

一种基于模糊逻辑的主动队列管理算法

张敬辕, 谢剑英, 傅 春

(上海交通大学自动化系, 上海 200030)

摘 要: 主动队列管理 (Active Queue Management, AQM) 技术作为 Internet 拥塞控制的一种有效方法, 对于提高 Internet 的服务质量具有十分重要的作用. 本文根据 TCP 拥塞控制算法基于数据包丢失的窗口变化机制, 设计了一种基于模糊逻辑的主动队列管理算法. 该算法依据路由器中队列长度的变化情况, 根据一定的模糊自校正原则来调整数据包的丢弃概率, 从而使路由器中的队列长度稳定在参考值附近. 仿真结果表明该算法不但十分有效, 而且对不同的网络状况具有很好的适应能力.

关键词: 主动队列管理; 拥塞控制; 模糊逻辑; 自校正

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 08-1246-04

A Fuzzy Logic Approach for Active Queue Management

ZHANG Jing-yuan, XIE Jian-ying, FU Chun

(Dept. of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: As an effective method for congestion control, Active Queue Management plays an important role in improving the QoS of the Internet. An effective self-tuning fuzzy queue management algorithm based on the mathematical model of TCP congestion control mechanism was presented. With the application of this algorithm, routers in IP network regulate its packet drop probability through a fuzzy self-tuning algorithm according to the queue length in the buffer. The main advantage of this algorithm is that the queue length can keep stable in a variety of network environments without the difficulty of parameter configuration. Simulations show that this fuzzy queue management algorithm is efficient, stable and outperforms other proposed queue management algorithms.

Key words: active queue management; congestion control; fuzzy logic; self-tuning

1 引言

近年来, 随着计算机和网络技术的迅猛发展以及多媒体应用的急剧增加, 人们对 Internet 的服务质量提出了更高的要求. 虽然目前 TCP 所采用的基于窗口的端到端拥塞控制机制对于保证 Internet 的鲁棒性 (robustness) 起到了关键性的作用^[1]. 但传统的去尾 (drop-tail) 先进先出 (FIFO) 的队列管理方式, 不可避免的会导致过高的传输延迟 (delay) 和延迟抖动 (delay jitter). 为适应越来越多的实时媒体传输的要求, 人们开始研究更为有效的队列管理算法 (根据路由器中的缓存占用情况实时调整数据包的丢弃概率), 使网络在采用 TCP 拥塞控制算法的基础上, 实现效率最高并尽可能减小路由器中的平均队列长度, 即主动队列管理技术 (Active Queue Management, AQM).

典型的主动队列管理技术, 如随机早期检测算法 (Random Early Detection, RED)^[2], 在每个路由器监控数据包的排队长度, 并在缓存占满之前就按一定的概率丢弃进入路由器的数据包, 这样就可以及早通知源端减小拥塞窗口, 以减少进入网络的数据量. RED 算法对于提高 TCP 连接的吞吐量、减小路由器中的队列长度起到了一定的作用. 但由于具有太多的可

调参数, RED 算法的调整十分困难, 因而很难在实际网络中得到应用. 文献[3]采用经典控制理论中控制器的设计方法, 依据 TCP 拥塞控制算法的线性化模型, 设计了满足稳定性保证的比例 (P) 和比例-积分 (PI) 算法, 但该算法对网络状态的变化比较敏感, 因而其使用范围受到了很大的限制. 由于模糊控制对模型的不确定性有很好的适应能力, 本文采用模糊控制原理, 设计了一种更为有效的主动队列管理算法, 并采用参数自校正技术, 使该算法对网络状态的变化具有很好的适应能力, 从而使网络的鲁棒性得到提高.

