

# 一种适于 Internet 拥塞控制的自校正队列管理算法

A Self-Tuning Queue Management Algorithm for Internet Congestion Control

张敬轺 谢剑英 刘立祥

(上海交通大学电子信息学院 上海 200030)

**Abstract** As an effective method for congestion control, Active Queue Management plays an important role in improving the Internet QoS. In this paper, we first analyze the properties of RED, then design an effective queue management algorithm based on gradient descent approach. With the application of this algorithm, routers in IP network adjust its packet drop probability according to the queue length in the buffer. The main advantage of this algorithm is that the queue length can keep stable at a low level in a variety of network environments. Simulations show that this self-tuning queue management algorithm is efficient, stable and outperforms RED queue management algorithms significantly.

**Keywords** Active queue management, Congestion control, Self-tuning, Gradient descent

## 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 Internet 的鲁棒性起到了关键性的作用<sup>[1]</sup>。但传统的去尾(drop-tail)先进先出(FIFO)的队列管理方式,不可避免地会导致过高的传输延迟和延迟抖动。为适应越来越多的实体媒体传输的要求,人们开始研究更为有效的队列管理算法,从而使网络在采用 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算法如随机早期检测算法(Random Early Detection, RED),根据路由器中的队列长度调整数据包的丢弃或标记(mark)概率,从而提高 TCP 连接的吞吐量。但该算法需要复杂的参数调节,而且对网络状态的变化不具备适应能力。为解决上述问题,本文采用梯度下降方法设计了一种有效的自校正主动队列管理算法,该算法不需经过复杂的参数调节便可根据网络状况实时调节算法的参数,从而使路由器中的队列长度在不同的网络状况下都能稳定在参考值附近。

## 2. 随机早期检测(RED)算法

RED 算法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流量。对于面向连接的 TCP 数据流来说,RED 有可能避免丢弃属于同一连接的连续数据包。从而避免多个数据流的同步,提高连接的吞吐量。RED 算法主要包含两部分<sup>[2]</sup>:

1)平均队列长度的计算 Internet 上数据流量的突发性,使用平均队列长度比使用瞬时值更能精确获取链路的拥塞情况。RED 算法根据权值  $q_w$ ,通过(1)式计算平均队列长度  $ave-q$ 。

$$ave-q = (1-q_w) * ave-q + q_w * n_{queued} \quad (1)$$

其中,  $n_{queued}$  为采样时刻的队列长度。式(1)的加权平均队列长度的计算类似于一个低通滤波器,权值决定滤波器的时间常数。

2)计算数据包的丢弃概率 根据(1)式所计算的平均队列长度,RED 算法的丢弃概率如(2)式所示。

$$p = \begin{cases} 0, & 0 \leq ave-q \leq Q_{min} \\ \frac{ave-q - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} P_{max}, & Q_{min} \leq ave-q \leq Q_{max} \\ 1, & Q_{max} \leq ave-q \leq B \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$  为阈值,  $P_{max}$  为最大丢弃概率,  $B$  为缓存大小(如图 1)。

对于上述 RED 算法,参数  $q_w$ ,  $Q_{min}$ ,  $Q_{max}$ ,  $P_{max}$  都可根据需要进行调节。但自从 RED 出现以来,其参数调节一直是一

张敬轺 博士生,主要研究方向为网络传输控制及多媒体技术应用。谢剑英 教授,博导,主要研究方向为复杂工业过程控制及计算机网络与信  
息处理。刘立祥 博士生,主要研究方向为信号处理。

