

具有最小平方误差积分的主动队列管理算法 ISE-GPM-PID

汪 浩¹ 严 伟² 黄明和¹ 郭 斌¹

(江西师范大学软件学院 南昌 330022)¹

(北京大学信息科学技术学院光纤通信系统与网络国家重点实验室 北京 100871)²

摘 要 随着互联网流媒体应用的增多,流媒体流量在互联网总流量中所占比例越来越大。流媒体流量具有时延敏感和容忍丢包等特点,通常采用 UDP 协议传输;UDP 流量是对 TCP/AQM 模型的干扰流量,但现有针对 TCP 长流设计的主动队列管理算法缺乏抗击 UDP 流量干扰的能力,不能适应互联网视频和音频流量日益增多的局面。利用 TCP/AQM 模型,设计了一个具有最小平方误差积分,且相角裕度在 30° 至 60° 之间,幅值裕度在 2 至 5 之间的基于 PID 控制器的主动队列管理算法 ISE-GPM-PID。该算法对 UDP 流量具有良好的抗干扰能力,能适应互联网流媒体和 Web 应用日益增多的局面;同时其响应速度快,计算开销小,能用于大时滞网络环境,且鲁棒性好。

关键词 拥塞控制,主动队列管理(AQM),稳定裕度,大时滞网络,流媒体

中图分类号 TP393.2

文献标识码 A

New AQM Algorithm ISE-GPM-PID with Least Square Error Integral

WANG Hao¹ YAN Wei² HUANG Ming-he¹ GUO Bin¹

(School of Software, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)¹

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)²

Abstract With the increase of the streaming media applications in the Internet, streaming media traffic on the Internet is growing rapidly. Streaming media traffic is transmitted by UDP protocol since it has delay-sensitive and loss-tolerant characteristics. However, the existing active queue management algorithm based on TCP long flows is lack of the ability to fight against UDP traffic interference. In the paper, an active queue management algorithm ISE-GPM-PID was designed with least square error integral based on PID using TCP/AQM model. In addition, the algorithm ISE-GPM-PID has the phase margin between 30° to 60° and the amplitude margin between 2 to 5. The ISE-GPM-PID is able to fight against UDP traffic interference and adapts to the Internet streaming media and Web applications. At the same time, the algorithm also has fast response time, small computing cost and good robustness, and can be used in large delay network environment.

Keywords Congestion control, Active queue management (AQM), Stability margin, Large delay network, Stream media

1 引言

随着互联网流媒体应用(视频会议、视频点播、视频分享、视频聊天和 IP 电话)的增多,流媒体流量在互联网总流量中所占比例越来越大。流媒体流量具有时延敏感(delay-sensitive)和容忍丢包(loss-tolerant)的特点,并且通常采用 UDP 协议传输。如果网络发生拥塞,会导致视频画面停顿或声音延迟等现象。互联网拥塞控制机制由路由器上的主动队列管理(Active Queue Management,简称 AQM)和 TCP 端到端拥塞控制算法组成。AQM 算法通过随机丢弃 IP 包,实现调节 TCP 拥塞窗口大小和路由器队列长度的目标。文献[1,2] 针对 TCP 长流给出了 TCP 拥塞窗口和路由器队列长度变化规

律的流模型(以下简称 TCP/AQM 模型),并在“小信号”条件下线性化后,将 AQM 算法的设计问题转化成控制论中“控制器”的设计问题,摆脱了依据经验和直觉设计 AQM 算法的局限,因此也将 AQM 算法称为 AQM 控制器,其被控对象是 TCP 窗口大小和路由器队列长度。从“控制器”设计的角度看,UDP 流量可视为对 TCP/AQM 模型的干扰信号,但许多针对 TCP 长流设计的 AQM 算法缺乏对 UDP 流量的控制能力,即抗干扰能力弱,不能适应互联网上音频和视频流量日益增多的局面。表 1 总结了一些有代表性的 AQM 算法的优缺点。

从表 1 可以看出,尽管 Hollot-PI 算法稳定性比 RED 算法好,但 Hollot-PI 算法的响应速度太慢,抗干扰能力弱,不能

到稿日期:2011-03-30 返修日期:2011-07-29 本文受国家科技部 973 项目(2009CB320504),国家科技支撑计划(2008BAH37B09),江西省教育厅科技项目(GJJ08153),江西师范大学博士启动基金,江西师范大学科研计划项目资助。

汪 浩(1962—),男,博士,教授,主要研究方向为网络拥塞控制、QoS, E-mail: wanghao@jxnu.edu.cn; 严 伟(1961—),女,硕士,副教授,主要研究方向为移动计算; 黄明和(1955—),男,教授,主要研究方向为并行计算; 郭 斌(1970—),男,硕士,副教授,主要研究方向为拥塞控制、QoS。

适应目前互联网流媒体应用中 UDP 流量日益增多的现状; Self-tuning PI、R-PI、P2I、Fuzzy PI 等算法的计算开销太大, 从而会降低路由器转发 IP 包的效率, 增加 IP 包的处理时延; PIP、PAQM、Pre-PID 等算法设计时忽略了 TCP/AQM 模型的时滞参数, 从而不能用于 Internet 这类有较大时滞的广域网络环境; REN-PID、DC-AQM、IMC-Smith、Pre-PID、LQR-PID 等算法的抗干扰能力较弱(即缺乏抗击 TCP 短流和 UDP 流量干扰的能力), 随着 Internet 中多媒体业务流量(IP 电话/视频点播)的增加, 算法会变得不稳定。

