

一种新的快速响应的 AQM 算法

张天魁 郭彩丽 曾志民 冯春燕

(北京邮电大学通信网络综合技术研究所 北京 100876)

摘要: 该文应用控制理论, 设计了具有快速响应特征的比例积分(Proportional-Integral, PI)控制器, 并以此提出了一个新的主动队列管理(Active Queue Management, AQM)算法, 称为Active PI算法(简称A-PI)。A-PI用一组参数实现快速响应, 用另一组参数保证队长稳定, 使用门限值实现两组参数间平滑切换, 算法实现简单。理论分析和仿真实验表明, A-PI算法在保证队长稳定的同时实现了对不同网络环境的快速响应。

关键词: 控制理论; 主动队列管理; PI控制器; Active PI算法

中图分类号: TN915.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)05-1191-03

A New AQM Scheme for Fast Response

Zhang Tian-kui Guo Cai-li Zeng Zhi-min Feng Chun-yan

(Institute of Communication Networks Integrated Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Based on control theory, a Proportional-Integral (PI) controller is designed which has a character of fast response. Consequently, a new Active Queue Management (AQM) scheme called Active PI algorithm (A-PI) is proposed, which employed double sets of parameters applying one set of parameters for fast response and the other for achieving queue's stability. A-PI controller uses threshold to shift parameter smoothly, and it can be implemented easily. Analysis and simulation results show that under various network conditions A-PI controller has a fast response and a good performance in stability.

Key words: Control theory; Active Queue Management (AQM); Proportional-Integral (PI) controller; Active PI algorithm

1 引言

目前分析TCP/AQM控制理论模型并设计相应的控制器实现主动队列管理(Active Queue Management, AQM)机制是研究热点之一, 其中典型的算法是PI^[1] (Proportional-Integral)控制器算法。但是PI控制器算法的响应速度受网络环境影响较大, 因此先后出现了一些改进算法^[2-8], 在一定条件下部分地改善了PI控制器算法的性能。

本文根据控制理论设计了一个具有较快系统响应的PI控制器, 并在此基础上, 提出了一种新的AQM算法——Active PI算法, 在本文中简称为A-PI算法。A-PI算法具有两套参数, 分别保证响应速度和队长稳定, 并设计合理门限值实现参数之间的平滑切换。仿真实验表明, 在不同的网络环境下, A-PI算法在保持队长稳定的同时具有比PI^[1]更快的响应速度。

2 TCP/AQM 控制理论模型

PI控制器将控制理论应用在队列管理算法中, 将端到端的IP网络看作一个反馈控制系统^[1], 线性化系统模型如图 1 所示。 $P(s)$ 为需要控制的TCP/AQM系统, $C(s)$ 为控制器,

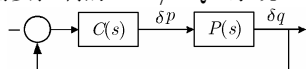


图1 TCP/AQM 线性控制系统

δp 表示当前分组丢弃概率与期望的分组丢弃概率 p_0 的差值, δq 表示当前瞬时队列长度与期望的队列长度 q_0 的差值。

令 R 表示平均往返时间, N 为 TCP 连接的数量, C 表示瓶颈链路的带宽。则 $C(s)$, $P(s)$ 的 s 域方程分别如式(1), 式(2)所示:

$$C(s) = K_{pi} \frac{s/\omega_g + 1}{s} \tag{1}$$

$$P(s) = \frac{[C^2/(2N)]e^{-sR}}{[s + 2N/(R^2C)](s + 1/R)} \tag{2}$$

根据式(1), 式(2)得出图 1 的系统频率响应函数为

$$G(j\omega) = K_{pi} \frac{(j\omega + \omega_g)[C^2/(2N)]e^{-j\omega R}}{\omega_g(j\omega)[j\omega + 2N/(R^2C)](j\omega + 1/R)} \tag{3}$$

式(1)的差分方程为

$$p(k) = p(k-1) + a[q(k) - q_0] - b[q(k-1) - q_0] \tag{4}$$

其中 $a = K_{pi}T + K_{pi}/\omega_g$, $b = K_{pi}/\omega_g$, q_0 为期望的队列长度, T 为抽样间隔时间, $p(k)$ 为第 k 个抽样时间的分组丢弃概率, $q(k)$ 为第 k 个抽样时间的瞬时队列长度。

3 A-PI 算法设计

要设计PI控制器, 就要设计系统带宽 ω_g 和增益 K_{pi} 的值。系统的响应速度与 ω_g 成正比^[9], 因此这里设计一个具有较大的系统带宽的系统来实现快速响应^[1]。

