2.2 P2P 流量时间特性的测量

P2P 流量的时间特性也可以分为两个方面:一方面是 P2P 流量在宏观上的昼行性(time of day);另一方面是

P2P 流量在微观上的自相似特性.

Sen 等人^[5]的研究结果表明, FastTrack, Gnutella, DirectConnect 等 3 种 P2P 流量在傍晚和凌晨之间最大, 在上午显著下降. Plissonneau 等人^[22]对 BitTorrent 和 eDonkey 测量结果表明, 这两种 P2P 应用的流量也有类似的特点. 以上现象表明, 大多数 P2P 用户是在下班后加入 P2P 网络并在晚上持续下载数据. 因此, 网络运营商可以利用用户行为的这一特点, 制定相应的分时段计费策略, 以缓解夜间由于 P2P 应用集中使用所导致的网络拥塞状况.

1995 年, Paxson 等人在文献^[24]中指出: 人为参与程度越高的应用, 长相关特性越明显. 为了验证这一观点, 张云飞等人^[22]对多种 P2P 应用的流量以及它们的汇聚流量进行了分析, 结果表明, 各种 P2P 应用以及它们的汇聚流量都表现出明显的长相关特性. 由于这一结论是建立在采样数据的基础上, 因此, 其正确性尚未得到广泛认可. 2004 年, 韩国的 Joo SD 等人^[25]再次对 P2P 流量的自相似特征进行了验证, 结果表明, P2P 流量的 Hurst 参数等于 0.974, 具有明显的自相似特性. 同年, 哈尔滨工业大学的刘刚等人^[26]也证明了 BitTorrent 流量具有自相似特性, 并分析了产生自相似特性的原因. 然而, Joo SD 和刘刚的工作都是对只有单一出口的末梢网络(stub network)进行测量, 其结果的代表性难以保证. 因此, 验证 P2P 流量的自相似特性、构建适当的 P2P 流量模型还有待于进一步研究.

目前, 大规模应用的有结构 P2P 网络都是整合在无结构 P2P 网络当中提供辅助的资源搜索服务(例如, emule 中包含的 Kademia; eDonkey 中包含的 Overnet), 尚未形成独立的数据传输流量. 但是, 随着有结构 P2P 网络的逐步成熟, 相关的流量测量研究将有可能成为一个新兴的研究方向.

3.3 P2P可用性的测量

可用性是衡量系统性能的重要指标, 在不同的应用背景下有着不同的意义. 目前在计算机领域内比较通用的定义是 Malek 教授在德国海德堡大学教学时给出的^[27]:

- (1) 瞬时可用性是指系统在时刻 t 正常运行的概率, 等于不可修复系统的可靠性.
- (2) 稳态可用性是指系统在任意时刻可以运行的概率, 可以表示为系统在期望的生命周期内正常运行时间的比例.

上述定义对于大多数独立的软、硬件系统来说是适用的. 但是, P2P 网络是一种高度动态的分布式协作系统, 在运行方式上与单机系统有着本质的区别, 因此上述定义并不适合.

P2P 网络的可用性主要用于描述用户从特定 P2P 文件共享系统中获得的服务水平. 由于 P2P 网络的可用性不仅与系统中每台主机的可用性相关, 而且还与整个系统的网络连接状态以及用户加入/退出系统的行为相关. 这些复杂的关联性使得直接测量 P2P 网络的可用性变得非常困难. 因此, 目前的研究主要通过测量主机可用性和内容可用性两类指标来反映 P2P 网络的可用性.

3.3.1 主机可用性的测量

P2P 网络中主机可用性主要通过主机活跃时间以及活跃主机的比例来反映. 通常的测量方法是在特定 P2P 网络中随机选择一个待测主机集合, 周期性地向这些主机发送探测消息, 并统计响应的数量. 活跃主机的比例 K 等于收到响应数量 n 和待测主机数量 N 的比值, 如式(3)所示.

$$K = \frac{n}{N} \quad (3)$$

Saroiu^[1]和 Chu^[18]采用主动测量方法分别对 Napster 和 Gnutella 中的主机可用性进行了测量, 他们采用 IP 地址作为 P2P 网络中主机的唯一标志. 但是, 网络中大量使用的网络地址翻译技术 NAT(network address translator)和动态主机配置协议 DHCP(dynamic host configuration protocol)却破坏了这种一一对应的关系. 因此, 建立在这种假设基础上的测量必然偏离实际结果. Bhagwan^[28]等人选择 Overnet 系统作为分析对象, 使用系统随机分配的 ID 号作为 P2P 网络中主机的唯一标志, 克服了上述问题. Bhagwan 的测量结果表明: 主机可用性随着测量时间的增长而减弱, 具有明显的昼行性, 而且不同主机的可用性相互独立. Kutzner 等人^[29]在 2004 年 7 月的两个星期内, 在 PlanetLab 上对 Overnet 进行了更为详细的测量, 他们的测量结果与 Bhagwan 基本一致: 50% 的主机活跃时间超过 6 小时, 18% 的主机活跃时间超过 48 小时, 主机可用性随着时间的增长而有所下降. 此外, 他们也验证

