

# 基于反馈原理及 Kalman 算法的 P2P 流量控制研究

郭 伟 刘 坤 肖 振 久

(辽宁工程技术大学软件学院 葫芦岛 125105)

**摘 要** 针对 P2P 应用消耗大量网络带宽而影响互联网传统业务服务质量的问题,提出了一种基于反馈原理及 Kalman 算法的 P2P 流量控制方案。本方案借助控制论中的反馈原理,对互联网中的 P2P 流量进行调节控制,较好地解决了 P2P 流量抢占大量网络带宽的问题。仿真研究表明:本方案能抑制过高流量,提高过低流量,使对等端发送速率可快速响应网络状态的变化,有效避免拥塞的发生,并使链路带宽得以充分利用。

**关键词** P2P 流量,流量控制,反馈原理,Kalman 算法

**中图法分类号** TP393 **文献标识码** A

## Research on P2P Traffic Control Based on Feedback Theory and Kalman Algorithm

GUO Wei LIU Kun XIAO Zhen-jiu

(College of Software, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract** With the increasing number of P2P users, P2P applications are consuming most of the Internet bandwidth, otherwise they have a negative effect on traditional Internet applications. In order to solve this problem, a P2P traffic control method based on feedback principle and Kalman algorithm was presented. By means of feedback principle in control theory and Kalman algorithm, the P2P traffic can be regulated and controlled properly. The experimental results show it can not only reduce the high P2P traffic, but also improve the low P2P traffic. It can make the peers to respond to the changes of network status rapidly and utilize the bandwidth sufficiently.

**Keywords** P2P traffic, Traffic control, Feedback theory, Kalman algorithm

## 1 引言

随着互联网的普及和宽带技术的发展,以 Peer-to-Peer (P2P)技术为核心的各种应用日趋成熟,P2P 系统流量比例也越来越大。德国 Ipoque 公司在 2010 年的测量结果显示,P2P 流量已经占互联网总流量的 49%到 83%,深夜时分甚至可以超过 95%。而根据中国运营商的统计,P2P 白天占总流量的 35%到 60%,晚上占 50%到 90%<sup>[1]</sup>。

P2P 软件的大规模应用给网络服务提供商(ISP)带来了巨大挑战,已成为带宽的最大消耗者<sup>[2]</sup>。为应对带宽紧张的挑战,很多 P2P 管理系统应运而生,它们试图控制、封杀掉 P2P 流量,但是 P2P 软件也开始采用加密报文、协议伪装、加密目标地址等方式,成功避免了 P2P 管理系统的监控<sup>[3]</sup>。因此,提供商必须采用更合理的方法来面对这一挑战。由于 P2P 流量是在节点之间产生的,而节点的选择是灵活多变的,通过改进上传节点的选择机制来改善网络中 P2P 流量的分布是一种行之有效的办法。控制 P2P 流量的其他尝试包括在网间加入 P2P 流量缓存,以减少网间主要链路上的 P2P 流量。“oracle”<sup>[4]</sup>、P2P caching<sup>[5]</sup>等技术正是这些领域的一系列探索,但是它们需要硬件设施的辅助,从而加重了 P2P 应用软件的开销。基于控制论中的反馈原理,结合 Kalman 算法,提出了一种 P2P 流量反馈控制模型,它能够根据 P2P 网络终

端请求节点流量的大小决定上传节点的选择,较好地解决了 P2P 流量过大而大量消耗网络带宽的问题。

## 2 P2P 流量管理现状及流量控制机制

P2P 网络是一种忽略物理连接方式的网络应用层概念,节点之间在应用层的联通关系是研究的重点。与传统 C/S 模式网络相比,P2P 应用能提供丰富的内容并且具有良好的扩展性和互动性。Yang<sup>[6]</sup>研究了在 P2P 系统中文件传播的性能。研究表明,当大量用户积极地加入 P2P 系统时,系统提供内容服务的能力随运行时间呈现指数增长。Sen、Wang<sup>[7]</sup>研究了 P2P 流量在大型网络中的流向问题。这些研究表明,P2P 系统拥有独特的体系结构,使其服务能力与用户数呈现出一种正相关性,这一点相对于 C/S 模式网络体现了极大的优越性。