表 1 若干有代表性的 AQM 算法的优缺点

算法	发表年份	优点	缺点
Hollot-PI ^[1,2]	2001	稳定性比 RED 好	响应速度太慢, 抗干扰能力弱
Self-tuning PI ^[3-5]	2007	响应速度快	与 PI 或 PID 相比, 算法太复杂, 算法计算开销大
R-PI ^[6]	2004	响应速度快	与 PI 或 PID 相比, 算法复杂, 算法计算开销大
P ² I ^[7]	2002	响应速度快	与 PI 或 PID 相比, 算法复杂, 算法计算开销大
Fuzzy PI ^[8]	2004	响应速度快	与 PI 或 PID 相比, 算法复杂, 算法计算开销大
PIP ^[9]	2003	响应速度快 抗干扰能力强	不能用于大时滞网络环境 ^[10]
PAQM ^[11]	2004	响应速度快	不能用于大时滞网络环境
REN-PID ^[12]	2003	响应速度快 算法简单	抗干扰能力较弱
DC-AQM ^[13,14]	2005	响应速度快 算法简单	抗干扰能力较弱
IMC-Smith ^[15]	2006	能用于大时滞网络环境	
Pre-PID ^[16]	2003	响应速度快 算法简单	抗干扰能力较弱 不能用于大时滞网络环境
LQR-PID ^[17]	2004	响应速度快 算法简单	抗干扰能力较弱
基于速率和队长的大时滞网络 AQM 算法 ^[18]	2010	能用于大时滞网络环境	抗干扰能力较弱

随着互联网流媒体应用的增多, 我们认为, 一个好的 AQM 算法/AQM 控制器, 除了要满足稳定性的要求外^[1,2], 还应具备如下特性。

1) 抗干扰能力强: 非响应业务流量(UDP 流和 TCP 短流)可以看成是对 AQM 算法的干扰。随着分布式多媒体应用和 Web 应用的普及, 非响应业务流量越来越多, 因此希望 AQM 算法对 TCP 短流和 UDP 流有良好的控制能力。

2) 鲁棒性好: 鲁棒性是指当网络特征参数(即往返时延 RTT、通过瓶颈链路的 TCP 连接数、瓶颈链路的容量)发生变化时, AQM 算法仍能保持稳定的能力。

3) 响应速度快(或者调节时间短): 当网络流量发生变化时, 路由器缓存队列瞬时长度回到参考队列长度附近的时间称为调节时间, 调节时间越短越好。

4) 能用于大时滞网络环境: 由于 Internet 是全球性的广域网络, 时滞(即 RTT)变化大, 因此希望 AQM 算法在大时滞网络环境下仍具备良好的性能。

5) 算法简单, 计算开销小: 由于路由器面临转发大量 IP 包的繁重任务, 因此希望 AQM 算法判断网络是否发生拥塞, 计算“丢包”概率的开销要小, 以提高路由器转发 IP 包的效率。

本文创新点: 为了达到抗 UDP 流量和 TCP 短流干扰的目标, 在设计 AQM 控制器的过程中, 引入了干扰信号; 为了达到鲁棒性的目标, 期望 AQM 控制器的相角裕度在 30°至 60°之间, 幅值裕度在 2 至 5 之间; 为了达到响应速度快的目标, 利用最小平方误差积分(ISE)控制路由器瞬时队列长度与期望队列长度的误差; 为了使 AQM 算法能用于大时滞网络环境, 采用了时滞系统控制理论的方法; 为了达到算法简单(计算开销小)的目标, 采用了基于 PID 的 AQM 控制器。以上述目标为出发点, 设计了一个具有最小平方误差积分和期望稳定裕度的基于 PID 控制器的 AQM 算法 ISE-GPM-PID, 该算法不仅保持了表 1 中各算法的优点, 而且克服了表 1 中各算法的缺点; 即该算法同时具备抗干扰能力强、响应速度快、计算开销小、能用于大时滞网络环境, 且鲁棒性好等特点。借助于 NS2 仿真实验, 我们充分地验证了这些特性。因此, ISE-GPM-PID 算法能更好地适应当前互联网流媒体和 Web 应用日益增多的局面。

2 相关研究

文献[1,2]用非线性微分方程刻画了 TCP 长流在拥塞避免阶段拥塞窗口变化和路由器队列长度变化之间规律的 TCP/AQM 模型, 并提出了一种基于 PI 控制器的 AQM 算法, 简称 Hollot-PI 算法; 但 Hollot-PI 存在调节时间太长(即响应速度太慢)、抗干扰能力弱的不足(即不能有效控制非响应业务流量造成的网络拥塞)。

文献[3,4]提出了参数自整定的 PI 算法 Self-tuning PI, 其基本思想是实时监控系统的幅值裕度和相角裕度的变化, 当其不在指定范围内时, 重新计算 PI 控制器的参数。此外, Self-tuning PI 还需要动态估计网络的特征参数^[5]。Self-tuning PI 的不足是监控系统幅值裕度和相角裕度变化的计算公式特别复杂, 导致计算开销特别大, 从而会极大地降低路由器的工作效率。文献[6]设计的 R-PI 算法在 Hollot-PI 前增加了一个非线性增益函数, 在加快算法响应速度的同时, 增加了算法的复杂性。

文献[7]结合 P 控制器和 PI 控制器各自的优点, 提出了 P²I 算法, 基本思想为: 当网络流量比较平稳时, 使用 Hollot-PI 控制器进行控制; 当网络流量剧烈振荡时, 使用 P 控制器进行控制。由于 P²I 算法要在 P 控制器和 PI 之间切换, 因此增加了算法的复杂性; 算法使用队列长度的阈值来控制算法在 PI 控制器和 P 控制器之间切换, 但在阈值的设置上并没有太多的指导性原则。

文献[8]基于模糊控制的 Fuzzy-PI 具有 PI 控制器控制准确的特点, 反应速度要比 PI 控制器快, 但算法复杂。

文献[9]利用位置反馈校正的方法, 提出了 PIP 算法, 其响应速度非常快, 有较强的抗干扰能力, 但 PIP 算法忽略了 TCP/AQM 模型的时滞环节, 当 RTT 较大时(如 Internet 广域网环境), 队列振荡幅度也较大^[10], 故不能用于大时滞网络环境(如广域网和卫星网)。