说明了该算法的有效性。虽然提出的算法在最差情况下具有指数级的时间复杂度,但是在实际的网络中该算法能够取得良好的性能,可以有效地解决 MCOP 问题。

## 参考文献

- 1 Chen S, et al. An overview of quality-of-service routing for the next generation high-speed networks: Problems and solutions. IEEE Network, 1998, 12(6): 64~79
- 2 Apostolopoulos G, et al. Quality of service based routing: A performance perspective. In: ACM SIGCOMM '98 Conference, Vancouver, British Columbia, Canada, Aug. 1998, 17~28
- 3 Crawley E, et al. A framework for QoS-based routing in the Internet. Internet draft, IETF, July 1998
- 4 Moy J, et al. OSPF version 2. RFC 2328, IETF, April 1998
- 5 Vogel R, et al. QoS-based routing of multimedia streams in computer networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1235~1244
- 6 Cormen T H, et al. Introduction to Algorithms, 2<sup>nd</sup> Edition. McGraw-Hill, Boston, 2001
- 7 Wang Z, et al. OoS routing for supporting resource reservation. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1228~1234
- 8 Korkmaz T, et al. Multi-constrained optimal path selection. In: IEEE INFOCOM 2001 Conf. Anchorage, Alaska, 2001
- 9 Rampal S, et al. An evaluation of routing and admission control algorithms for multimedia traffic. Computer Communication, 1995, 18(10): 755~768
- 10 Waxman B. M. Routing of multipoint connections. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1988, 6(12): 1617~1622
- 11 Calvert K I. Modeling internet topology. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(6): 160~163

个难题。以参数  $Q_{\max}$  为例,如果参数选得过大将会导致过高的排队延迟;反之如果参数选得太小,又会导致队列长度的剧烈波动,从而降低资源的利用率。因此,RED 只能调整以提高资源利用率或实现较低的传输延迟和丢包失率,而不能同时实现上述目标。此外,当链路上的用户数量增加时还将不可避免地导致平均队列长度的增加。与 RED 算法不同,本文所介绍的自校正队列管理算法,不需经过复杂的参数调节便可使队列长度一直稳定在参考值附近,而不受用户数量等因素的影响,从而实现高的资源利用率以及较低的传输延迟和丢包失率。

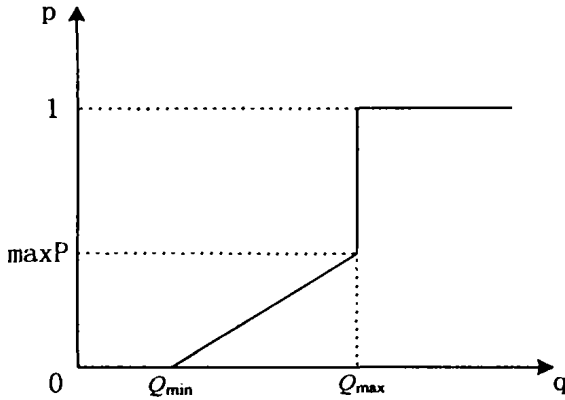


图1 RED 算法包丢弃概率与平均队列长度的关系

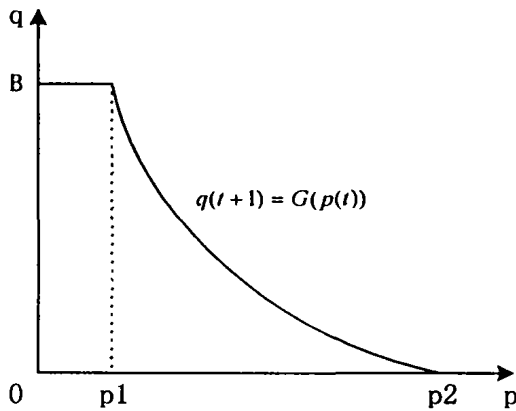


图2 TCP 连接中队列长度与包丢弃概率的关系

### 3. 自校正队列管理算法

#### 3.1 丢弃概率的计算

虽然 RED 算法可以通过合理的参数配置来提高网络的服务质量,但由于该算法具有太多的可调参数,其参数配置十分困难,因而往往造成网络状态的不稳定,很难达到预期的效果<sup>[3]</sup>。为解决上述问题,文[4]依据经典控制理论方法,设计了相应的比例(P)和比例-积分(PI)队列管理算法,并采用控制器的稳定性理论对算法的稳定性进行了分析。本文将根据路由器中的队列长度  $q(t)$  和队列长度的变化  $dq(t)/dt = q(t) - q(t-1)$  来计算数据包的丢弃概率,

$$p(t) = a(t) \cdot q(t) + b(t) \cdot (q(t) - q(t-1)) \quad (3)$$

(3)式的丢弃概率计算方法,类似于比例-微分(PD)控制器,仍然可以根据控制器的稳定性理论对参数进行调节<sup>[4]</sup>。但这种方法通常是针对一特定的网络状况进行的,所选择的参数往往在一定条件下满足设计要求,而在用户数量或传输延迟等因素发生改变时,很难保证其服务质量。为解决上述问题,

