

基于速率和队长的大时滞网络 AQM 算法

郑 博, 孟相如, 李 欢, 蒋静芝

(空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077)

摘 要: 针对网络拥塞控制系统在大时滞网络中产生的不利影响, 提出一种基于速率和队长的大时滞网络 AQM 算法。该算法采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, 在结合 Smith 预估的模糊 PID 控制方法中加入速率控制项。仿真表明该算法在大时滞和网络动态变化的环境中拥塞响应较快、收敛时间短, 并能较好地使队列长度稳定到期望值附近, 提高缓冲区的利用率。

关键词: 主动队列管理; Smith 预估; 模糊 PID 控制; 包到达速率; 大时滞网络

Active Queue Management Algorithm Based on Rate and Queue Length in Large Delay Network

ZHENG Bo, MENG Xiang-ru, LI Huan, JIANG Jing-zhi

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

【Abstract】 To solve the problem of negative impact on the performance of Active Queue Management(AQM) in large delay network, an AQM algorithm is proposed based on rate and queue length in large delay network. This algorithm considers the effect of queue length and packet arriving rate together to indicate congestion degree. An input rate control is used to speed up the responsive time in fuzzy Smith control method. Simulation result shows that the algorithm has a fast response and short convergence time in large delay network and dynamic network environment. It also can control the size of the queue in the buffer to an expected length and achieves high utilization.

【Key words】 Active Queue Management(AQM); Smith prediction; fuzzy PID control; packet arrival rate; large-delay network

1 概述

已有的大部分主动队列管理算法在设计时都忽略了网络时滞对拥塞控制系统的影响, 以致在大时滞网络中 AQM 算法控制的队列稳定性、鲁棒性和响应性都大大降低。随着近年来对 AQM 算法的深入研究, 网络时滞对 AQM 算法的影响引起广泛关注, 文献[1]采用控制理论中的内模补偿原理, 在考虑网络时滞情况下进行了研究, 取得了较好的控制性能, 但算法缺乏自适应机制, 在网络模型参数剧烈变化时控制性能可能变差。文献[2]结合模糊 PID 控制器和灰度预测提出了一种时滞网络的自适应主动队列管理算法, 取得了可借鉴的成果。文献[3]结合队列长度和包到达速率提出了新的主动队列管理算法, 提高了算法响应速度。本文将队列长度和数据包到达速率作为网络拥塞的判别依据, 在结合 Smith 预估的模糊 PID 控制基础上^[4], 增加速率控制项, 提出基于速率和队长长度的模糊 Smith 主动队列管理算法(Fuzzy Smith Active Queue Management based on Rate and queue Length, RLFS-AQM), 该算法能保证队列长度在大时滞网络环境中稳定于期望值的同时提高响应速度, 并在网络环境动态变化时有较好的适应性和鲁棒性。

2 RLFS-AQM 设计思想

文献[5]提出了 TCP 拥塞控制机制的统计学微分方程数学模型, 文献[6]用小信号理论在稳态工作点对其进行了局部线性化, 本文在设计 AQM 算法时以此模型为基础, 提出基于速率和队长的模糊 Smith 主动队列管理算法 RLFS-AQM。图 1 是该算法控制系统框图。在图 1 中, Q_{ref} 表示队列长度期望值, $Q(k)$ 表示缓冲区队列长度, $Y_r(k)$ 表示 Smith 预估

补偿输出, 控制器输入变量为偏差 $e(k)$, $e(k) = Q_{ref} - Q(k) - Y_r(k)$; $G'(s)e^{-rs}$ 为 TCP 流量控制模型中被控对象传递函数的一阶模型; $p(k)$ 为 AQM 控制算法产生的控制量, 表示数据包丢弃率; 模糊 PID 控制器和速率控制项构成 AQM 算法控制器, AQM 算法控制器通过对 $p(k)$ 的控制将队列长度控制在期望值附近。

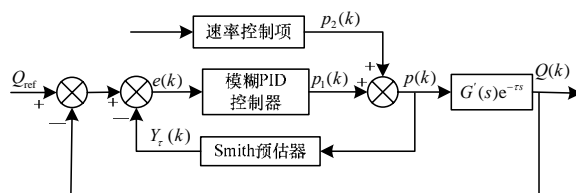


图 1 RLFS-AQM 控制系统框图

该算法中丢包率 $p(k)$ 计算公式为:

$$p(k) = (1 - \lambda)p_1(k) + \lambda p_2(k) \quad (1)$$

其中, $p_1(k)$ 为经预估补偿后模糊 PID 控制器输出得到的丢包率; $p_2(k)$ 为速率控制项计算得到的丢包率; λ 为速率控制项系数, $0 < \lambda < 1$, 通过改变权值可改变以队列长度或流量速率作为拥塞判别的依据的权重, λ 取值过小, 速率控制作用不突出, 影响响应速度; 取值过大, 使得丢弃概率过大, 造