文献[11]提出的 PAQM 同样忽略了 TCP/AQM 模型的时滞环节, 故也不能用于大时滞的网络环境。

文献[12]通过指定幅值裕度和相角裕度, 设计了一个具有指定稳定裕度的 AQM PID 算法(本文后续部分称其为

REN-PID)。REN-PID 算法在响应业务流量下的性能比 Hollot-PI 算法好,但由于在设计 PID 控制器时没有考虑到来自外界的干扰因素,故算法在非响应业务流量下的性能不太好。

文献[13-15]针对 Hollot-PI 不能用于大时滞网络环境的不足,利用内模控制原理(IMC),设计了能用于大时滞网络环境的 AQM PID 算法 DC-AQM 和 IMC-Smith。尽管这类算法在响应业务流量下的性能很好,但正如文献[18]指出的那样,IMC 控制器具有较好的跟踪参考点变化的能力,但抗干扰能力较弱。在实际的网络环境中,基于 IMC 控制器的 AQM PID 算法极易受到来自短效 TCP 流和 UDP 流的干扰,此时 AQM PID 算法的响应时间较长。图 1 是 DC-AQM 算法在短效 TCP 流和 UDP 流作用下的瞬时队列长度变化图(参考队列长度 $q_0=200$)。

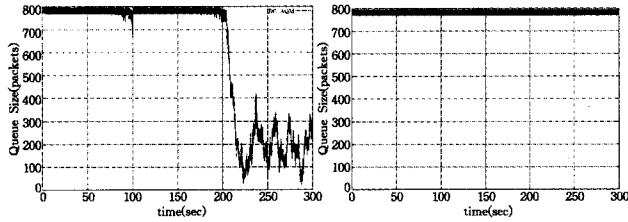


图 1 DC-AQM 的瞬时队列长度 图 2 LQR-PID 的瞬时队列长度

文献[16]利用时域设计方法设计了一个 AQM PID 控制器 Pre-PID,由于设计 AQM 控制器的过程中忽略了 TCP/AQM 模型的时滞环节,故算法同样不能用于大时滞网络环境。

文献[17]利用线性二次调节器(LQR),设计了一个 AQM PID 算法 LQR-PID。但实验表明 LQR-PID 的抗干扰能力较差。图 2 是 LQR-PID 算法在短效 TCP 流和 UDP 流作用下的瞬时队列长度变化图。

文献[18]利用缓冲区队列长度和包到达速率作为网络拥塞的判别依据,在模糊 PID 控制方法中加入速率控制项,模拟实验表明该算法能用于大时滞网络,但算法在设计时没有考虑 UDP 流量和 TCP 流量对 TCP/AQM 模型的干扰,从而不能适应目前互联网多媒体应用和 Web 应用日益增多的现状。

3 ISE-GPM-PID 算法的控制论原理

AQM 控制器的被控对象是 TCP 窗口大小和路由器队列长度,文献[1,2]给出了 AQM 控制器的被控对象传递函数模型(也称为 TCP/AQM 模型):

$$G(s) = \frac{K_f e^{-sR}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \quad (1)$$

式中, $K_f = \frac{(RC)^3}{4N^2}$, $T_1 = R$, $T_2 = \frac{R^2 C}{2N}$, C 为瓶颈链路的容量, N 为通过瓶颈链路的 TCP 连接数, R 为往返时延 RTT。于是设计 AQM 算法的问题转变成了设计 AQM 控制器的问题。

为了利用时滞系统控制理论,首先需要把 TCP/AQM 模型的二阶时滞系统,用一阶时滞系统进行拟合。按文献[14]提供的方法,可以用式(2)对应的一阶时滞系统拟合式(1)对应的二阶时滞系统:

$$\hat{G}(s) = \frac{K e^{-sL}}{T s + 1} \quad (2)$$

式中, $K = K_f$, $T = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}$, $L = T_1 + T_2 + R - \sqrt{T_1^2 + T_2^2}$ 。

为了使 AQM 控制器达到抵抗 UDP 流量和 TCP 短流干扰的目标,在设计 AQM 控制器的过程中,引入了干扰信号 $u(t)$ (见图 1);为了达到鲁棒性的目标,通过整定 AQM 控制器的参数,使得控制系统的相角裕度在 30° 至 60° 之间,幅值裕度在 2 至 5 之间;为了达到响应速度快的目标,利用最小平方误差积分(ISE)控制路由瞬时队列长度与期望队列长度的误差;为了达到算法简单(计算开销小)的目标,采用了基于 PID 的控制器。

图 3 是引入干扰信号后的基于 PID 控制器的 AQM 算法闭环控制系统,其中 PID 控制器的传递函数为:

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = k_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) \quad (3)$$

且

$$k_p = k_c, k_i = \frac{k_c}{T_i}, k_d = k_c T_d \quad (4)$$

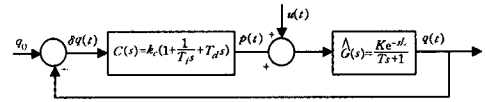


图 3 由 AQM 控制器组成的闭环控制系统

图 1 中, q_0 是路由器的期望队列长度, $q(t)$ 是路由器的瞬时队列长度, $\delta q(t) = q(t) - q_0$, $p(t)$ 是丢包概率。假设控制系统的期望相角裕度为 ϕ_m , 幅值裕度为 A_m , 根据相角裕度和幅值裕度的定义得:

$$\phi_m = \arg[C(j\omega_g) \hat{G}(j\omega_g)] + \pi \quad (5)$$

$$A_m = \frac{1}{|C(j\omega_p) \hat{G}(j\omega_p)|} \quad (6)$$

截止频率 ω_g 和 ω_p 分别满足:

$$|C(j\omega_g) \hat{G}(j\omega_g)| = 1 \quad (7)$$

$$\arg[C(j\omega_p) \hat{G}(j\omega_p)] = -\pi \quad (8)$$

将式(2)和式(3)代入式(5)至式(8)得:

$$\phi_m = \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{T_i \omega_g}{1 - T_i T_d \omega_g^2}\right) - \arctan(T \omega_g) - L \omega_g \quad (9)$$

$$A_m = \frac{T_i \omega_p}{k_c K} \sqrt{\frac{1 + T^2 \omega_p^2}{(1 - T_i T_d \omega_p^2) + T_i^2 \omega_p^2}} \quad (10)$$

$$\frac{T_i \omega_g}{k_c K} \sqrt{\frac{1 + T^2 \omega_g^2}{(1 - T_i T_d \omega_g^2) + T_i^2 \omega_g^2}} = 1 \quad (11)$$

$$\frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{T_i \omega_p}{1 - T_i T_d \omega_p^2}\right) - \arctan(T \omega_p) - L \omega_p = 0 \quad (12)$$