给定系统的 ω_g 和 K_{pi} 的值如下:

2005-11-10 收到, 2006-06-21 改回

博士点基金(2003001312)“基于 MPLS 流量工程的通信网络 QoS 研究”资助课题

$$\omega_g = (\pi/4)/R^+ \tag{5}$$

$$K_{pi} = \omega_g^2 \frac{2N^-}{C^2} \left| j\omega_g + \frac{2N^-}{(R^+)^2 C} \right| \tag{6}$$

其中 N^- 表示 TCP 连接数的最小值, R^+ 表示往返时间的最大值, 则 $N \geq N^-$, $R \leq R^+$ 。

首先分析给定的 ω_g 和 K_{pi} 的值是否满足系统的稳定性要求。

由式(3)得出系统在 ω_g 的幅频特性为

$$|G(j\omega_g)| = K_{pi} \frac{\omega_g^2 \frac{2N^-}{C^2} \left| j\omega_g + \frac{2N^-}{(R^+)^2 C} \right|}{\omega_g^2 \left| j\omega_g + \frac{2N}{R^2 C} \right| \left| j\omega_g + \frac{1}{R} \right|} \tag{7}$$

将给定的 ω_g (式(5))和 K_{pi} (式(6))代入式(7)可得:

$$|G(j\omega_g)| = \frac{\omega_g^2 \frac{2N^-}{C^2} \left| j\omega_g + \frac{2N^-}{(R^+)^2 C} \right| \left| j\omega_g + \frac{\pi}{4R^+} \right| \left(\frac{C^2}{2N} \right)}{\omega_g^2 \left| j\omega_g + \frac{2N}{R^2 C} \right| \left| j\omega_g + \frac{1}{R} \right|} \leq \frac{\left| j\omega_g + \frac{\pi}{4R^+} \right|}{\left| j\omega_g + \frac{1}{R} \right|} < 1$$

根据Nyquist稳定性判据^[9]可知, 设计的系统带宽 ω_g 和增益 K_{pi} 满足系统幅频特性的要求。

接下来分析系统的相频特性:

$$\phi(\omega_g) = \tan^{-1}(\omega_g / \omega_g) - \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}[\omega_g R^2 C / (2N)] - \tan^{-1}(\omega_g R) - \omega_g R \tag{8}$$

假设本文考虑的网络环境与文献[1]相同, 即假设 $N^-=60$, $R^+=0.25s$, $C=15Mb/s$ (每个分组为 500 byte), 则根据式(8)可得

$$\phi(\omega_g) \geq \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{\pi RC}{8N} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\pi}{4} \right) - \frac{\pi}{4} \approx -209^\circ$$

在 N^- , R^+ , C 取定的情况下, 图 2 给出了无时延因子时系统的Bode图。从图中可以看出, 为了使 $\phi(\omega_g) \geq -180^\circ$, 需要使 $\phi(\omega_g)$ 减小 29° , 即将幅度增益减少 21dB, 也就是要求 K_{pi} 的值减少 21dB。

当 $N^-=60$, $R^+=0.25s$, $C=15Mb/s$ (每个分组为 500 byte) 时, 根据式(4)和式(5), 得出 $\omega_g=3.14rad/s$, $K_{pi}=2.7 \times 10^{-4}$, 减小 21dB得 $K_{pi}=2.6 \times 10^{-5}$ 。至此, 设计出了能实现快速响应的系统参数。

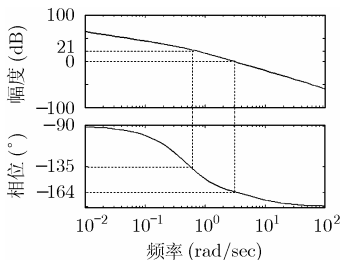


图 2 $G(j\omega)$ 的 Bode 图

文献[1]在假设 $\frac{2N^-}{(R^+)^2 C} \ll \frac{1}{R^+}$ 的前提下, 给出的系统带

宽 $\omega_g = 2N^- / [(R^+)^2 C]$, 本文设计的 $\omega_g = (\pi/4)/R^+$, 显然, 本文设计的 ω_g 远大于文献[1]中的 ω_g , 因此在相同的网络条件下, 本文设计的PI控制器的响应速度要快得多。但是只考虑响应速度会影响队长的稳定性, 因此, 这里提出了一个既能快速响应又能保证队长稳定的AQM算法——Active PI算法。