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(SJ08F14)

作者简介: 郑 博(1982 -), 男, 硕士研究生, 主研方向: 网络拥塞控制技术; 孟相如, 教授、博士生导师; 李 欢、蒋静芝, 硕士研究生

收稿日期: 2010-04-10 **E-mail:** follow_123@yahoo.com.cn

成队长不稳定,也将使基于队长控制部分失去作用。在算法运行过程中需要根据网络实际情况对 λ 值进行自适应调整。

λ 值自适应调整如下:

$$\lambda = \begin{cases} 0 & \text{if } r(t) \leq C \\ \max(0, \frac{Q(k) - Q_{\text{ref}}}{Q_{\text{lim}}}) & \text{if } r(t) > C \end{cases} \quad (2)$$

其中, C 为最大服务速率; $r(t)$ 为包到达速率; Q_{lim} 为缓冲区最大队列长度。当 $r(t) \leq C$ 时,缓冲区中的队列长度不会增加,网络不会发生拥塞, λ 值设置为 0,利用模糊 PID 控制能够稳定队列长度的优点,丢包率由模糊 PID 控制器决定;当 $r(t) > C$ 时,新到达的报文就需要进入缓冲区经过排队等待才能被发送出去,如果 $r(t) > C$ 情况持续,网络拥塞发生,此时,通过加入速率控制,在一定程度上增大丢包率,使 AQM 算法能够较好地控制缓冲区队列,更快地响应网络拥塞,提高控制器响应速度。

3 Smith 预估控制系统

图 1 中 AQM 算法控制器通过并联一个补偿环节来补偿被控对象中的纯滞后部分,这个补偿环节称为 Smith 预估器,当模型匹配时,其传递函数为 $G'(s)(1 - e^{-\tau s})$ 。在主动队列管理控制系统中,设 $G_c(s)$ 为 AQM 算法控制器传递函数,经补偿后的闭环传递函数为:

$$\Phi(s) = \frac{Q}{Q_{\text{ref}}} = \frac{G_c(s)G'(s)}{1 + G_c(s)G'(s)} e^{-\tau s} \quad (3)$$

由上式可得,经过补偿后,闭环系统特征方程中已经不包含时滞项 $e^{-\tau s}$,消除了纯延迟部分对控制系统的不利影响,只是它的输出响应有纯滞后时间,从而使系统稳定性有很大提高。

4 模糊 PID 控制器设计

模糊 PID 控制器的设计思想是以偏差 e 和偏差变化率 ec 作为模糊控制器输入,利用模糊规则进行模糊推理,再进行解模糊化后,以 PID 参数的增量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 作为输出变量,对 PID 控制器参数进行在线修正以满足不同环境对 PID 控制器参数的不同要求。PID 控制器实时参数由下式得到:

$$k_p(k) = k'_p + \Delta k_p(k) \quad (4)$$

$$k_i(k) = k'_i + \Delta k_i(k) \quad (5)$$

$$k_d(k) = k'_d + \Delta k_d(k) \quad (6)$$

其中, k'_p 、 k'_i 、 k'_d 为控制器初始值; Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 为参数的修正值。

模糊控制器模糊集合论域均为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$,相应的模糊子集语言值为 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$,其中, NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大,各语言值隶属度函数均采用高斯型 $\mu(x) = e^{-[(x-a)/b]^2}$,各隶属度函数均值 a 分别为 -3、-2、-1、0、1、2、3,方差 b 均为 1。模糊推理采用 Mamdani 模糊推理方法。

模糊 PID 控制规则采用文献[2]所列 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 3 个参数的模糊控制表。

经模糊推理后,采用加权平均法求取输出量的精确值。在算法实际执行过程中,先根据模糊控制器的输入 e 和 ec ,按照上述模糊规则表的推理方法和解模糊方法,离线计算得到输出变量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的模糊控制查询表,然后在线控制时根据当前的误差和误差变化的模糊化等级,通过查询模

糊控制查询表实时更新 PID 控制器参数,以降低运算复杂度以及得到良好的控制品质和实时性。

将由式(4)~式(6)计算所得的 PID 控制器参数代入 PID 控制器的离散增量表达式,得到:

$$p_1(k) = k_p(k) \left[\left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e(k) - \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) e(k-1) + \frac{T_d}{T} e(k-2) \right] + p(k-1) \quad (7)$$

