

# 基于神经元自适应变结构控制的主动队列管理算法

周川,王宗欣,吴益飞,陈庆伟

(南京理工大学自动化学院,南京 210094)

(njz\_c@yahoo.com.cn)

**摘要:**针对网络 TCP 模型的非线性以及回路延时和负载波动等不确定性因素,提出一种基于神经元自适应变结构控制(VSC)的主动队列管理(AQM)算法。通过非线性变结构控制以保证路由器队列响应的快速性和鲁棒性;同时考虑到滑模控制中存在的抖振会引起队列波动和控制精度降低等问题,引入神经元在线调整控制器参数以减弱抖振,从而减小队列延时和模型不确定性的影响,提高 AQM 系统的鲁棒性和性能。最后通过 NS-2 仿真实验验证了算法的有效性。

**关键词:**主动队列管理;拥塞控制;变结构控制;神经元;抖振

**中图分类号:** TP393.06 **文献标志码:** A

## Active queue management algorithm based on neuron adaptive variable structure control

ZHOU Chuan, WANG Zong-xin, WU Yi-fei, CHEN Qing-wei

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

**Abstract:** Considering the non-linearity of TCP model, uncertainty of Round Trip Time (RTT) and fluctuation of network load, an Active Queue Management (AQM) scheme based on Variable Structure Controller (VSC) using single neuron adaptive learning was proposed. The nonlinear VSC was used to guarantee the swiftness and robustness of queue response at router. However, the jitter of VSC would cause the queue fluctuation and performance degradation. Therefore, a single neuron was introduced to adjust the parameters of the VSC in order to alleviate the effect of jitter and modeling uncertainty. The proposed scheme can reduce the jitter and enhance the robustness for AQM control system greatly. Finally, the simulation results show the effectiveness of the proposed algorithm through NS-2 simulator.

**Key words:** Active Queue Management (AQM); congestion control; variable structure control; neuron; jitter

## 0 引言

网络拥塞已成为当今通信网络和 Internet 领域中的一个重要问题<sup>[1-2]</sup>。为提高网络的服务性能(Quality of Service, QoS),各种 TCP/IP 网络的拥塞控制得到了广泛的关注。在早期源端 TCP 流控制(flow control)的基础上,网络中间节点(路由器)的拥塞控制已成为网络和控制理论界的研究热点。

中间节点的拥塞控制分为被动与主动两种方式,传统的被动队列管理策略即丢尾(Drop Tail)算法具有实现简单、可扩展性强的优点,但存在死锁和满队列问题。为了克服被动队列管理算法的缺陷,1998 年 IETF 建议在路由器中采用主动队列管理(Active Queue Management, AQM)机制<sup>[3]</sup>。主动队列管理机制能够在路由器缓冲队列溢出之前检测到拥塞,通过对数据包进行必要的主动丢弃,并将拥塞信息通知源端使其降低数据发送速率,从而达到降低丢包率和提高链路利用率的目的。随机早期检测(Random Early Detection, RED)算法是最早提出的 AQM 机制<sup>[4]</sup>,它可降低丢包率、减小延时及将队列长度较好地维持在期望值附近,但其性能存在对参数设置敏感和易受网络负载波动影响的缺陷。因此各种改进的 RED 算法,如 ARED<sup>[5]</sup>,SRED<sup>[6]</sup>,FRED<sup>[7]</sup>和 BLUE<sup>[8]</sup>等方法相继被研究和提出。然而以上拥塞控制算法多为基于启发