在式(9)至式(12)构成的方程组中, ϕ_m , A_m , T , L 和 K 是已知量; ω_g , ω_p , k_c , T_i 和 T_d 是未知量;总共有 4 个方程、5 个未知量,无法解得全部未知量。为了使得闭环系统有较好的瞬态性能,引入“平方误差积分(ISE)”目标函数:

$$J_o(\theta) = \int_0^\infty [\delta q(\theta, t)]^2 dt \quad (13)$$

式中, θ 为参数 $(\omega_g, \omega_p, k_c, T_i, T_d)$, 且用 $q(\theta, t)$ 表示瞬时队列长度, $\delta q(\theta, t) = q(\theta, t) - q_0$ 。最小 ISE 的优化目标是:“在式(9)至式(12)的约束下寻找使 $J_o(\theta)$ 最小的 θ ”,即在满足所期望的相角裕度和幅值裕度的条件下,寻找使得路由器瞬时队列长度 $q(t)$ 在期望队列长度 q_0 附近小幅摆动的 PID 控制器。通过使平方误差积分(ISE)最小,可以达到“路由器队列的瞬

时长度”在“路由器队列的期望长度”之间小幅摆动的目标,从而使 IP 分组在路由器中的“排队时延”在“期望时延”之间小幅摆动,达到实施拥塞控制的目标。

记 $\delta q(\theta, t)$ 的 Laplace 变换为 $E(s)$, 瞬时队列长度 $q(t)$ 的 Laplace 变换为 $Q(s)$ 。如果输入信号 $r(t)$ 和干扰信号 $u(t)$ 为单位阶跃函数, 则其 Laplace 变换为 $R(s)=U(s)=\frac{1}{s}$ 。于是:

$$Q(s) = \frac{\hat{G}(s)C(s)}{[1+\hat{G}(s)C(s)]s} + \frac{\hat{G}(s)}{[1+\hat{G}(s)C(s)]s} \quad (14)$$

$$E(s) = \frac{1}{s} - Q(s) \quad (15)$$

从而, 式(13)可以改写为:

$$J_0(\theta) = \int_0^\infty [\delta q(\theta, t)]^2 dt = \frac{1}{2\pi j} \int_{-\infty}^\infty E(s)E(-s)ds \quad (16)$$

因此需要在式(9)至式(12)的约束下寻找使得式(16)最小的 θ 。利用数值寻优方法和和曲线拟合方法, 文献[19]给出了此 PID 控制器的参数整定公式:

$$k_c = \frac{1.7022}{K} A_m^{-0.8432} \phi_m^{-0.116} \left(\frac{L}{T}\right)^{-0.908}, 2 \leq A_m \leq 5 \quad (17)$$

$$T_i = 1.2497 A_m^{-0.2099} \phi_m^{1.0082} \left(\frac{L}{T}\right)^{0.3678}, \frac{\pi}{6} \leq \phi_m \leq \frac{\pi}{3} \quad (18)$$

$$T_d = 0.4763 A_m^{-0.0961} \phi_m^{-0.328} \left(\frac{L}{T}\right)^{1.0317}, 0.1 \leq \frac{L}{T} \leq 1 \quad (19)$$

为了得到 ISE-GPM-PI 算法的参数, 令 $A_m=2, \phi_m=\frac{\pi}{6}$, 并用网络特征参数的典型值 $N=60, R=0.21, C=3750 \text{ packets/sec}$ 代入式(1)得 $T_1=0.21, T_2=1.378, K_f=33914.795$; 将 T_1, T_2 和 K_f 的值代入式(2)得 $T=1.3940332, L=0.404092, K=33914.795$; 将 T, L 和 K 的值代入式(17)至式(19), 得到式(3)所对应的 AQM PID 控制器:

$$C(s) = 9.283359154 \times 10^{-5} + \frac{1.866028799 \times 10^{-4}}{s} + 1.987271569 \times 10^{-5} s \quad (20)$$

式中, $k_p=9.283359154 \times 10^{-5}, k_i=1.866028799 \times 10^{-4}, k_d=1.987271569 \times 10^{-5}$ 。

为了用计算机程序实现算法 ISE-GPM-PID, 将式(3)所对应的 PID 控制器传递函数 $C(s)$ 改写成时域形式:

$$p(t) = k_p \delta q(t) + k_i \int \delta q(t) dt + k_d \frac{d\delta q(t)}{dt} \quad (21)$$

对式(21)离散化($k=1, 2, \dots$)得:

$$t \approx kT \quad (22)$$

$$\delta q(t) \approx \delta q(kT) \quad (23)$$

$$\int \delta q(t) dt \approx \sum_{j=0}^k \delta q(jT) T = T \sum_{j=0}^k \delta q(jT) \quad (24)$$

$$\frac{d\delta q(t)}{dt} \approx \frac{\delta q(kT) - \delta q((k-1)T)}{T} \quad (25)$$

式中, T 为采样周期, AQM 的文献习惯取 $1/160 \text{ s}$ [2]。将式(22)至式(25)代入式(21)并整理后得:

$$p(kT) = k_p \delta q(kT) + k_i T \sum_{j=0}^k \delta q(jT) + k_d \frac{\delta q(kT) - \delta q((k-1)T)}{T} \quad (26)$$

用 $k-1$ 替换式(26)中的 k 得:

$$p((k-1)T) = k_p \delta q((k-1)T) + k_i T \sum_{j=0}^{k-1} \delta q(jT) + k_d \frac{\delta q((k-1)T) - \delta q((k-2)T)}{T} \quad (27)$$