2 TCP 拥塞控制的数学模型

2.1 TCP 拥塞控制算法

目前, TCP 采用的是 Van Jacobson 的滑动窗口拥塞控制控制机制^[4]. 当拥塞产生时 (出现数据包丢失), 通过减小拥塞窗口的尺寸来达到降低数据传输速率的目的. 该算法需要三个参数, 即通告窗口 (awin)、拥塞窗口 (cwnd) 及慢启动阈值 (twnd), 并分慢启动 (slow start)、拥塞避免 (congestion avoidance)、快速重传 (fast retransmission) 和快速恢复 (fast recovery) 阶段. 以 TCP-Reno 为例, 其算法描述如下^[5]:

(1) 当一个新数据包得到确认时:

if ($cwnd < twnd$) $cwnd = cwnd + 1$; // slow start phase
else $cwnd = cwnd + 1 / cwnd$; // congestion avoidance

phase

(2) 源端接收到的重复 ACK 超过一定阈值时:

$twnd = twnd / 2$;
 $cwnd = twnd$; // fast recovery

(3) 如果传输超时:

$twnd = twnd / 2$;
 $cwnd = 1$;

有效窗口 $W = \min\{cwnd, awin\}$.

上述算法可解释如下:在慢启动阶段,对每一个确认的数据包,拥塞窗口按指数规律增加,直到窗口大小达到慢启动阈值;然后算法切换到拥塞避免阶段,并从此处逐渐线性增加拥塞窗口,直到源端收到 3 个重复的确认包, TCP Reno 重传该数据包并将拥塞窗口减为当前窗口的一半;如果传输超时,算法将拥塞窗口设置为 1,重新进入慢启动阶段.从以上分析可知, TCP 采用的是一种和式增加积式减小 (Additive Increase Multiplicative Decrease) 的基于窗口的端到端拥塞控制机制.

2.2 数学模型

对于上述 TCP 拥塞控制机制,当不考虑传输超时等因素时,其数学模型可通过以下互相耦合的非线性微分方程表示^[6]:

$$\begin{cases} \dot{W}(t) = \frac{1}{R(t)} - \frac{W(t)W(t-R(t))}{2R(t-R(t))} p(t-R(t)) \\ \dot{q}(t) = \frac{W(t)}{R(t)} N(t) - C \end{cases} \quad (1)$$

其中, \dot{x} 表示 x 对时间的导数,

W = 预期的 TCP 拥塞窗口的大小 (单位:分组);

q = 预期的队列长度 (单位:分组);

R = 往返时间 $RTT = q / C + T_p$ (单位:秒);

C = 链路容量 (单位:分组/秒);

T_p = 传播延迟 (单位:秒);

N = 负载因数 (TCP 连接的数量);

p = 分组的丢弃概率.

队列长度 q 和拥塞窗口的尺寸 W 为有界的正数,即, $q \in [0, \bar{q}]$, $W \in [0, \bar{W}]$, 其中 \bar{q} 、 \bar{W} 分别表示缓存容量和最大窗口尺寸. 数据包丢弃概率 p 的取值范围为 $[0, 1]$. 考虑具有单一瓶颈的网络拓扑结构,其窗口变化的结构框图如图 1 所示.

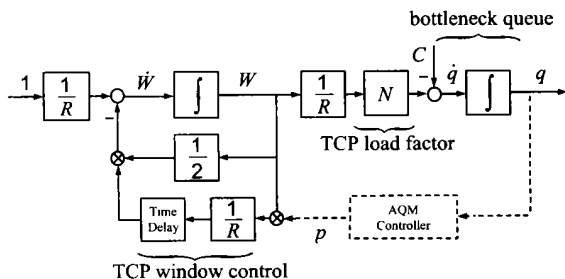


图 1 TCP 连接拥塞窗口变化的结构框图

3 基于模糊逻辑的主动队列管理算法

对于上述 TCP 拥塞控制模型,队列管理的目的是设计相应的数据包丢弃策略,从而可根据路由器中队列长度的变化来调整数据包的丢弃概率,使网络的资源利用率最高并且队列长度能够尽可能小且稳定.文献[3]对上述模型进行了线性化,并采用经典控制理论中控制器的设计方法设计了满足稳定性保证的比例和比例-积分控制器,但该算法对 TCP 的负载因数 N 和传输延迟 R 提出了相应的要求.由于在实际网络中,负载因数 N 和传输延迟 R 的变化是难以避免的,因此上述算法的使用范围受到了很大的限制.由于模糊控制对模型的不确定性有很好的适应能力,因此完全可采用模糊控制技术设计相应的主动队列管理算法.