了 P2P 网络中 IP 地址无法作为待测主机的唯一标志。

Overnet 是主流 P2P 文件共享系统中的有结构 P2P 网络,有结构 P2P 网络和无结构 P2P 网络在资源的发布、存储和获取方式上都存在着显著的不同。Overnet 网络的测量结果能否适用于无结构 P2P 网络以及如何在无结构网络选择待测主机的唯一标志,将成为这一方面必须解决的关键问题。

3.3.2 内容可用性的测量

内容可用性主要用于描述用户从 P2P 系统中获得目标资源的难易程度,即用户查询和下载资源的难易程度。内容可用性的相关因素比主机可用性更为复杂,因此只能通过对查询返回数量、查询响应时间、内容稳定性、内容重复度(当前节点发起的搜索中,特定文件重复出现的数量)、下载完成时间等量化指标的测量来间接反映。

加州大学伯克利分校的 Christin 等人^[30]根据上述 5 个指标对 Gnutella,eDonkey,eDonkey/Overnet,FastTrack 这 4 种主流 P2P 网络的内容可用性进行了测量。测量结果表明,网络拓扑和内容可用性密切相关,内容重复度通常符合幂律分布,目标文件的重复度越高,下载到正确文件的时间就越短。

由于 P2P 网络是用户自组织的内容分布式网络,大量的影音文件被非法传播,给内容提供商带来了巨大的经济损失。为了有效遏制这些不法行为,内容提供商采取了一系列法律措施,但是收效并不大。为此,他们开始引入内容污染技术,以降低 P2P 网络的内容可用性。2005 年,Liang 等人^[4]首先对 KaZaA 网络中的内容污染状况进行了测量,他们的测量结果表明,最近流行的大部分歌曲都有严重的污染,而且污染拷贝所占的比例随时间的变化较为缓慢。此外,Christin 等人^[30]还分析了各种污染策略对内容可用性的影响。P2P 文件污染的测量目前还处于起步阶段,仅能使用启发式方法识别部分污染文件。如何实现 P2P 文件污染的智能识别,将是下一步研究必须解决的首要问题。

4 未来的研究方向

P2P 应用的测量研究目前总体上还处于起步阶段,从前文的分析来看,现有的 P2P 测量方案大多数尚未成熟,存在大量的开放性问题有待于进一步的研究。同时,P2P 文件共享系统作为一种新型的网络应用也在不断地完善与发展当中,新的 P2P 测量问题也必将随之出现。从推动 P2P 测量的发展和应用来看,我们认为以下 4 个方面将成为未来的主要研究方向:

- (1) 目前的 P2P 测量方案通常都是仅采用单一测量方法(主动测量或被动测量),测量结果相对片面,对 P2P 应用的行为特征缺乏整体的认识^[31]。寻求主动测量方法和被动测量方法的有效结合,针对特定 P2P 应用提出系统的测量方案将是一个值得深入研究的方向。
- (2) P2P 拓扑的测量虽然起步较早,但一直以来研究目标分散,对拓扑测量缺乏系统的规划。直至 2005 年,Stutzbach 等人^[15,20]才对新版 Gnutella 的拓扑进行了系统而准确的测量,初步建立起 P2P 拓扑测量的框架。如何改进和完善这一框架,并将其应用到其他 P2P 拓扑测量当中,还需要进一步的研究与探讨。
- (3) 随着 P2P 流量在 Internet 流量中的比例日益增高,P2P 流量的动态行为已经开始主导 Internet 流量的行为。如何准确描述 P2P 流量的动态行为,并根据相关的 P2P 流量描述制定相应的流量控制策略,已成为网络运营商最为关注的研究方向。
- (4) P2P 内容可用性的测量是从用户观点对 P2P 网络性能进行测量。目前,这方面的研究刚刚起步,测量指标和测量方法的选择还处于摸索阶段。测量用户关注的各项性能指标并分析这些指标对用户行为的影响,进而寻找 Internet 用户、内容提供商、网络提供商之间的共赢方案,已成为当前乃至今后的一个重要的研究方向。