式(26)和式(27)相减, 经整理后得:

$$p(kT) = p((k-1)T) + a \delta q(kT) - b \delta q((k-1)T) + c \delta q((k-2)T) \quad (28)$$

式中, $p(0)=0, \delta q(kT)=q(kT)-q_0, a=k_p+k_i T+\frac{k_d}{T}, b=k_p+\frac{2k_d}{T}, c=\frac{k_d}{T}$ 。令采样周期 $T=1/160 \text{ s}$, 并将式(20)中的 $k_p, k_i,$

k_d 的具体值代入式(28)得:

$$a=0.00327363437, b=0.006452102612, c=0.00317963451 \quad (29)$$

根据式(28), 可得如下基于 PID 控制器的 AQM 算法 ISE-GPM-PID 的实现代码。

/* 输入参数: a, b, c, T, q₀, 其中 T=1/160 是采样周期, q₀ 是参考队列长度 */

/* 初始化 */

p=0 /* 丢包概率初值 */

pold=0;

qold=0;

qold2=0;

/* 每间隔 T 时段, 重新计算“丢包概率”p */

q=“取当前队列长度”;

p = pold + a * (q - q₀) - b * (qold - q₀) + c * (qold2 - q₀);

if p < 0 then p = 0;

if p > 1 then p = 1

pold = p;

qold2 = qold;

qold = q;

/* 当一个新包到达时, 按概率 p 丢弃该包 */

u = “生成一个 0~1 间均匀分布的随机数”;

If u <= p then “丢弃该包”;

4 ISE-GPM-PID 算法性能验证

本小节利用 NS2 验证 ISE-GPM-PID 算法的性能。实验采用 AQM 文献中常用的哑铃拓扑(见图 4), 其中瓶颈链路 N-D 的带宽 15Mbps, 延迟 5ms; 发送数据的源节点为 S₁, S₂, ..., S_n, S_i 到 N 间的带宽 15Mbps ($i=1, 2, \dots, n$), 延迟在 160ms 到 240ms 之间或 400ms 到 800ms 之间均匀分布; 接收数据的目标节点为 F₁, F₂, ..., F_n, D 到 F_i 间的带宽 45Mbps ($i=1, 2, \dots, n$), 延迟为 5ms 或 190ms; 参考队列长度(也称期望队列长度)q₀ 设置为 200 个 IP 包; 瓶颈链路 N-D 缓冲区大小为 800 个 IP 包(实验 7 为 400 个 IP 包)。

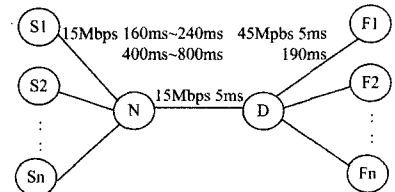


图 4 网络拓扑结构

模拟实验中,以有代表性的 Hollot-PI^[2]和 REN-PID^[12]作为对比算法。在展示每个实验的结果时,既给出反映算法动态特性的“瞬时队列长度变化图”(其横坐标为时间 time,单位 sec;纵坐标为队列长度 Queue Size,单位 packet),又给出反映算法统计特征的统计量,其作用陈述如下。

- 反映算法动态特性的“瞬时队列长度变化图”:该图反映了“模拟时间和瞬时队列长度”的关系,能用于观察当网络流量或特征参数变化时,算法的响应速度、稳定性、抗干扰能力等,以及各种流量的加入、退出对算法性能的影响。

- 反映算法统计特征的统计量。
- 平均队列长度:反映了端到端的平均时延。平均队列长度越短越好。
- 队列长度的标准差:用于衡量瞬时队列长度在 q_0 附近的振荡程度,反映了端到端的时延抖动。队列长度的标准差越小越好。
- 丢包率:反映 IP 包被丢弃的概率,丢包率越小越好。
- 链路利用率:反映瓶颈链路不空闲的概率,链路利用率越大越好。

受篇幅限制,仅给出反映 Hollot-PI 算法统计特征的统计量,不给出 Hollot-PI 算法的瞬时队列长度变化图。

由实验 1 至实验 7 的结果对比可知:

- 与 Hollot-PI 算法和 REN-PID 算法相比,当网络流量发生变化时,ISE-GPM-PID 算法的瞬时队列长度能更加迅速地收敛到期望队列长度附近。
- ISE-GPM-PID 算法的平均队列长度和队列长度的标准差要明显优于 Hollot-PI 算法和 REN-PID 算法。
- 3 个算法的丢包率和链路利用率没有明显差异,正负相差 1% 左右;但在实验 4 中,REN-PID 算法的丢包率较大。
- 由实验 2 至实验 4 可知,ISE-GPM-PID 算法的抗干扰能力优于 Hollot-PI 算法和 REN-PID 算法。

4.1 实验 1:验证当网络流量发生变化时 ISE-GPM-PI 算法的响应速度和稳定性

实验场景设置如下:在时间 $t=0$ s 时,创建 200 个 TCP 长流;在时间 $t=100$ s 时,停止其中的 100 个 TCP 长流;在时间 $t=150$ s 时再将这 100 个 TCP 长流重新加入到系统中,模拟时间为 300s。实验结果见图 5 和表 2。

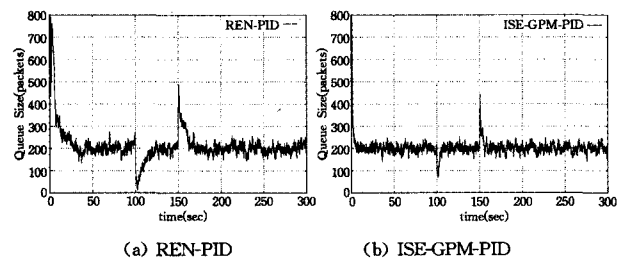


图 5 瞬时队列长度变化图

表 2 反映算法统计特征的统计量

	平均队列长度	队列长度的标准差	链路利用率	丢包率
Hollot-PI	264.97	141.10	99.70%	16.85%
REN-PID	213.04	77.98	99.68%	18.14%
ISE-GPM-PID	202.40	44.47	99.68%	18.37%