式原理实现的,其有效性主要通过 NS-2 仿真验证,理论上难以保证 AQM 系统的稳定性。

REM 随机指数标记算法则采用价格变量来度量网络的拥塞程度,并采用基于优化的策略同时保证网络具有高的利用率和低的丢包率<sup>[9]</sup>。近年来,从控制理论的角度研究 TCP/AQM 拥塞控制机制为解决网络拥塞问题提供了新的途径<sup>[10-11]</sup>。基于 TCP 流非线性动态模型并在平衡点线性化后,可采用经典控制理论的比例积分控制器(Proportional-Integral Controller, PI)算法或比例—积分—微分(Proportion-Integration-Differentiation, PID)算法<sup>[12]</sup>,通过减小路由器实时队列长度与期望队列长度的误差,以达到消除网络拥塞的目的。该类基于经典控制理论的 AQM 算法的局限性在于其设计是针对近似线性化模型,所以网络存在严重非线性或环境变化时其性能和稳定性变差。由于 TCP 模型本身具有非线性和参数不确定性的特点,因此基于变结构控制(Variable Structure Control, VSC)等非线性控制技术的 AQM 算法被提出<sup>[13-15]</sup>。该类算法直接针对 TCP 流的非线性模型进行控制器设计,并且对网络负载与队列延时等不确定因素具有较强的鲁棒性,但未考虑抖振问题对 AQM 控制系统的不利影响。

本文针对网络 TCP 模型存在的非线性和负载波动等不确定性问题,研究并提出一种基于神经元自适应滑模变结构

**收稿日期:**2011-03-28; **修回日期:**2011-05-21。 **基金项目:**江苏省自然科学基金资助项目(BK2007206);南京理工大学自主科研专项计划项目(2010GJPY066);南京市留学回国启动基金资助项目(AD41242)。

**作者简介:**周川(1970-),男,江苏南京人,教授,博士,主要研究方向:智能控制、网络拥塞控制;王宗欣(1983-),男,山东临沂人,硕士研究生,主要研究方向:网络拥塞控制;吴益飞(1979-),男,江苏丹阳人,讲师,博士,主要研究方向:智能控制;陈庆伟(1963-),男,江苏兴化人,教授,博士,主要研究方向:智能控制。

控制的主动队列管理方法。该方法在常规滑模变结构控制的基础上,引入神经元对变结构控制器参数进行在线调节以减弱变结构控制的抖振问题,从而保证路由器队列响应的快速性、稳定性以及在网络参数变化情况下 AQM 系统的鲁棒性。最后采用 NS2 仿真软件进行了仿真验证。

## 1 TCP 流非线性动态模型

采用 Jacobson 提出的加性增加乘性减小 (Additive Increase Multiplicative Decrease, AIMD) 机制<sup>[16]</sup>在拥塞避免阶段控制 TCP 发送窗口的长度。设当前发送窗口值设为  $cwnd$ , 如果无拥塞发生,窗口在每个采样时刻将增加  $1/cwnd$ ; 当拥塞发生时窗口将减小  $cwnd/2$ 。假设一个单瓶颈链路结构源端的负载数目为  $N$ , 丢弃/标记概率为  $p(t)$ , 且  $0 \leq p(t) \leq 1$ , 在一个采样时间内每个负载拥塞窗口的变化  $\Delta cwnd$  为:

$$\Delta cwnd = \frac{1}{N} \left( \frac{1-p(t)}{cwnd} - \frac{cwnd}{2} p(t) \right) \quad (1)$$

设  $r(t)$  为输入速率,  $\tau(t)$  为回路往返时间, 其中输入速率由式(2)求得:

$$r(t) = N \cdot (cwnd/\tau(t)) \quad (2)$$

则输入速率的变化为

$$\Delta r(t) = N \cdot (\Delta cwnd/\tau(t)) \quad (3)$$

回路往返时间的变化取为

$$\Delta \tau(t) = \tau(t)/(N \cdot cwnd) \quad (4)$$

由上述式(1)~(4), 可得源端的输入速率的变化率为

$$\frac{\Delta r(t)}{\Delta \tau(t)} = \frac{N \cdot (\Delta cwnd/\tau(t))}{\tau(t)/(N \cdot cwnd)} = \frac{N}{\tau(t)^2} - \left( \frac{N}{\tau(t)^2} + \frac{r(t)^2}{2N} \right) p(t) \quad (5)$$