根据服务类型、网络拓扑结构、数据传输方式等,能将 P2P 系统进行如下分类:

按服务类型,P2P 通常被用来实现如下积累服务功能:提供文件共享,如 Bittorrent、eMule、迅雷等;流媒体 P2P 系统,如 PPlive、PPStream 等。

按拓扑结构,根据网络拓扑组织和查询方式,可将常见的 P2P 系统分为以下几类:中心化拓扑结构,如 Napster、BT、eMule 以及 PPlive 等;全分布式拓扑结构,如 Gnutella;半分

到稿日期:2012-01-04 返修日期:2012-04-09 本文受国家 863 计划项目(2008AA01A318-0)资助。

郭 伟(1970-),女,硕士,副教授,主要研究方向为计算软件与理论、智能数据处理,E-mail: guow9966@163.com;刘 坤(1985-),男,硕士,主要研究方向为数字版权管理、P2P 网络;肖振久(1969-),男,博士生,副教授,主要研究方向为信息安全。

布式拓扑结构,如 Gnutella2。

按数据传输方式分单源和多源:在单源传输方式下,数据只在两点之间传送,一方发送,另一方接收,速率受到收发双方链路带宽限制。当多个节点同时可提供该资源时,节点也只能从一个源节点获取资源。即时通讯交流类 QQ、MSN,文件共享系统如 Napster、Gnutella 等节点间传输数据都属于这一模式。在多源传输方式下,整个数据内容被虚拟分为一定大小的若干部分,一个节点可以从不同的节点同时下载同一资源(文件)的不同部分,在节点拥有了至少一个块后,它也可以同时向其它节点提供上传服务。单个节点所提供的上传带宽可能不高,但多个节点的上传带宽相加就会很高,这有效地加快了资源的传播速度,同一个资源参与共享的节点数越多,速度就越快。BT、eMule、PPlive、迅雷等 P2P 系统都采用了这种模式。

### 3 P2P 流量反馈控制系统

#### 3.1 P2P 系统流量形成过程的分析

在文件共享和在线视频类的 P2P 系统中,用户只提出服务需求,节点的连接和流量的产生主要取决于系统本身。流量在 P2P 网络节点之间的分布状态不是随机形成的,除了受到网络环境等影响外,也受到 P2P 系统本身各种技术因素的影响。下面主要针对流量产生过程及影响流量在节点间的分布状态的技术因素进行分析。

一般 P2P 系统流量产生的简要过程描述如下。

首先对某 P2P 系统作如下定义:

**定义 1**  $P = \{p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, \dots, p_n\}$  是某 P2P 网络中的对等点,其中  $p_n$  表示 P2P 系统的终端对等点,  $\sum_{i=1}^n \{p_i\}$  表示节点  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$  中部分或全部节点上传流量之和。

**定义 2**  $V_n$  表示  $n$  的邻居节点集,即节点  $n$  能进行连接的所有节点的集合;

$Server$  表示 P2P 系统所拥有的中心服务器;

$P_S$  表示当前在上传或下载资源  $S$  及已经向网络  $N$  提出  $S$  需求的所有活动节点的集合,  $P_S$  是不断变化的;

$L_{S_n}$  表示  $P_n$  从 P2P 系统中获得的  $P_S$  内节点的信息列表,因为时间因素,所以  $L_{S_n}$  内有些节点在当前可能不属于  $P_S$ ;