3.1 基于模糊控制的队列管理算法

由于路由器中的队列长度是可以实时获取的,因此可采用队列长度 $q(t)$ 和队列长度的变化 $dq(t)$ 作为输入参数来调整数据包的丢弃概率 $p(t)$,从而使队列长度能够稳定在一较低的参考值 q_{ref} ($q_{ref} > 0$). 定义 $q(t)$ 、 $dq(t)$,

$q(t) = \hat{q}(t) / q_c$, 其中 $\hat{q}(t)$ 为 t 时刻路由器中的队列长度, q_c 为路由器的缓存容量;

$dq(t) = q(t) - q(t-1)$.

其语言变量分别为 {小 (S), 大 (B)} 和 {负 (N), 零 (Z), 正 (P)}, 其隶属度函数如图 2 和图 3 所示. 图中域值 $T1$ 、 $T2$ 、 $T3$ 、 $T4$ 的取值不同对网络的效率和稳定性都可能会产生一定程度的影响,但由于采用了 3.2 小节的自校正算法,这些域值的选择范围很大.在本文中,取 $T1 = 0.1$, $T2 = 0.6$, $T3 = 0.1$, $T4 = 0.1$.

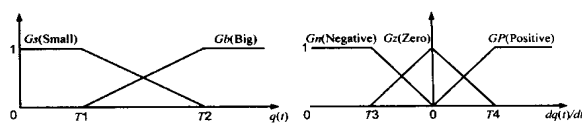


图 2 队列长度的隶属度函数

图 3 队列长度变化的隶属度函数

为方便地设计相应的自校正算法,本文采用 TS 模糊模型^[7].对以上所定义的变量以及相应的隶属度函数,数据包丢弃概率可用 8 条 IF-THEN 规则来描述:

规则 m : IF $q(t)$ is A_{1m} and $dq(t)$ is A_{2m} , THEN $ACT = F_m(t)$;

其中, A_{1m} 、 A_{2m} 分别表示规则 m 所对应的 $q(t)$ 和 $dq(t)$ 的语言变量值, $F_m(t)$ 为该条规则的输出. 定义:

$$F_m(t) = a_m(t) q(t) + b_m(t) (q(t) - q(t-1))$$

以规则 8 为例:

规则 8: IF $q(t)$ is B and $dq(t)$ is P,

THEN $ACT = F_8(t) = a_8(t) q(t) + b_8(t) (q(t) - q(t-1))$.

对于某条具体的规则,系数 $a_m(t)$ 、 $b_m(t)$ 的确定存在一定的难度,但 3.3 小节所介绍的自校正算法可将 $a_m(t)$ 、 $b_m(t)$ 调整到相应的最佳值.

根据以上模糊规则,采用加权平均法,其 t 时刻的数据包

丢弃概率为:

$$p(t) = \sum_{m=1}^8 F_m(t) w_m(t) = \sum_{m=1}^8 a_m(t) w_m(t) q(t) + \sum_{m=1}^8 b_m(t) w_m(t) (q(t) - q(t-1)) \quad (2)$$

其中: $w_m(t) = G_{A1_m}(q(t)) \cdot G_{A2_m}(dq(t))$ 为归一化后的权值, 即, $\sum_{m=1}^8 w_m(t) = 1$.

3.2 参数自校正算法

本小节将采用梯度下降法来调整参数 $a_m(t)$ 、 $b_m(t)$, 使其达到或接近最佳值. 首先定义性能指标函数:

$$J(t) = 0.5 (q(t) - q_{\text{ref}})^2 \quad (3)$$

其中, q_{ref} 表示参考队列长度. 则, 参数的自校正算法如下:

$$a_m(t+1) = a_m(t) - \frac{\partial J(t)}{\partial a_m(t)} \quad (4)$$

$$b_m(t+1) = b_m(t) - \frac{\partial J(t)}{\partial b_m(t)} \quad (5)$$

为使算法稳定, 应取一个较小的正数. 由 $J(t)$ 的定义 (3) 得:

$$\frac{\partial J(t)}{\partial a_m(t)} = (q(t) - q_{\text{ref}}) \cdot \frac{\partial q(t)}{\partial a_m(t)} \quad (6)$$