由此可得 TCP 流的非线性微分方程如下:

$$\begin{cases} \dot{r}(t) = \frac{N}{\tau^2(t)} - \left( \frac{N}{\tau^2(t)} + \frac{r^2(t)}{2N} \right) p(t) \\ \dot{q}(t) = r(t) - C_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $r(t)$  是输入速率 (单位: bps);  $q(t)$  是路由器瞬时队列长度 (即数据包数);  $T_p$  表示传输延迟 (单位: s);  $\tau(t) = q(t)/C_0 + T_p$  为回路响应时间 (单位: s);  $C_0$  代表链路容量 (单位: bps);  $N$  为 TCP 连接数目, 即网络负载;  $p(t)$  是丢弃/标记概率。

## 2 单神经元变结构控制器设计

基于神经元变结构控制 (NVSC) 的 AQM 算法的控制结构如图 1 所示。

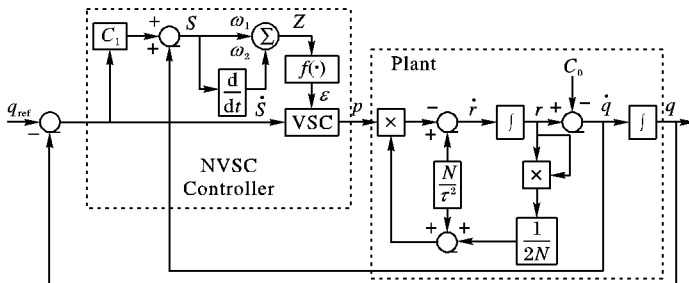


图 1 基于 NVSC 的 AQM 控制系统结构

图 1 所示的 AQM 控制系统的输入为期望队列长度  $q_{ref}$ , 输出为实际队列长度  $q$ , 设队列长度误差为  $e_q(t) = q_{ref} - q(t)$ , 输入速率的误差为  $\dot{q}(t) = r(t) - C_0$ 。

定义  $x_1(t) = e_q(t)$ ,  $x_2(t) = \dot{e}_q(t)$ , 则 TCP 流体非线性微分方程(6)可描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = g(t) - h(t)p(t) \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $g(t) = \frac{N}{\tau^2(t)}$ ,  $h(t) = \frac{N}{\tau^2(t)} + \frac{(x_2(t) + C_0)^2}{2N}$ 。

针对该系统采用滑模变结构控制, 选取滑动面如下:

$$s(t) = c_1 x_1(t) + x_2(t); s(t) \in \mathbf{R}, c_1 > 0 \quad (8)$$

上述滑动面应满足如下两个条件<sup>[10]</sup>:

$$s(t) = C_1 x_1(t) + x_2(t) = 0 \quad (9)$$

$$\dot{s}(t) = C_1 \dot{x}_1(t) + \dot{x}_2(t) = 0 \quad (10)$$

根据滑动面需满足的两个条件, 可将动态微分方程(7)写成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) = -c_1 x_1(t) \\ \dot{x}_2(t) = g(t) - h(t)p(t) \end{cases} \quad (11)$$

为了改善趋近滑模面的性能, 采用指数趋近律:

$$\dot{s}(t) = -\varepsilon \text{sign}(s(t)) - ks(t); \varepsilon > 0, k > 0 \quad (12)$$

根据式(10)~(12), 可得变结构控制律如下:

$$p(t) = \frac{1}{h(t)} [C_1 x_2 + g(t) + \varepsilon \text{sign}(s(t)) + ks(t)] \quad (13)$$

则最终的丢包策略为:

$$p(t) = \begin{cases} 1, & p(t) \geq 1 \\ p(t), & 0 < p(t) < 1 \\ 0, & p(t) \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

为了维持队列长度在期望值附近, 必须保证系统是稳定的, 其稳定性由如下定理给出。

**定理 1** 针对 AQM 控制系统(7), 如果滑动面和趋近律选取分别为式(8)和式(12), 且趋近律参数满足  $\varepsilon > 0$  和  $k > 0$ , 则可使系统状态一直收敛到滑模面上, 且系统是渐近稳定的。