由图 5 可知,在 $t=0$ 时,REN-PID 要经过大约 30s,才能

回到 $q_0=200$ 的稳定状态;而 ISE-GPM-PI 经过大约 10s,就能回到 $q_0=200$ 的稳定状态。在 $t=100$ s,网络流量减少时,REN-PID 要经过大约 20s 回到 $q_0=200$ 的稳定状态;ISE-GPM-PID 不到 10s 就回到 $q_0=200$ 的稳定状态。在 $t=150$ s,网络流量增加时,REN-PID 大约经过 20s 回到 $q_0=200$ 的稳定状态;ISE-GPM-PID 不到 10s 就回到 $q_0=200$ 的稳定状态。

从表 2 可知,ISE-GPM-PID 的平均队列长度最接近 $q_0=200$ 的稳定状态,REN-PID 次之,Hollot-PI 最远。ISE-GPM-PID 队列长度的标准差最小,表明 ISE-GPM-PID 在 $q_0=200$ 附近振荡幅度最小;REN-PID 次之;Hollot-PI 振荡幅度最大。这些算法的链路利用率区别不大。GPM-PI 的丢包率最大;REN-PID 居中;Hollot-PI 的丢包率最小;但 REN-PID 和 GPM-PI 的丢包率相差不到 1%。

4.2 实验 2:验证当网络流量剧烈变化且加入 TCP 短流时, ISE-GPM-PI 算法的响应速度、稳定性和抗干扰能力

实验 2 中网络流量的变化比实验 1 中更加剧烈,且由“响应流量”(TCP 长流)和“非响应流量”(TCP 短流)构成。

实验场景设置如下:在 $t=0$ s 时,创建 400 个 TCP 长流,1000 个 TCP 短流;在 $t=50$ s 时,停止其中的 300 个 TCP 长流;在 $t=100$ s 时再将这 300 个 TCP 长流重新加入到系统中;在 $t=150$ s 时新加入 400 个 TCP 长流量,此时系统中 TCP 长流的总数达到 800;在 $t=200$ s 时停止新加入到系统中的 400 个 TCP 长流,模拟时间为 300s。实验结果见图 6 和表 3。

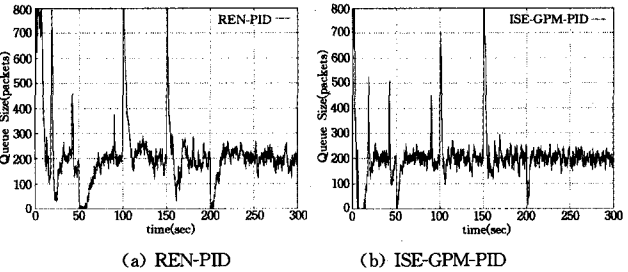


图 6 瞬时队列长度变化图

表 3 反映算法统计特征的统计量

	平均队列长度	队列长度的标准差	链路利用率	丢包率
Hollot-PI	284.10	220.92	97.49%	23.33%
REN-PID	215.79	136.25	98.37%	24.05%
ISE-GPM-PID	202.45	97.64	97.58%	24.24%

从图 6 可知,当网络流量发生变化时($t=0,50,100,150,200$),ISE-GPM-PID 比 REN-PID 更快速回到稳定状态。从表 3 可知,ISE-GPM-PID 的平均队列长度最接近 $q_0=200$ 的稳定状态,REN-PID 次之,Hollot-PI 最远。ISE-GPM-PID 队列长度的标准差最小,REN-PID 次之,Hollot-PI 最大。这些算法的链路利用率、丢包率区别不大,大约相差 1% 左右。

4.3 实验 3:验证聚合业务流量下 ISE-GPM-PI 算法的响应速度、稳定性和抗干扰能力

实验场景设置如下:实验 3 使用了由 TCP 长流、TCP 短流和 UDP 流构成的混合业务流量。其中“响应流量”由 200 个 TCP 长流组成,“非响应流量”由 500 个 TCP 短流和 100 个 UDP 流组成。以上流量在 $t=0$ s 时创建;在 $t=100$ s 时停止 100 个 TCP 长流,50 个 UDP 流; $t=200$ s 时重新加入以上流量;模拟时间为 300s。实验结果见图 7 和表 4。

由图 7 可知,ISE-GPM-PID 能快速回到 $q_0=200$ 的稳定状态,且在 $q_0=200$ 的稳定状态附近小幅振荡;REN-PID 回到 $q_0=200$ 的稳定状态的时间更长,在 $q_0=200$ 的稳定状态大幅振荡。

由表 4 可知,ISE-GPM-PID 的平均队列长度最接近 $q_0=200$ 的稳定状态,REN-PID 次之,Hollot-PI 最远。ISE-GPM-PID 队列长度的标准差最小,REN-PID 次之,Hollot-PI 最大。这些算法的链路利用率和丢包率区别不大,但 ISE-GPM-PID 的链路利用率最大,丢包率最小,表明 ISE-GPM-PID 在聚合流量下的性能优异。

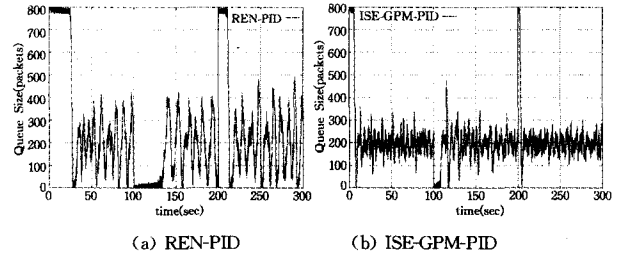


图 7 瞬时队列长度变化图

表 4 反映算法统计特征的统计量

	平均队列长度	队列长度的标准差	链路利用率	丢包率
Hollot-PI	438.14	359.01	92.94%	67.70%
REN-PID	246.41	233.96	94.95%	66.00%
ISE-GPM-PID	209.33	117.09	98.75%	64.90%