$P_{S_n}$  表示当前  $p_n$  所能连接的  $P_S$  中的节点组成的集合,  $P_{S_n}$  是  $P_S$  的子集。

图 1 所示是一个 P2P 系统中文件共享的网络示意图。请求节点发出请求,上传节点响应后为其提供资源。

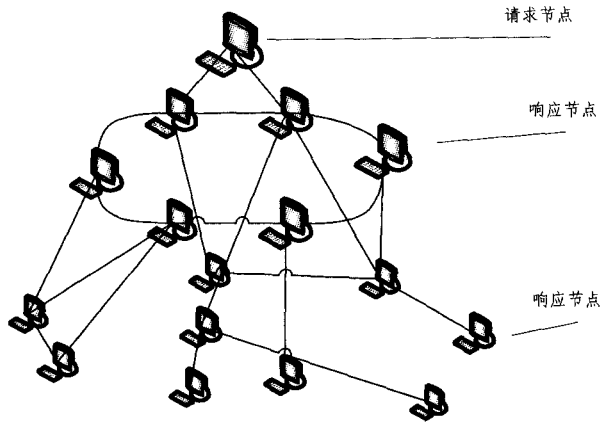


图 1 P2P 文件共享网络示意图

#### 3.2 流量反馈机制

图 2 所示是流量反馈模型,在 P2P 系统(如 BitTorrent)的终端设定一个流量监测器,它的作用是监测该 P2P 系统下载资源流量的大小,也就是通常所说的下载文件的速度,单位为 kB/s。在终端的监测器设定流量阈值为  $T$ (kB/s),而初始时刻下载流量为  $y_i(t)$ (kB/s),P2P 网络流量模型可由下列微分方程确定:

$$y_i(t) = \int_0^t [u_i(t - \tau_i) \pm u_{ci}(t)] dt$$

式中,  $y_i(t)$  表示  $t$  时刻下载终端的实时流量,  $u_i(t)$  表示不经反馈系统获得的流量大小,  $u_{ci}(t)$  表示经反馈系统反馈回的流量大小,  $\tau_i$  表示延时。

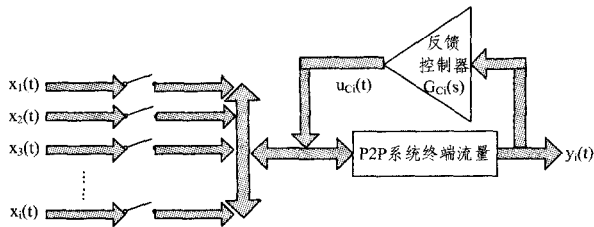


图 2 流量反馈控制模型

其反馈机制描述如下。

1) 当初始下载流量  $y_i(t) < T$  时,监测器就会启动并连接其它排队等候上传资源的节点开始为该节点上传,流量逐渐增加,直到  $y_i(t) = T$ (理论上),此时监测器停止继续启动其它节点,并维持现有节点的资源上传流量。

2) 当初始下载流量  $y_i(t) > T$  时,监测器就会关闭正在上传的某些节点,使其流量逐渐减小,最终达到  $y_i(t) = T$ ,并维持现有节点资源上传流量。

#### 3.3 P2P 流量反馈的基本过程

由上所述,P2P 流量反馈系统中发生流量的一般过程描述如下。

- 1) 请求节点  $p_0$  开始运行,进入该 P2P 网络正常工作;
- 2)  $p_0$  向  $Server$ (有中心服务器的 P2P 系统,如 BT 等)或  $V_0$ (无中心服务器的 P2P 系统,如 Gnutella)中的节点发送需求  $S$  的消息;
- 3)  $Server$  或  $V_0$  中的节点向  $p_0$  发送、提供  $L_{S_0}$ ;
- 4) 根据  $L_{S_0}$ ,  $p_0$  与  $L_{S_0}$  包含的各个节点进行连接,能够连接的节点即构成了集合  $P_{S_0}$ ;
- 5) 向  $P_{S_0}$  内的节点发送  $S$  的下载请求;
- 6)  $P_{S_0}$  内各节点回复  $p_0$  的下载请求,开始上传,产生节点间的流量  $y_i(t)$ ;
- 7) 若  $y_i(t) < T$ ,则发送更多的下载请求,排队等候的节点回复  $p_0$  的下载请求,使其流量增加,直到  $y_i(t) = T$ ;若  $y_i(t) > T$ ,则关闭某些正在上传资源的节点,使其流量减少,直到  $y_i(t) = T$ ;
- 8) 根据下载状况,重复进行 3)~7)步,直至  $p_0$  获得完整的资源  $S$ ;
- 9)  $p_0$  退出,  $P_S$  退出  $N$ 。