**证明** 定义李雅普诺夫函数:  $V = \frac{1}{2}s^2$ , 其一阶微分

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s \cdot \dot{s} = (C_1 \dot{x}_1 + \dot{x}_2) \cdot s = \\ &= (C_1 x_2 + g(t) - h(t)p(t)) \cdot s = (C_1 x_2 + g(t) - \\ &= h(t) \cdot \frac{1}{h(t)} [C_1 x_2 + g(t) + \varepsilon \text{sign}(s) + ks]) \cdot s = \\ &= -\varepsilon |s| - k |s| \end{aligned}$$

由式(11)可知:  $\varepsilon > 0, k > 0$ , 则有

$$\dot{V} = -\varepsilon |s| - k |s| = -(\varepsilon + k) |s| \leq 0$$

因此可知闭环系统渐近稳定。

为进一步改善 AQM 控制系统的性能和克服滑模变结构控制的抖振现象, 本文考虑采用神经元在线学习对滑模变结构控制器参数进行在线调整。该神经元自适应变结构 AQM 算法 (Neuron learning based Variable Structure Control, NVSC) 中神经元的输入为滑动面  $s(t)$  及其趋近律  $\dot{s}(t)$ , 神经元根据网络拥塞的情况通过梯度学习算法自适应调节权值  $\omega_1(t), \omega_2(t)$  来在线调整变结构控制器的参数  $\varepsilon(t)$ 。

由系统控制结构图 1 可知, 根据单神经元的状态为

$$z(t) = s\omega_1(t) + \dot{s}\omega_2(t) \quad (14)$$

神经元的输出为滑模变结构控制指数趋近律参数  $\varepsilon(t)$ :

$$\varepsilon(t) = f(z(t)) = \frac{1 - e^{-z(t)}}{1 + e^{-z(t)}} \quad (15)$$

当 AQM 控制系统存在参数变化或负载波动时, 权值  $\omega_i(t)$  ( $i = 1, 2$ ) 自动进行调整。由于变结构控制的抖振与切换函数  $s$  及其导数  $\dot{s}$  关系密切,  $s$  与状态点距切换面  $s = 0$  的距离成正比, 而  $\dot{s}$  与状态点趋向切换面的速度成正比。当  $s\dot{s} = 0$  时, 系统状态保持在切换面上滑动, 无抖振现象。因此, 若要削弱抖振应沿着  $|s\dot{s}|$  减小的方向调整权值  $\omega_i$ , 即通过神经元的自学习使切换函数  $s$  快速收敛到零, 并最终渐近趋向原点。

选择神经元学习的目标函数如下:

$$E(t) = |s(t) \cdot \dot{s}(t)| = -s(t) \cdot \dot{s}(t) \quad (16)$$

为使  $E(t)$  最小化,且  $q(t)$  稳定在  $q_{\text{ref}}$  附近,对权值  $\omega$  的调整采用如下梯度算法:

$$\omega(t+1) = \omega(t) - \eta \frac{\partial E(t)}{\partial \omega(t)} \quad (17)$$

$$\frac{\partial E(t)}{\partial \omega_i(t)} = \frac{\partial E(t)}{\partial s(t)} \frac{\partial s(t)}{\partial \varepsilon(t)} \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial z(t)} \frac{\partial z(t)}{\partial \omega_i(t)} \quad (18)$$

其中:  $\frac{\partial E(t)}{\partial s(t)} = -s(t)$ ,  $\frac{\partial s(t)}{\partial \varepsilon(t)} = -\text{sign}(s)$ ,  $\frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial z(t)} = f'(z(t))$ 。

又由神经元激活函数式(15),其一阶微分如下:

$$f'(z(t)) = \left[ \frac{1 - e^{-z(t)}}{1 + e^{-z(t)}} \right]' = \frac{-2e^{-z(t)}}{[1 + e^{-z(t)}]^2} = \frac{[f(z(t)) - 1][f(z(t)) + 1]}{2} = \frac{\varepsilon(t)^2 - 1}{2} \quad (19)$$