5 总结

本文首先对 P2P 测量的研究内容进行了概述,并根据研究内容的不同将现有的 P2P 测量工作划分为 P2P 拓扑特征的测量、P2P 流量特征的测量以及 P2P 可用性的测量 3 类;随后,本文对 P2P 测量中的主动测量方法

和被动测量方法进行了系统的比较研究,总结了现有方法的不足,并指出了相应的改进方向;然后,本文着重对 P2P 测量研究的现状进行了分类综述,深入剖析了现有测量方案的缺陷与不足,指出了亟待解决的关键问题;最后,本文从推动 P2P 测量和应用发展的角度出发,对 P2P 测量未来的研究方向进行了讨论。

References:

- [1] Saroiu S, Gummadi PK, Gribble SD. A measurement study of peer-to-peer file sharing systems. In: Proc. of the Multimedia Computing and Networking 2002 (MMCN 2002). 2002. 156–170. <http://www.cs.washington.edu/homes/gribble/papers/mmcn.pdf>
- [2] Liang J, Kumar R, Ross KW. The KaZaA overlay: A measurement study. In: Proc. of the 19th IEEE Annual Computer Communications Workshop. 2004. <http://cis.poly.edu/~ross/papers/KazaaOverlay.pdf>
- [3] Liang J, Kumar R, Ross KW. Understanding KaZaA. 2004. <http://cis.poly.edu/~ross/papers/UnderstandingKaZaA.pdf>.
- [4] Liang J, Kumar R, Xi Y, Ross KW. Pollution in file sharing systems. In: Proc. of the IEEE Infocom 2005. 2005. <http://cis.poly.edu/~ross/papers/pollution.pdf>
- [5] Sen S, Wang J. Analyzing peer-to-peer traffic across large networks. In: Proc. of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement Workshop. 2002. <http://citeseer.ist.psu.edu/sen02analyzing.html>
- [6] Karagiannis T, Broido A, Brownlee N, Claffy KC, Faloutsos M. Is P2P dying or just hiding. In: Proc. of the IEEE Globecom 2004. 2004. 1532–1538. <http://www.caida.org/outreach/papers/2004/p2p-dying/p2p-dying.pdf>
- [7] Soldani C. Peer-to-Peer behavior detection by tcp flows analysis (End-of-Study Dissertation). University of Liège, 2004. http://www.run.montefiore.ulg.ac.be/~soldani/P2P_Behaviour_Detection.pdf
- [8] Sen S, Spatscheck O, Wang DM. Accurate, scalable in-network identification of P2P traffic using application signatures. In: Proc of the 13th Int'l WWW Conf. 2004. <http://www2004.org/proceedings/docs/1p512.pdf>
- [9] Karagiannis T, Broido A, Faloutsos M, Claffy KC. Transport layer identification of P2P traffic. In: Proc. of the 4th ACM SIGCOMM Conf. on Internet Measurement. 2004. 121–134. <http://www.caida.org/outreach/papers/2004/p2p-layerid/p2p-layerid.pdf>
- [10] Karagiannis T, Papagiannaki K, Faloutsos M. BLINC: Multilevel traffic classification in the dark. In: Proc. of the 2005 Conf. on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. 2005. 229–240. http://www.cs.ucr.edu/~tkarag/papers/BLINC_TR.pdf
- [11] Zander S, Nguyen T, Armitage G. Automated traffic classification and application identification using machine learning. In: Proc. of the IEEE 30th Conf. on Local Computer Networks (LCN 2005). 2005. 250–257. <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/LCN.2005.35>
- [12] Saddy W, Azzouna NB, Guillemin F. IP traffic classification via blind source separation based on jacobi algorithm. In: Freire MM, Chemouil P, Lorenz P, eds. Proc. of the ECUMN 2004. LNCS 3262, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 287–296.
- [13] Dedinski I, Meer HD, Han L, Mathy L. Cross-Layer peer-to-peer traffic identification and optimization based on active networking. In: Proc. of the 7th Int'l Working Conf. on Active and Programmable Networks. 2005. <http://www.dcs.gla.ac.uk/~joe/auxiliary/papers/Personal/IWAN05.pdf>
- [14] Ripeanu M, Foster I, Iamnitchi A. Mapping the gnutella network: properties of large-scale peer-to-peer systems and implications for system design. IEEE Internet Computing Journal, 2002,6(1):50–57.
- [15] Stutzbach D, Rejaie R, Sen S. Characterizing unstructured overlay topologies in modern P2P file-sharing systems. In: Proc. of the 5th ACM SIGCOMM Conf. on Internet Measurement. 2005. <http://www.imconf.net/imc-2005/papers/imc05files/stutzbach/stutzbach.pdf>
- [16] Jovanovic M, Annexstein F, Berman K. Modeling peer-to-peer network topologies through “small-world” models and power laws. In: Proc. of the IX. Telecommunications Forum TELFOR 2001. Belgrade, 2001. <http://www.telfor.org.yu/telfor2001/radovi/2-14.pdf>
- [17] Gummadi KP, Dunn RJ, Saroiu S, Gribble SD, Levy HM, Zahorjan J. Measurement, modeling, and analysis of a peer-to-peer file-sharing workload. In: Proc. of the 19th ACM Symp. on Operating Systems Principles (SOSP-19). 2003. 314–329. http://www.cs.toronto.edu/~stefan/publications/sosp/2003/p2p_cache.pdf