本文采用 3.2 小节的参数自校正算法,对 PD 控制器的参数  $a(t)$  和  $b(t)$  进行实时调节,从而使算法对网络状态的变化具有很好的适应能力。

#### 3.2 参数自校正算法

本小节将采用梯度下降法<sup>[5]</sup>来调整参数  $a(t)$ 、 $b(t)$ ,使其达到或接近最佳值。首先定义性能指标函数:

$$J(t) = 0.5(q(t) - q_{ref})^2 \quad (4)$$

其中,  $q_{ref}$  表示参考队列长度。则,参数的自校正算法如下:

$$a(t) = a(t-1) - \eta \frac{\partial J(t)}{\partial a(t)} \quad (5)$$

$$b(t) = b(t-1) - \eta \frac{\partial J(t)}{\partial b(t)} \quad (6)$$

为使算法稳定,  $\eta$  应取一个较小的正数。由  $J(t)$  的定义(4)得:

$$\frac{\partial J(t)}{\partial a(t)} = (q(t) - q_{ref}) \cdot \frac{\partial q(t)}{\partial a(t)} \quad (7)$$

其中:

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

由(3)式:

$$\frac{\partial p(t)}{\partial a(t)} = q(t) \quad (8)$$

$$\frac{\partial p(t)}{\partial b(t)} = q(t) - q(t-1) \quad (9)$$

由文[6]的分析可知, TCP 连接中队列长度  $q$  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 2,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:

$$\frac{\partial q(t)}{\partial p(t)} = dqp = \frac{q(t) - q(t-1)}{p(t-1) - p(t-2)} \quad (10)$$

综合(5~10)可得:

$$a(t) = a(t-1) - \eta \cdot (q(t) - q_{ref}) \cdot dqp \cdot q(t) \quad (11)$$

同理可得:

$$b(t) = b(t-1) - \eta \cdot (q(t) - q_{ref}) \cdot dqp \cdot (q(t) - q(t-1)) \quad (12)$$

#### 3.3 算法执行步骤

由以上分析可知,基于梯度下降的自校正队列管理算法,根据当前及前一次的队列长度  $q(t)$ 、 $q(t-1)$ ,以及与之相应的丢弃概率  $p(t-1)$ 、 $p(t-2)$  来确定当前的数据包丢弃概率。该算法只需存贮  $q(t-1)$ 、 $p(t-1)$ 、 $p(t-2)$ 、 $a(t-1)$ 、 $b(t-1)$  等信息,便可根据一定的自校正原则来确定数据包的丢弃概率,而不需要进行任何参数设置。该算法的执行步骤如下:

- 1) 根据当前队列长度,依据(11)(12)式计算该时刻的参数  $a(t)$ 、 $b(t)$ ;
- 2) 根据(3)式计算当前时刻的数据包丢弃概率  $p(t)$ ;
- 3) 存贮该时刻的  $a(t)$ 、 $b(t)$ 、 $p(t)$  以备下一次计算。

### 4. 仿真结果

本小节将采用 NS-2 仿真软件对基于梯度下降的自校正队列管理算法进行仿真研究。考虑如图 3 所示的具有单一瓶颈的网络拓扑结构,其链路带宽为 10Mbps,传播延迟为 30ms,平均分组大小为 1K 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, ..., SN 采用 FTP 方式分别向接收端 D1, D2, ..., DN 传输数据。本文取  $q_{ref} = 100$  (即参考队列长度为 100 个分组),  $\eta = 0.015$ ,与 RED 算法(各参数取值分别为:  $Q_{min} = 50$ ,  $Q_{max} =$

400,  $\text{weight}=0.002$ ,  $\text{maxP}=0.1$ ) 在不同的网络状况下进行仿真研究。仿真结果表明,随着 TCP 连接数量的增加,在队列长度基本稳定以后,RED 算法将导致平均队列长度的显著增加,而本文所介绍的自校正算法可以使队列长度一直稳定在参考值附近(图 4)。此外,为研究队列长度的暂态特性,分别在 TCP 连接的数量为 50 和 500 两种情况下进行了持续 50s 的仿真。仿真结果表明,在 TCP 连接的数量  $N=50$  时(图 5)两种算法都能使队列长度稳定;但当 TCP 连接数量增加到 500 时,RED 使队列长度有显著增加,并趋于不稳定,而本文