其中:

$$\frac{\partial q(t)}{\partial a_m(t)} = \frac{\partial q(t)}{\partial p(t)} \cdot \frac{\partial p(t)}{\partial a_m(t)}$$

由式 (2):

$$\frac{\partial p(t)}{\partial a_m(t)} = w_m(t) q(t) \quad (7)$$

由文献 [8] 的分析可知, 队列长度 q 与丢弃概率 p 之间存在一个较复杂的函数关系, 因此直接确定 $\partial q(t) / \partial p(t)$ 存在一定的难度. 但由于函数 $q(t+1) = G(p(t))$ 在 $0 < q < B$ 之间是连续可导的 (如图 4, 其中 B 为路由器中的缓存容量), 为简化问题, 可采用如下的数值方法来近似计算:

$$\frac{\partial q(t)}{\partial p(t)} = \frac{q(t) - q(t-1)}{p(t-1) - p(t-2)} \quad (8)$$

综合 (4~8) 可得:

$$a_m(t+1) = a_m(t) - \frac{q(t) - q(t-1)}{p(t-1) - p(t-2)} \cdot w_m(t) q(t) \quad (9)$$

同理可得:

$$b_m(t+1) = b_m(t) - \frac{q(t) - q(t-1)}{p(t-1) - p(t-2)} \cdot w_m(t) (q(t) - q(t-1)) \quad (10)$$

3.3 算法执行步骤

根据以上所介绍的模糊自校正算法, 其队列管理算法可按以下步骤进行:

(1) 依据队列长度 $q(t)$ 、队列长度的变化 $dq(t)$ 以及各自的隶属度函数计算:

$$w_m(t) = G_{A1_m}(q(t)) \cdot G_{A2_m}(dq(t))$$

(2) 依据式 (9)、(10) 所示的自校正算法, 分别计算 t 时刻

的参数 $a_m(t)$ 、 $b_m(t)$;

(3) 依据式 (2) 计算 t 时刻的数据包丢弃概率

$$p(t) = \sum_{m=1}^8 a_m(t) w_m(t) q(t) + \sum_{m=1}^8 b_m(t) w_m(t) (q(t) - q(t-1))$$

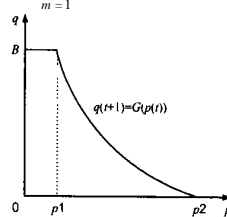


图 4 $q = G(p)$ 的变化曲线

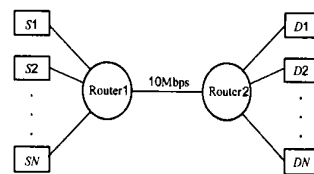


图 5 网络拓扑结构

4 仿真结果

本小节采用 NS-2 仿真软件对基于模糊逻辑的主动队列管理算法进行仿真研究. 考虑如图 5 所示的具有单一瓶颈的网络拓扑结构, 其链路带宽为 10Mbps, 平均分组大小为 500 字节, 路由器缓存容量为 500 个分组; 所有连接都采用 TCP-Reno 拥塞控制算法; 发送端 $S1, S2 \dots SN$ 采用 FTP 方式分别向接收端 $D1, D2 \dots DN$ 传输数据, 其传播延迟均匀分布在 20ms ~ 100ms 之间. 本文取 $q_{\text{ref}} = 0.2$ (即参考队列长度为 100 个分组), $\alpha = 0.015$; 与 RED 算法, 各参数取值分别为: $Q_{\text{min}} = 50$, $Q_{\text{max}} = 400$, $\text{weight} = 0.002$, $\max P = 0.1$; 和 PI 算法, 参数取值分别为: $a = 1.822e-5$, $b = 1.816e-5$, $w = 160$, $q_{\text{ref}} = 100^{[3]}$, 分别在不同的网络状况下进行了仿真研究. 仿真结果表明, 在 TCP 连接的数量 $N = 60$ 时 (图 6a) 三种算法都能使队列长度稳定, 但 RED 算法将会导致较高的队列长度, 而 PI 算法则使队列长