在图 2 流量反馈控制模型中,  $G_{ci}(s)$  为反馈控制器的传递函数,  $y_i(t)$  是请求节点流量,  $x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_i(t)$  分别为节点  $p_1$  到  $p_n$  的上传流量,由流量反馈控制器监测并控制输出的  $y_i(t)$  的流量大小,并选择  $p_1$  到  $p_n$  的部分或全部节点为请求节点提供上传服务。现按 Kalman 算法<sup>[8]</sup>,对闭环

控制系统的输出和反馈控制器的输出同时提出规定来设计流量监测器,在设计反馈控制算法时不考虑其它因素的影响。为了使 P2P 系统的流量输出具有快速性,但又不对流量控制系统提出过高的要求,把整个 P2P 系统看成一个闭环控制系统。其输出能在过程纯时滞以后的两个采样周期内达到最终值 1,并一直保持下去,这样可取(由于对某一特定缓冲队列的控制进行分析,故将下标  $i, j$  略去):

$$Y(z) = (cz^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + \dots) \cdot z^{-d} \quad (1)$$

即可得所需的闭环脉冲传递函数:

$$\begin{aligned} G(z) &= \frac{Y(z)}{X(z)} = (1-z^{-1})(cz^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + \dots) \cdot z^{-d} \\ &= [cz^{-1} + (1-c)z^{-2}] \cdot z^{-d} \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $Y(z), X(z)$  分别为  $y(t), x(t)$  的  $z$  变换,  $c$  为 0 到 1 之间的任意实数,  $d$  为正整数,  $T_s$  为采样周期。同样,在设定值做单位阶跃变化时,也规定反馈控制器的输出经两次切换到达其终值 0,即取

$$U_c(z) = u_0 + u_1 z^{-1} \quad (3)$$

式中,  $U_c(z)$  为控制器输出  $U_c(t)$  的  $z$  变换,  $u_0$  和  $u_1$  为任意实数。由图 2 所示的反馈控制系统可得控制器的脉冲传递函数:

$$G_c(z) = \frac{1}{H_p(z)} \cdot \frac{G(z)}{1-G(z)} \quad (4)$$

式中,

$$H_p(z) = \frac{z^{-d} T_s}{z-1} = \frac{Y(z)}{U_c(z)} \quad (5)$$

将式(1)~式(3)代入式(4)即得所求的 Kalman 控制算式:

$$G_c(z) = \frac{u_0 + (u_1 - u_0)z^{-1} - u_1 z^{-2}}{1 - cz^{-1} - (1-c)z^{-2}}$$

由式(5)得:

$$cz^{-1} + (1-c)z^{-2} = T_s(u_0 z^{-1} + u_1 z^{-2})$$

进而得到:

$$c = T_s u_0, 1 - c = T_s u_1$$

可见, Kalman 控制算式可由  $u_0$  或  $c$  确定,由其构成的流量反馈控制系统的闭环特征方程不存在纯滞后环节,因此能较好地克服网络的传播延时对整个 P2P 系统的影响;且其算法的复杂度很低,对计算机软件来说是相当简单的,能很好地满足网络流量控制所需的简单性的要求。