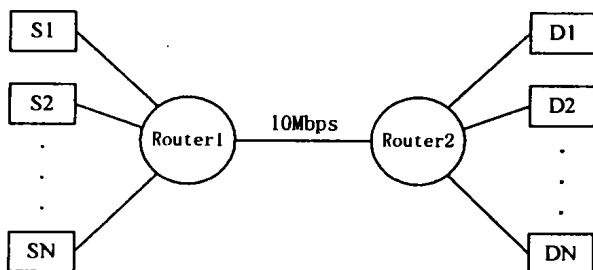


图 3 网络拓扑结构

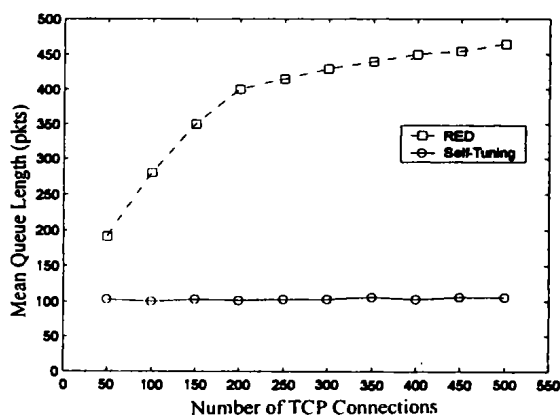


图 4 不同 TCP 连接数量时的平均队列长度

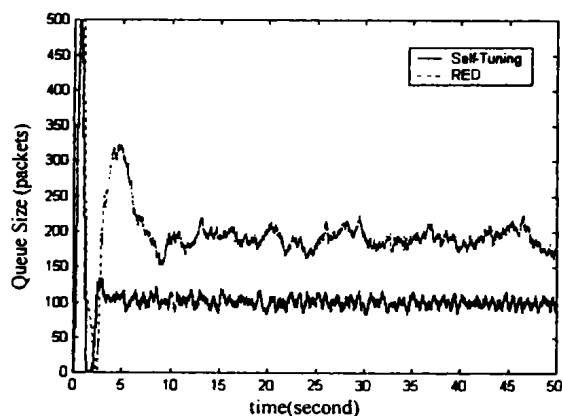


图 5 TCP 连接数量=50 时的队列长度

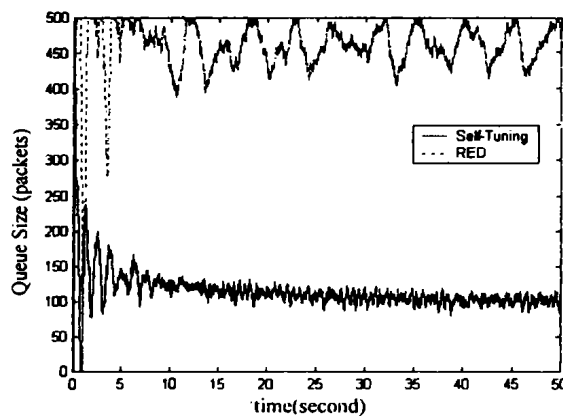


图 6 TCP 连接数量=500 时的队列长度

所介绍的自校正队列管理算法仍能使队列长度很快地收敛到参考值附近(图 6)。由以上分析可知,本文所介绍的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。

**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,设计了一种基于梯度下降的自校正队列管理算法,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 RED 算法相比具有更高的稳定性,并对网络状态的变化具有很好的适应能力。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. 计算机学报, 2001,24(1):1~18
- 2 Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993,1(4):397~413
- 3 Holot C, Misra V. A control theoretic analysis of RED. In: Proc. IEEE INFOCOM 2001. 1510~1519
- 4 Holot C, Misra V. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows. In: Proc. IEEE INFOCOM 2001
- 5 Firoir V, Borden M. A study of active queue management for congestion control. In: Proc. IEEE INFOCOM 2000
- 6 Hu Qingyang, Petr W. A predictive self-tuning fuzzy-logic feedback rate controller. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000,8(6):697~709