综合式(17)~(19)可得神经元权值  $\omega$  的调整算式如下:

$$\begin{cases} \omega_1(t+1) = \omega_1(t) + \eta \cdot \frac{[\varepsilon(t)^2 - 1]}{2} \text{sign}(s) s(t)^2 \\ \omega_2(t+1) = \omega_2(t) + \eta \cdot \frac{[\varepsilon(t)^2 - 1]}{2} \text{sign}(s) s(t) \dot{s}(t) \end{cases} \quad (20)$$

### 3 仿真实验与性能分析

采用 NS-2 仿真软件<sup>[17]</sup>对本文 NVSC 算法和已有的 RED 算法、PI 算法、VSC 算法进行仿真验证和性能分析。仿真采用如图2所示的哑铃状网络拓扑结构,两端分别为 TCP 流的源端和接收端,中间节点为路由器  $R_1$  和  $R_2$ 。TCP 源端与路由器  $R_1$  和 TCP 接收端与路由器  $R_2$  之间的链路带宽均为 10 Mbps,传输延时均为 5 ms。网络的瓶颈链路位于  $R_1$  和  $R_2$  之间,链路的带宽为 15 Mbps,传输延时为 20 ms,缓冲队列长度为 300 个包,每个包的大小为 1000 B。 $R_1$  与  $R_2$  间的队列管

理采用各种 AQM 算法,其余节点算法均为 Drop Tail。设置期望队列长度  $q_{\text{ref}} = 200$ ,每 10 ms 记录一次数据。

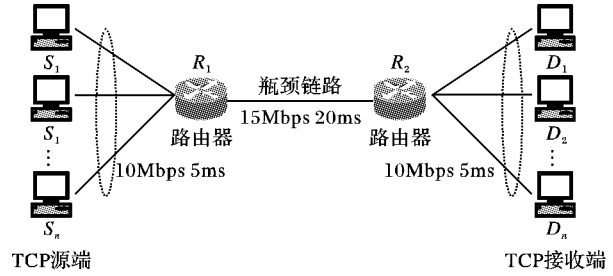


图2 仿真实验的网络拓扑图

各算法的参数选择如下:

RED 算法:最小和最大阈值分别为  $\text{thresh}_{\min} = 100$ ,  $\text{thresh}_{\max} = 200$ ;

PI 算法:比例和积分系数分别为  $a = 0.00001822$ ,  $b = 0.00001816$ ;

VSC 算法:滑动面系数  $c_1 = 2$ ,链路容量  $C_0 = 1250$ ;

NVSC 算法:滑动面系数  $c_1 = 2$ ,链路容量  $C_0 = 1250$ ,趋近律系数  $k = 4$ 。

在本实验中,考查网络负载随时间变化情况下各算法在队列稳定性、平均延时等方面的性能,其中网络参数设置和各算法参数的设置不变,考虑在 0 s,40 s,80 s,120 s,160 s 在发送端分别依次启动 50 个 TCP 流来模拟负载的波动,仿真时间为 200 s。

图3给出了负载变化条件下各算法的队列响应情况。由图可以看出,RED 算法、PI 算法在负载发生变化时队列长度的波动较大,且不能很好地维持队列长度在期望值附近;VSC 算法与 NVSC 算法能很好地维持队列长度在期望值附近,只是在负载加入的时刻会出现单峰波动,并且 VSC 算法的波动较 NVSC 算法的波动稍大。