#### 4 仿真实验及分析

为分析和验证流量反馈机制,对其进行了仿真测试,在一台局域网网关用命令 iptables-A FORWARD-mipp2p\_m-bit-j ACCEPT 配置 Netfilter,使其调用 IPP2P\_M 模块。该局域网内常用的 P2P 软件主要是 BitTorrent,所以协议项仅完成对 BitTorrent 软件的流量测量。用户界面编程选择了容易移植的 Java 环境,仿真实验假设了初始流量超过阈值和低于阈值两种情况,仿真的网络环境为:节点总数为 50 个,处于积极状态,并在积极状态下 100% 发送文件请求。在仿真中设定流量监测器阈值  $T=1024\text{KB/s}$ ,为了便于比较,还给出了无反馈模型下 P2P 系统的流量曲线。

如图 3 所示,在无反馈模型的 P2P 系统中,资源丰富的

节点流量会快速增加并维持在一个很大的值附近,占用较大带宽;而资源较差的节点则无法正常完成文件的下载。

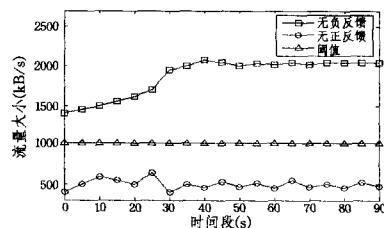


图 3 无反馈模型的 P2P 流量曲线

图 4 所示曲线是流量反馈模型作用的结果。由图可知,该模型能够通过反馈原理,对于资源丰富的节点抑制其下载速度,并使其维持在一个设定的阈值附近;对于资源匮乏的节点,能够帮助连接启动其它空闲节点,为其提供上传服务。

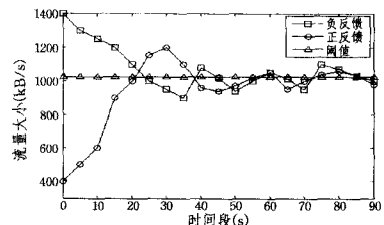


图 4 反馈模型的流量曲线

**结束语** P2P 应用占用大量网络带宽,成为了困扰网络运行商的一个难题。随着网络的发展,P2P 应用会越来越广泛,控制 P2P 流量、减缓带宽压力成为一种必要手段。基于控制论的反馈原理以及 Kalman 算法提出一种 P2P 流量反馈控制模型,它能有效控制 P2P 网络中的资源流量,节省大量网络带宽,同时使 P2P 网络稳定运行,最大限度满足用户的需求。本模型有着良好的精度与较高的运行效率,对 P2P 流量控制有一定的研究价值。

#### 参考文献

- [1] 王春刚,王会,杨家海. P2P 技术分析与流量管理研究[J]. 计算机科学, 2010, 37(4): 1-6, 10
- [2] 陈海军,李仁发,杨磊. 基于 Linux 内核扩展模块的 P2P 流量控制[J]. 计算机工程, 2007, 1(33): 176-177, 183
- [3] Thomas K, Andre B, Nevil B, et al. Is P2P dying or just hiding? [A]//GLOBECOM[C]. IEEE Computer Society Press, 2004
- [4] Aggarwal V, Feldmann A, Scheidele C. Can ISPs and P2P systems cooperate for improved performance? [J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2007, 37: 31-40
- [5] Saleh O, Hefeeda M. Modeling and caching of peer-to-peer traffic[A]//Proc. of IEEE ICNP 2006[C]. Santa Barbara, CA, 2006
- [6] Yang X, Veciana G D. Service capacity peer-to-peer networks [A]// Proc. IEEE Infocom' 04 [C]. HongKong, China, March 2004: 1-11
- [7] Sen S, Wang J. Analyzing Peer-to-Peer Traffic Across Large Networks [C]// ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop. 2002
- [8] 沈伟,冯瑞,邵惠鹤. 基于 Kalman 算法及神经网络预测的网络流量控制[J]. 计算机研究与发展, 2003(8): 1162-1167