- [18] Chu J, Labonte K, Levine BN. Availability and locality measurements of peer-to-peer file systems. In: Proc. of the ITCOM: Scalability and Traffic Control in IP Networks. 2002. <http://citeseer.ist.psu.edu/551697.html>
- [19] Saroiu S, Gummadi PK, Gribble SD. Measuring and analyzing the characteristics of napster and gnutella hosts. *Multimedia Systems Journal*, 2003,8(5):170–184.
- [20] Stutzbach D, Rejaie R. Characterizing churn in peer-to-peer networks. Technical Report, CIS-TR-2005-03, University of Oregon, 2005.
- [21] CacheLogic Research. The true picture of P2P file sharing. 2004. <http://cachelogic.com/research/slide1.php>
- [22] Zhang YF, Lei LH, Chen CJ. Characterizing peer-to-peer traffic across Internet. In: Li M, *et al.*, eds. Proc. of the GCC 2003. LNCS 3032, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 388–395.
- [23] Plissonneau L, Costeux JL, Brown P. Analysis of peer-to-peer traffic on ADSL. In: Dovrolis C, ed. Proc. of the PAM 2005. LNCS 3431, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. 69–82.
- [24] Paxson V, Floyd S. Wide-Area traffic: The failure of Poisson modeling. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1995,3(3):226–244.
- [25] Joo SD, Lee CW, Chung YH. Analysis and modeling of traffic from residential high speed Internet subscribers. In: Kahng HK, Goto S, eds. Proc. of the ICOIN 2004. LNCS 3090, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 410–419.
- [26] Liu G, Hu MZ, Fang BX, Zhang HL. Explaining BitTorrent traffic self-similarity. In: Liew KM, Shen H, See S, *et al.*, eds. Proc. of the PDCAT 2004. LNCS 3320, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. 839–843.
- [27] Rosin A. Measuring availability in peer-to-peer networks. 2003. http://warhol.wiwi.hu-berlin.de/~fis/p2pe/paper_A_Rosin.pdf
- [28] Bhagwan R, Savage S, Voelker GM. Understanding availability. In: Kaashoek F, Stoica I, eds. Proc. of the IPTPS 2003. LNCS 2735, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 256–267.
- [29] Kutzner K, Fuhrmann T. Measuring large overlay networks—The overnet example. In: Proc. of the KiVS2005. 2005. <http://i30www.ira.uka.de/research/documents/p2p/2005/kutzner05overnet.pdf>
- [30] Christin N, Weigend AS, Chuang J. Content availability, pollution and poisoning in peer-to-peer file sharing networks. In: Proc. of the 6th ACM Conf. on Electronic Commerce (EC 2005). 2005. 68–77. <http://www.stanford.edu/~aweigend/ChristinWeigendChuang2005.pdf>
- [31] Andreolini M, Colajanni M, Lancellotti R. Peer-to-Peer workload characterization: techniques and open issues. In: Proc. of the Int'l Workshop on Hot Topics in Peer-to-Peer Systems (HOT-P2P 2004). 2004. 66–71. <http://doi.ieeeecomputersociety.org/10.1109/PTPSYS.2004.14>



刘琼(1959 -),女,云南昆明人,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为多媒体通信,网络测量.



杨海涛(1981 -),男,博士生,主要研究领域为P2P技术,网络测量.



徐鹏(1981 -),男,博士生,主要研究领域为P2P技术,网络测量.



彭芸(1982 -),女,硕士生,主要研究领域为多媒体通信,网络测量.