Active PI 算法(A-PI 算法)拥有两套参数, 参数的选择取决于瞬时队列长度。当队列长度大于取定的门限值 H 时, 使用本文设计的参数实现快速响应; 当队列长度小于门限值 H 时, 使用文献[1]中设计的保守的参数保证队长稳定。

H 值的选取应该确保两套参数之间的平滑切换, 否则分组丢弃概率的剧烈变化将导致队列长度的震荡。定义分组丢弃概率的步长: $\Delta p = p(k) - p(k-1)$ 。由式(4)得

$$\Delta p = a[q(k) - q_0] - b[q(k-1) - q_0]$$

如果缓冲区空间 Q 为 800 个分组, 期望的队列长度 q_0 为 200 个分组, 当队列长度大于门限值 H 时, 有

$$\Delta p_{max} = 9.73 \times 10^{-6} [800 - 200] - 9.55 \times 10^{-6} [H - 200] \tag{9}$$

当队列长度小于或等于门限值 H 时, 有

$$\Delta p'_{max} = 1.822 \times 10^{-5} [H - 200] \tag{10}$$

两套参数切换时要求避免分组丢弃概率的剧烈变化, 也就是要求分组丢弃概率的步长相等或相近, 即要求 $\Delta p_{max} = \Delta p'_{max}$, 由式(9), 式(10)得出 $H=410$, 为了表示方便, H 取 400。通过仿真也证明了 H 取 400 时, A-PI 算法既能保证响应速度又能保持队长稳定。

4 仿真实验

利用NS-2^[10]进行仿真, 与PI^[1]控制算法进行对比, 验证 A-PI控制器的性能。仿真网络拓扑结构如图 3 所示, 由TCP连接承载FTP业务模拟网络负载, 分组大小为 500byte, 瓶颈链路带宽 C 为 15Mbit/s, 50 ms时延, 缓冲区空间 Q 为 800 个分组, 期望队长为 200 个分组。算法参数设置见表 1。

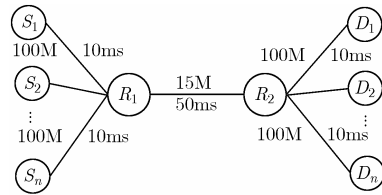


图 3 仿真网络拓扑结构图

表 1 对比算法参数设置

	$H=400$	$a(\times 10^{-5})$	$b(\times 10^{-5})$	$T(s)$
PI		1.822	1.816	1/170
A-PI	$q > H$	0.973	0.955	1/170
	$q \leq H$	1.822	1.816	1/170

首先验证当有 100 个 TCP 连接、链路时延为 50ms 时, A-PI 算法的性能。从图 4 中可以看出, 在相同条件下, A-PI 在保证队长稳定的同时收敛速度更快。

影响算法性能的因素有 TCP 连接数量 N 和往返时间 R 。增加 N 或减小 R 都将增加响应时间, 减小 N 或增加 R 将导致队列的抖动变得剧烈。

保持瓶颈链路时延 50ms 不变, 将 N 增加大 200, 从图 5 可以看出, A-PI 算法的响应时间为 20s, PI 算法的响应时间达 60s。

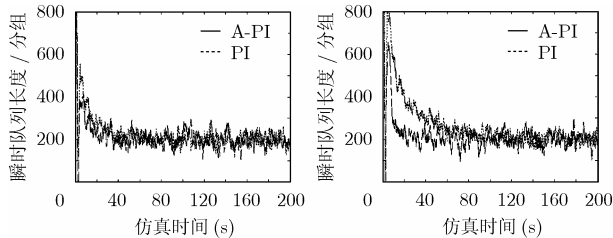


图 4 100 个 TCP 连接 50ms 时延

图 5 200 个 TCP 连接 50ms 时延

接下来, 保持 N 不变, 链路时延减小至 20ms, 对比两种算法的响应时间。见图 6, A-PI 在保持队长稳定的情况下, 响应速度比 PI 快。

在图 7 中, 给出了 N 增加 5 倍至 500 同时链路时延减小 1/5 至 10ms 时两种算法的性能比较。可以看出, A-PI 的性能比 PI 突出, 在队长抖动相近的情况下, 响应时间只有 20s。