其中, $T_i = k_p(k)/k_i(k)$; $T_d = k_d(k)/k_p(k)$; T 为采样时间。

5 速率控制项设计

由速率控制项计算所得丢包率为:

$$p_2(k) = \min\left(\frac{r(k) - C}{C}, 1\right) \quad (8)$$

为容忍突发流并且避免速率计算失真,采用指数加权平均方法计算包到达速率:

$$r(k) = (1 - \omega_r) \cdot \frac{l_T}{T} + \omega_r \cdot r(k-1) \quad (9)$$

其中, $\omega_r = e^{-T/K}$, T 为采样间隔, K 为控制参数; l_T 为 T 时间内到达的数据包个数; $r(k)$ 和 $r(k-1)$ 分别为当前时刻和上一时刻的包到达速率; ω_r 为常数,为了使 $r(k)$ 能更快地反映当前速率情况,取 $\omega_r = 0.1$ 。

6 仿真分析

为验证所提算法性能,采用 NS2 进行仿真。仿真所用拓扑结构如图 2 所示。其中, $S_1 \sim S_n$ 为发送节点, $D_1 \sim D_n$ 为接收节点,端节点 S_i 和 D_i 之间建立连接,所有发送节点和接收节点到路由器的链路带宽为 100 Mb/s,链路时延为 10 ms,队列管理采用 DropTail; 2 个路由器 R1、R2 之间为瓶颈链路,队列管理分别采用不含速率项的模糊 Smith 主动队列管理算法以及 RLFS-AQM 这 2 种算法,链路带宽为 15 Mb/s (3 750 packets/s, 分组大小为 500 Byte),链路时延为 180 ms,则整个网络中往返时延至少为 400 ms,路由器节点缓冲区大小为 800 packets,期望队长为 200 packets。

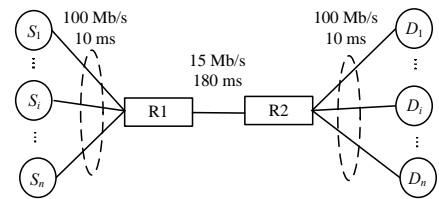
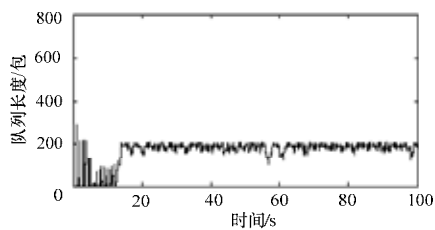


图 2 仿真拓扑图

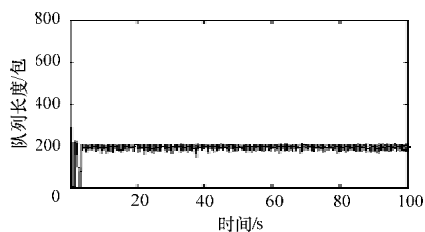
在本文所提算法中,模糊 PID 控制器初始参数为 $k'_p = 0.2067$ 、 $k'_i = 0.048$ 、 $k'_d = 0.08244$,采样时间为 0.00625 s,偏差 e 的变化范围为 $[-200, 200]$,偏差变化 ec 的变化范围为 $[-100, 100]$,3 个输出变量的变化范围为 $[-0.04, 0.04]$ 、 $[-0.015, 0.015]$ 、 $[-0.02, 0.02]$ 。

(1) 大时滞网络条件下的算法控制性能仿真

本实验考察在大时滞的网络环境中 RLFS-AQM 的性能,在实验过程中对算法响应速度进行比较。仿真结果如图 3 所示。实验中建立 100 个 FTP 连接,仿真时间为 100 s。仿真结果表明在大时滞的网络环境中,2 种 AQM 算法的队列长度收敛到期望队长 200 packets 所用的时间分别为 15 s 左右和 5 s 左右,RLFS-AQM 能更快地使队列长度收敛到期望值。在队列进入稳定状态以后,RLFS-AQM 能很好地稳定队列,队列抖动小。