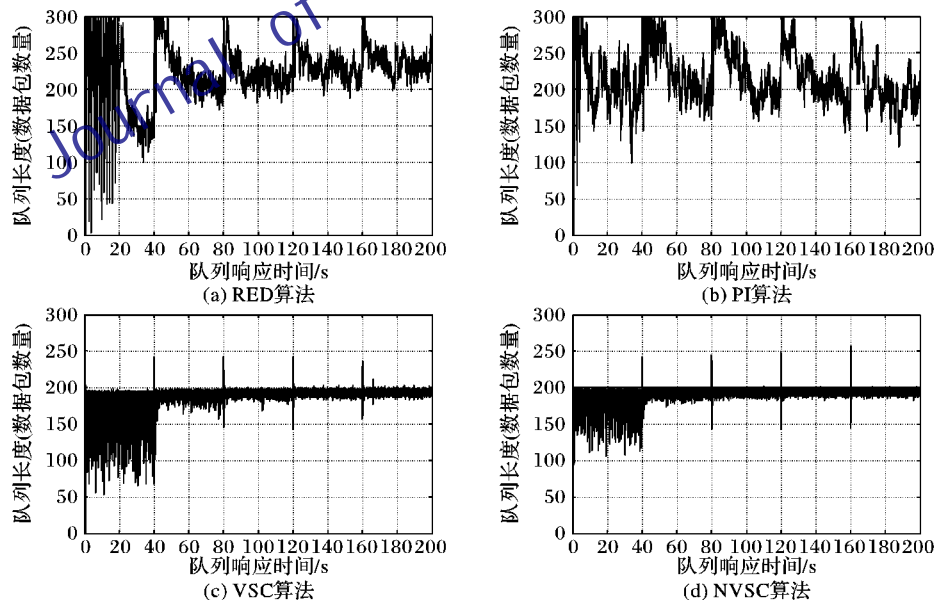


图3 负载波动条件下队列长度的变化

本实验还统计了负载变化的情况下各算法的平均延时情况:RED 算法为 88.035 ms,PI 算法为 98.761 ms,VSC 算法为 85.937 ms,NVSC 算法为 83.574 ms。可以看出 NVSC 算法平均延时最小,而 PI 算法的平均延时最大。

### 4 结语

本文针对网络中存在非线性和负载波动等不确定因素,

提出了一种基于神经元变结构控制的自适应 AQM 算法。该算法继承了 VSC 算法对不确定非线性系统控制的快速性和鲁棒性好的优点,并通过引入单神经元对变结构控制器参数进行在线调节以减弱常规变结构控制的抖振问题。仿真实验表明,该神经元自适应变结构(NVSC)算法能很好地维持队列长度在期望值附近,并且传输延时较小,当网络环境变化时仍具有很好的队列稳定性和鲁棒性。(下转第 2312 页)