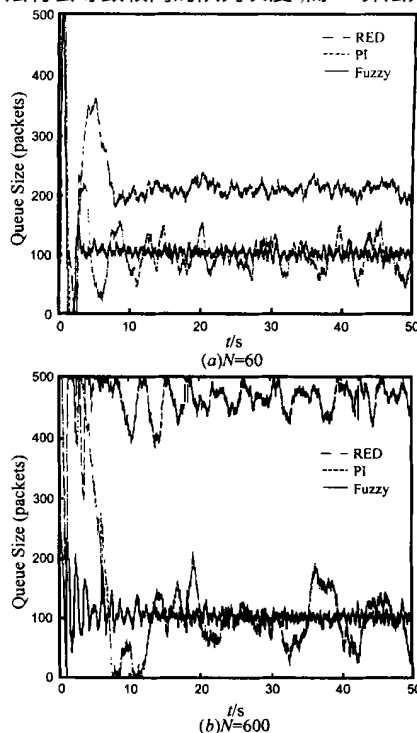


图 6 仿真结果

度波动较大;随着 TCP 连接数量的显著增加(图 6b, TCP 连接的数量 $N=600$), RED 算法使队列长度有显著增加,并趋于不稳定,PI 算法虽仍使平均队列长度保持在参考值附近,但队列长度的波动更加剧烈,而本文所介绍的模糊队列管理算法却仍然可以使队列长度很快地收敛到参考值附近.由以上分析可知,本文所介绍的模糊自校正算法不但参数调整方便,而且对网络状态的变化具有很强的适应能力.

5 结论

主动队列管理技术,作为一种新兴的 IP 层拥塞控制策略,对于提高 Internet 的服务质量起到了关键性的作用.本文依据 TCP 拥塞控制策略基于数据包丢弃的窗口变化机制,设计了一种基于模糊逻辑的主动队列管理算法,该算法依据路由器中队列长度的变化采用一定的模糊自校正原则,实时调整进入该路由器数据包的丢弃概率,从而通知源端减小拥塞窗口以减少进入网络的数据量,使路由器中的队列长度能够稳定在参考值附近.由于采用了参数自校正技术,仿真结果表明,该算法与其它队列管理算法相比具有更高的稳定性,并对网络状态的变化具有很高的适应能力.该算法还可通过标记数据包的拥塞标记位,应用在具有显示拥塞指示(Explicit Congestion Notification)功能的网络中.由此可避免由数据包丢弃而引起的重传(retransmission)所带来的传输延迟,从而使 Internet 的服务质量有更大程度的提高.

参考文献:

- [1] 罗万明,林闯,阎保平. TCP/ IP 拥塞控制研究[J]. 计算机学报, 2001, 24 (1): 1 - 18.
- [2] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance [J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking, 1993, 1 (4): 397 - 413.
- [3] Holot C, Misra V. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows [A]. In Proc IEEE INFOCOM [C]. Anchorage, AK, USA: IEEE Computer Society, 2001. 1726 - 1734.
- [4] Jacobson V. Congestion avoidance and control [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1988, 18 (4): 314 - 329.
- [5] Lakshman T V, Madhow U. The performance of TCP/ IP for networks with high bandwidth delay products and random loss [J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking, 1997, 5 (3): 336 - 350.
- [6] Holot C, Misra V. A control theoretic analysis of RED [A]. In Proc IEEE INFOCOM [C]. Anchorage, AK, USA: IEEE Computer Society, 2001. 1510 - 1519.
- [7] Hu Qingyang, Petr W. A predictive self-tuning fuzzy-logic feedback rate controller [J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking, 2000, 8 (6): 697 - 709.
- [8] Firoir V, Borden M. A study of active queue management for congestion control [A]. In Proc IEEE INFOCOM [C]. Tel Aviv, Israel, CA: IEEE Computer Society, 2000. 1435 - 1444.

作者简介:



张敬轅 男, 1976 年出生于山东邹平, 1999 年毕业于山东大学获硕士学位, 同年开始在上海交通大学攻读博士学位, 主要研究方向: 网络传输控制及多媒体技术应用. Email: jy Zhang926@sjtu. com.

谢剑英 男, 1940 出生于福建龙岩, 上海交通大学教授, 博士生导师, 上海交通大学电子信息学院控制工程与网络技术研究室主任, 主要研究方向: 复杂工业过程控制及计算机网络与信息处理.