4.4 实验 4:验证非响应业务流量条件下 ISE-GPM-PI 算法的抗干扰能力

实验场景设置如下:在 $t=0s$ 时,启动 300 个 TCP 短流,100 个 UDP 流;在 $t=50s$ 时,启动 400 个 TCP 短流,停止 50 个 UDP 流; $t=100s$ 时重新加入 50 个 UDP 流,模拟时间为 300s。实验结果见图 8 和表 5。

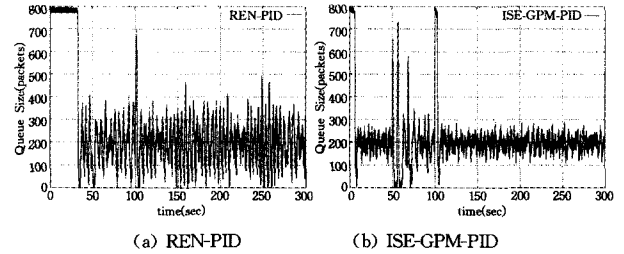


图 8 瞬时队列长度变化图

表 5 反映算法统计特征的统计量

	平均队列长度	队列长度的标准差	链路利用率	丢包率
Hollot-PI	439.07	302.58	99.53%	67.54%
REN-PID	259.53	206.21	99.32%	89.75%
ISE-GPM-PID	212.50	120.82	99.29%	67.61%

从实验结果可知,当网络流量发生变化时($t=0,50,100$),ISE-GPM-PID 比 REN-PID 和 Hollot-PI 更迅速回到 $q_0=200$ 的稳定状态。REN-PID 在稳定状态 $q_0=200$ 附近的“振荡”幅度较大;而 ISE-GPM-PID 在稳定状态 $q_0=200$ 附近的“振荡”幅度最小。以上事实表明 ISE-GPM-PID 的抗干扰能力优于 Hollot-PI 和 REN-PID。

4.5 实验 5:验证当瓶颈链路容量发生变化时 ISE-GPM-PI 算法的鲁棒性

在计算 ISE-GPM-PI 控制器的参数时,使用了网络特征

参数的典型值 $N=60,R=0.21,C=3750\text{packets/sec}$ ($C=15\text{Mb}$)。为了验证算法的鲁棒性,将网络特征参数中的瓶颈链路速率调整为 30Mb(即 $C=7500\text{packets/sec}$),且使用与实验 2 相同的网络流量,模拟时间为 300s。实验结果见图 9 和表 6。

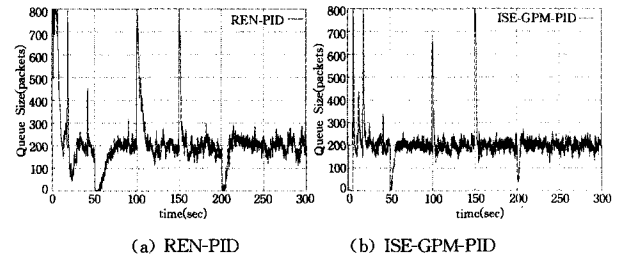


图 9 瞬时队列长度变化

表 6 反映算法统计特征的统计量

	平均队列长度	队列长度的标准差	链路利用率	丢包率
Hollot-PI	275.82	231.91	91.86%	21.42%
REN-PID	214.78	129.08	97.94%	21.82%
ISE-GPM-PID	205.09	84.74	97.69%	21.70%

从实验结果可知,当网络流量发生变化时($t=0,50,100,150,200$),ISE-GPM-PID 比 REN-PID 和 Hollot-PI 更迅速回到稳定状态。ISE-GPM-PID 的平均队列长度及其标准差均比 REN-PID 和 Hollot-PI 的对应统计量好。这些算法的链路利用率和丢包率区别不大。实验结果表明,当瓶颈链路容量变化时,ISE-GPM-PID 有较好的鲁棒性。

4.6 实验 6:验证大时滞网络环境下 ISE-GPM-PI 算法的鲁棒性

实验场景设置如下:为了验证算法在大时滞网络环境下的性能,将发送端的传播延迟改为在 400ms 到 800ms 之间均匀分布,接收端传播延迟改为 190ms,使用与实验 2 相同的网络流量,模拟时间为 300s。实验结果见图 10 和表 7。

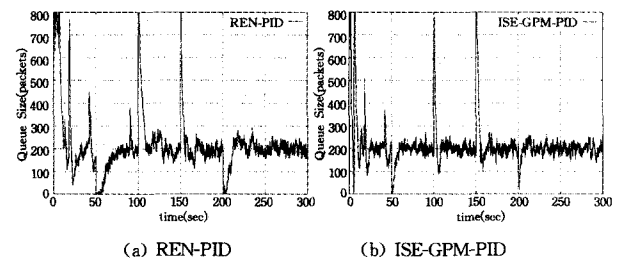


图 10 瞬时队列长度变化图

表 7 反映算法统计特征的统计量

	平均队列长度	队列长度的标准差	链路利用率	丢包率
Hollot-PI	283.85	223.03	97.36%	23.18%
REN-PID	216.36	134.49	98.57%	24.05%
ISE-GPM-PID	213.00	102.03	99.70%	23.84%

从实验结果可知,在大时滞网络环境下,当网络流量发生变化时,ISE-GPM-PID 比 REN-PID 和 Hollot-PI 能更迅速回到稳定状态。ISE-GPM-PID 的平均队列长度及其标准差、链路利用率等均比 REN-PID 和 Hollot-PI 的对应统计量好。

4.7 实验 7:验证 ISE-GPM-PI 算法不依赖于路由器缓存容量的大小

实验场景设置如下:将瓶颈链路缓存容量(即路由器缓存

容量)设置为 400,期望队列长度设置为 200,在时间 $t=0s$ 时,创建 200 个 TCP 长流;在时间 $t=100s$ 时,停止其中的 100 个 TCP 长流;在时间 $t=150s$ 时,再将这 100 个 TCP 长流重新加入到系统中,模拟时间为 300s。实验结果见图 11 和表 8。