(a)模糊 Smith 主动队列管理算法队列长度

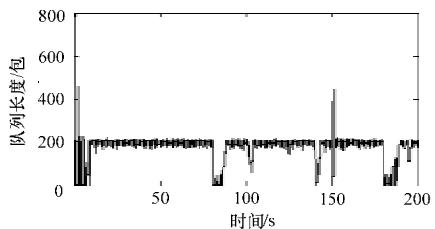


(b)RLFS-AQM 队列长度

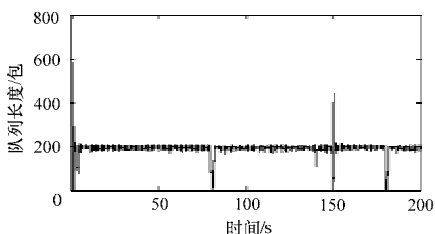
图 3 实验 1 仿真结果

(2)网络环境参数变化对算法的影响

本实验考查 AQM 算法在较重负载情况下以及在动态的网络环境中的性能,仿真时间为 200 s。仿真结果如图 4 所示。



(a)模糊 Smith 主动队列管理算法队列长度



(b)RLFS-AQM 队列长度

图 4 实验 2 仿真结果

实验中在 0 时刻启动 200 个 FTP 连接,在 80 s 时 100 个 FTP 连接退出;在 100 s 时加入 1 个新的 UDP 流,在 140 s 时结束,每个 UDP 分组的大小为 1 KB,发送速率为 3 Mb/s;在 150 s 时加入 200 个新的 FTP 流,在 180 s 时结束。仿真表明,模糊 Smith 主动队列管理算法和 RLFS-AQM 在网络状态发生变化时,由于使用了模糊逻辑动态调节 PID 控制器的参数,使得 Smith 补偿器对控制器参数不再敏感,在网络状态发生变化时表现出较好的适应能力,但在干扰到来时,RLFS-AQM 由于加入了速率控制项,因此能更快地使队列长度收敛于期望值,体现了良好的抗干扰能力和网络变化适应能力。

7 结束语

本文针对网络大时滞和网络动态变化对 AQM 算法的不利影响,提出一种基于速率和队长的大时滞网络 AQM 算法,该算法提高了在大时滞网络环境中的自适应能力、抗干扰能力和响应速度。利用 NS2 网络仿真平台在网络大时滞和网络参数动态变化条件下进行了仿真实验,验证了算法性能,在大时滞的网络环境中取得了较好的控制效果。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 孙雁飞,张顺颐,王 攀,等. 一种时滞网络自适应主动队列管理算法研究[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(10): 1940-1945.
- [3] 张鹤颖,刘宝宏,龚文华. 一种基于速率和队列长度的主动队列管理机制[J]. 电子学报, 2003, 31(11): 1743-1746.
- [4] 边立秀,赵日晖. Fuzzy 自整定 PID 参数的 Smith 预估主汽温控制系统[J]. 计算机仿真, 2004, 21(1): 102-104.
- [5] Misra V, Gong Weibo, Towsley D. Fluid-based Analysis of a Network of AQM Routers Supporting TCP Flows with an Application to RED[C]//Proc. of ACM/SIGCOMM'00. Stockholm, Sweden: [s. n.], 2000: 151-160.
- [6] Holot C, Misra V, Towsley D. A Control Theoretic Analysis of RED[C]//Proc. of IEEE INFOCOM'01. Anchorage, USA: IEEE Press, 2001: 1510-1519.

编辑 任吉慧

(上接第 87 页)

4 结束语

基于网络位置信息选择服务节点是许多分布式应用亟待解决的共性问题,已有的邻近搜索技术受网络协议的限制,搜索精度不高。本文提出一种基于覆盖树的可扩展邻近搜索方法 CPS。每个节点只需要维护少量其他节点信息,即可构成层次化组织形式。通过对比实验发现,CPS 的搜索精度较高。邻近搜索服务的实际部署将是下一步的工作。

参考文献

- [1] Banerjee S, Kommareddy C, Bhattacharjee B. Scalable Peer Finding on the Internet[C]//Proc. of Global Internet Symposium. Taipei, Taiwan, China: [s. n.], 2002.
- [2] Costa M, Castro M, Rowstron A, et al. PIC: Practical Internet

Coordinates for Distance Estimation[C]//Proc. of the 24th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems. Tokyo, Japan: IEEE Press, 2004.

- [3] Wong B, Slivkins A, Sirer E G. Meridian: A Lightweight Network Location Service Without Virtual Coordinates[C]//Proc. of SIGCOMM'05. Philadelphia, USA: IEEE Press, 2005.
- [4] Beygelzimer A, Kakade S, Langford J. Cover Trees for Nearest Neighbour[C]//Proc. of the 23rd International Conference on Machine Learning. Pittsburgh, USA: IEEE Press, 2006.
- [5] Karger D R, Ruhl M. Finding Nearest Neighbors in Growth-restricted Metrics[C]//Proc. of the 34th Annual ACM Symposium on Theory of Computing. Montreal, Canada: ACM Press, 2002.

编辑 张正兴