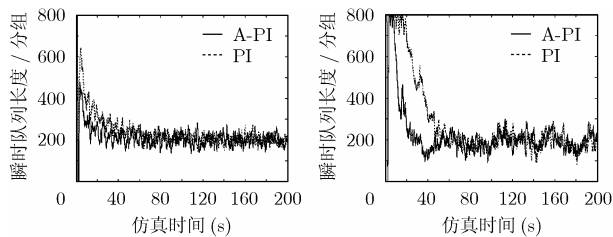


图 6 100 个 TCP 连接 20ms 时延

图 7 100 个 TCP 连接 20ms 时延

以上考虑的是 N 和 R 对响应速度的影响, 接下来考察减小 N 且增加 R 对队长稳定的影响。图 8 中, 60 个 TCP 连接 100ms 链路时延, A-PI 和 PI 一样能保持队长的稳定。

此外实验中验证了 A-PI 在动态环境下也有突出的响应速度。图 9 给出了两种算法的瞬时队长对比, 0s 时有 100 个 TCP 连接, 在 100s 时增加 200 个 TCP 连接, A-PI 用 20s 就再次达到期望的队列长度, 而 PI 用时 40s。可见, A-PI 在负载发生变化后, 能很快地做出响应并保持队长稳定。

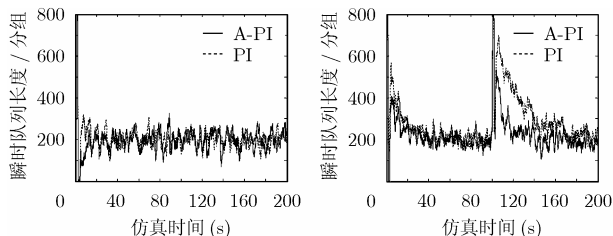


图 8 60 个 TCP 连接 100ms 时延

图 9 动态连接瞬时队列长度对比

5 结束语

本文应用控制理论, 设计了具有较大系统带宽的 PI 控制器, 并在此基础上提出了具有两套参数的 AQM 算法, 称

为 A-PI 控制器。该算法依据队长进行参数间的平滑切换, 算法实现简单, 配置容易。文中给出了合理选取门限值的依据。理论分析和实验仿真验证, 在不同的网络环境下, A-PI 既能保持队长稳定又具有很快的响应速度。

参考文献

- [1] Hollot C V, Misra V, and Towsley D, *et al.* On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows. Proceeding IEEE Conference on Computer Communications, Anchorage, AK 2001: 1726–1734.
- [2] Zhang Hong-gang, Hollot C V, and Towsley D, *et al.* A self-tuning structure for adaptation in TCP/AQM networks. Proceeding ACM/SIGMETRICS, San Francisco, CA, USA 2003: 302–303.
- [3] Chen Qiang and Yang O W W. A ST-PI-PP controller for AQM router. 2004 IEEE International Conference on Communications, Paris, France, 2004, 4: 20–24.
- [4] Zhang M, Wu J, and Lin C, *et al.* Rethink the tradeoff between proportional controller and PI controller. Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications, Taormina, Italy, 2002: 57–62.
- [5] Wang Chong-gang, Bo Li, and Kazem Sohraby. API: adaptive proportional-integral algorithm for active queue management under dynamic environments. Proceeding IEEE HPSR 2004, Phoenix, Arizona, USA 2004: 51–55.
- [6] Chang Xiao-lin, Muppala J K, and Jen-te Yu. A robust nonlinear PI controller for improving AQM performance. 2004 IEEE International Conference on Communications, Paris, France, 2004, 4: 2272–2276.
- [7] Fan Yan-fei, Ren Fengyuan, and Lin Chuang. Design a PID controller for active queue management. Kiris-Kemer, Turkey 2003, 30 June - 3 July, 2003, 2: 985–990.
- [8] 曾志民, 张天魁, 冯春燕等. 一种快速响应的 AQM 算法. 北京邮电大学学报, 2005, 28(4): 4–9.
Zeng Zhi-min, Zhang Tian-kui, and Feng Chun-yan, *et al.* An AQM scheme for fast response[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2005, 28(4): 4–9.
- [9] Dor R C and Bishop R H. Modern control systems. Texas: Addison Wesley Longman, 1998: 345–426.
- [10] VINT project U C Berkeley/LBNL, ns2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-allinone>, 2004, 4, 5

张天魁: 男, 1980 年生, 博士生, 研究领域包括 IP 网络 QoS 机制、无线分组网络资源管理技术等。

郭彩丽: 女, 1977 年生, 博士生, 研究领域包括宽带无线网络等。

曾志民: 男, 1956 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域包括 IP 网络、无线分组网、传感器网络、感知无线电等。

冯春燕: 女, 1964 年生, 教授, 研究领域包括 IP 网络、MPLS 网络、无线分组网、传感器网络、感知无线电等。