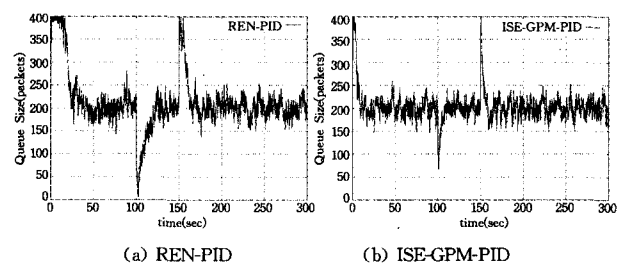


图 11 瞬时队列长度变化图

表 8 反映算法统计特征的统计量

	平均队列长度	队列长度的标准差	链路利用率	丢包率
Hollot-PI	265.88	96.00	99.68%	16.54%
REN-PID	213.04	62.34	99.70%	17.93%
ISE-GPM-PID	202.49	34.46	99.68%	18.47%

从实验结果可知,当网络流量发生变化时($t=0,100,150$),ISE-GPM-PI 比 REN-PID 和 Hollot-PI 更迅速回到稳定状态 $q_0=200$ 。ISE-GPM-PID 的平均队列长度及其标准差均比 REN-PID 和 Hollot-PI 的对应统计量好。以上事实表明,与 REN-PID 和 Hollot-PI 相比,ISE-GPM-PID 更不依赖于路由器缓存容量的大小。这些算法的链路利用率和丢包率区别不大。

结束语 针对现有基于控制论的主动队列管理算法存在的不足,设计了具有最小平方误差积分和期望稳定裕度的基于 PID 控制器的 AQM 算法 ISE-GPM-PID。该算法不仅保持了现有各 AQM 算法的优点,也克服了其缺点,即该算法同时具备抗干扰能力强、响应速度快、计算开销小、能用于大时滞网络环境,且鲁棒性好等特点。借助于 NS2 仿真实验,充分地验证了这些特性。因此,ISE-GPM-PID 算法能更好地适应当前互联网流媒体和 Web 应用日益增多的局面。

参考文献

- [1] Misra V, Gong W B, Towsley D. Fluid-based Analysis of a Network of AQM Routers Supporting TCP Flows with an Application to RED [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2000, 30(4): 151-160
- [2] Hollot C V, Misra V, Towsley D, et al. On Designing Improved Controllers for AQM Routers Supporting TCP Flows [C] // IEEE INFOCOM, 2001. Alaska, USA; IEEE Press, 2001: 1726-1734
- [3] Hong Y, Yang O W W. Design of Adaptive PI Rate Controller for Best-Effort Traffic in the Internet Based on Phase Margin [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(4): 550-561
- [4] Yang H, Oliver W W, Huang C C. Self-Tuning PI TCP Flow Controller for AQM Routers with Interval Gain And Phase

- Margin Assignment [C] // IEEE GLOBECOM, 2004. Texas, USA; IEEE Press, 2004: 1324-1328
- [5] Zhang H G, Hollot C V, Towsley D. A Self-tuning Structure for Adaptation in TCP/AQM Networks [C] // IEEE GLOBECOM, 2003. San Francisco, USA; IEEE Press, 2003: 3641-3646
- [6] Chang X L, Muppala J K, Jen-te Y. A Robust Nonlinear PI Controller for Improving AQM Performance [C] // 2004 IEEE Int. Conf. on Communications, 2004. Paris, France; IEEE Press, 2004: 2272-2276
- [7] 章森, 吴建平, 林闯. P²I: 一种新的主动队列管理算法 [J]. 计算机学报, 2003, 26(10): 1288-1294
- [8] Zhang M, Ren F Y, Wu J P, et al. Using Fuzzy-PI Controller in Active Queue Management [C] // IEEE Symposium on Computers and Communications, 2004. Alexandria, Egypt; IEEE Press, 2004: 742-747
- [9] Zhang H Y, Liu B H, Dou W H. Design of a Robust Active Queue Management Algorithm Based on Feedback Compensation [C] // ACM SIGCOMM, 2003. Karlsruhe, Germany; ACM Press, 2003: 277-285
- [10] L Ming, Dou W H. Does Fast Responsive AQM Scheme Always Do Better [C] // The Fifth International Conference Grid and Cooperative Computing, 2006. Beijing, China; IEEE Press, 2006: 245-248
- [11] Ryu S, Rump C, Qiao C. Advances in Active Queue Management (AQM) Based TCP Congestion Control [J]. Telecommunication Systems, 2004, 25(3/4): 317-351
- [12] Fan Y F, Ren F Y, Lin C. Design a PID Controller for Active Queue Management [C] // IEEE Symposium on Computers and Communications, 2003. Antalya, Turkey; IEEE Press, 2003: 985-990
- [13] Ren F Y, Lin C, Wei B. A Robust Active Queue Management Algorithm in Large Delay Networks [J]. Computer Communication, 2005, 28(5): 485-493
- [14] 任丰原, 林闯, 任勇, 等. 大时滞网络中的拥塞控制算法 [J]. 软件学报, 2003, 14(3): 503-511
- [15] Ling H, Haiyu Z, Yuanwei J, et al. Application of IMC-Smith Controller in the Large-Delay Network Congestion Control [C] // The Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China; IEEE Press, 2006: 4595-4599
- [16] Zhu R, Teng H T, Fu J D. A Predictive PID Controller for AQM Router Supporting TCP with ECN [C] // IEEE Symposium on Computers and Communications, 2003. Antalya, Turkey; IEEE Press, 2003: 356-360
- [17] Agrawal D, Granelli F. Redesigning an Active Queue Management System [C] // IEEE GLOBECOM, 2004. Dallas, Texas, USA; IEEE Press, 2004: 702-706
- [18] 郑博, 孟相如, 李欢, 等. 基于速率和队长的大时滞网络 AQM 算法 [J]. 计算机工程, 2010, 36(20): 96-98
- [19] Ho W K, Lim K W, Xu W. Optimal Gain and Phase Margin Tuning for PID Controllers [J]. Automatica, 1998, 34(8): 1009-1014