- ings of the ACM SIGMETRICS 2004 Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York: ACM, 2004: 177 – 188.
- [7] ESTAN C, KEYS K, MOORE D, *et al.* Building a better netflow [C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM, 2004: 245 – 256.
- [8] 吴桦, 龚俭, 杨望. 一种基于双重 Counter Bloom Filter 的长流识别算法[J]. 软件学报, 2010, 21(5): 1115 – 1126.
- [9] SHARMA M R, BYERSJ W. Scalable coordination techniques for distributed network monitoring [C]// Proceedings of the PAM 2005 International Workshop on Passive and Active Network Measurement. Boston, MA: PCM, 2005: 349 – 352.
- [10] SAVAGE S, WETHERALL D, KARLIN A, *et al.* Practical network support for IP traceback [C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM 2000 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM, 2000: 295 – 306.
- [11] VYAS R, MICHAEL K R, WALTER W, *et al.* Coordinated sampling: an efficient, network-wide approach for flow monitoring, #CMU-CS-07-139 [R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, School of Computer Science, 2007.
- [12] LALL A, SEKAR V, XU J, *et al.* Data streaming algorithms for estimating entropy of network traffic [C]// Proceedings of the ACM SIGMETRICS 2006 Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York: ACM, 2006: 145 – 156.
- [13] COLLINS M, REITER M K. Finding peer-to-peer file sharing using coarse network behaviors [C]// ESORICS 2006: Proceedings of the 11th European Symposium on Research in Computer Security. Hamburg: ESORICS, 2006: 1 – 17.
- [14] SEKAR V, DUF\_ELD N, MERWE K, *et al.* LADS: large-scale automated DDoS detection system [C]// Proceedings of the 2006 USENIX ATC. Boston: USENIX, 2006: 171 – 184.
- [15] GREENBERG A, HJALMTYSSON G, MALTZ D A, *et al.* A clean slate 4D approach to network control and management [J]. ACM SIGCOMM Computer Communications Review, 2005, 35(5): 41 – 54.
- [16] GREENBERG A, HJALMTYSSON G, MALTZ D A, *et al.* Refactoring network control and management: a case for the 4D architecture, #CMU-CS-05-177 [R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, School of Computer Science, 2005.
- [17] 林闯, 任丰原. 可信可控可扩展的新一代互联网[J]. 软件学报, 2004, 12(2): 1815 – 1821.
- [18] 林闯, 雷蕾. 下一代互联网络体系结构研究[J]. 计算机学报, 2007, 30(5): 693 – 711.
- [19] 罗军舟, 韩志耕, 王良民. 一种可信可控的网络体系及协议结构[J]. 计算机学报, 2009, 3(3): 391 – 404.
- [20] WANG PENG, LUO JUNZHOU, LI WEI, *et al.* Control information description model and processing mechanism in the trustworthy and controllable network [C]// IM09: Proceedings of the 11th IF-IP/IEEE International Conference on Symposium on Integrated Network Management. Piscataway, NJ: IEEE, 2009: 398 – 405.
- [21] KIM M S, WON Y J, HONG W J. Characteristic analysis of Internet traffic from the perspective of flows [J]. Computer Communications, 2006, 29(10): 1639 – 1652.
- (上接第 2307 页)
- 参考文献:**
- [1] PHUOC T-G. Trends towards next generation Internet [C]// 3rd EuroNGL Conference on Next Generation Internet Networks. Piscataway, NJ: IEEE, 2007, 5: xvi – xvii.
- [2] LOW S H, PAGANINI F, DOYNE C. Internet congestion control [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22(1): 28 – 43.
- [3] BRADEN B, CLARK D, CROWCROFT J, *et al.* RFC 2309, Recommendations on queue management and congestion avoidance in the Internet [S/OL]. [2011 – 01 – 19]. <http://www.rfc.net/rfc2309.html>.
- [4] FLOYD S, JACOBSON V. Random early detection gateway for congestion avoidance [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1993, 1(4): 397 – 413.
- [5] XU YUE-DONG, WANG ZHEN-YU, WANG HUA. ARED: a novel adaptive congestion controller [C]// Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Piscataway, NJ: IEEE, 2005, 2: 708 – 714.
- [6] OTT T J, LAKSHMAN T V, WONG L H. SRED: Stabilized RED [C]// IEEE INFOCOM '99: Proceedings of the Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway, NJ: IEEE, 1999, 3: 1346 – 1355.
- [7] LIN D, MORRIS R. Dynamics of random early detection [J]. Computer Communication Review, 1997, 27(4): 127 – 137.
- [8] FENG W-C, SHIN K G, KANDLUR D D, *et al.* The BLUE active queue management algorithms [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 10(4): 513 – 528.
- [9] ATHURALIYA S, LOW S H, LI V H, *et al.* REM: active queue management [J]. IEEE Network, 2001, 15(3): 48 – 53.
- [10] HOLLOT C V, MISRA V, TOWSLEY D, *et al.* On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows [C]// INFOCOM 2001: Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington, DC: IEEE Computer and Communications Societies, 2001, 3: 1726 – 1734.
- [11] 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]. Computer Communication Review, 2000, 30(4): 151 – 160.
- [12] REN FENGYUAN, WANG FUBAO, REN YONG, *et al.* PID controller for active queue management [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2003, 25(1): 94 – 99.
- [13] YAN PENG, GAO YUAN. A variable structure control approach to active queue management for TCP with ECN [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(3): 203 – 215.
- [14] REN FENGYUAN, LIN CHUANG, YING XUNHE, *et al.* A robust active queue management algorithm based on sliding mode variable structure control [C]// IEEE INFOCOM 2002: Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington, DC: IEEE Computer and Communications Societies, 2002, 1: 13 – 20.
- [15] REN FENGYUAN, LIN CHUANG, YING XUNHE. Design a congestion controller based on sliding mode variable structure control [J]. Computer Communications, 2005, 28(9): 1050 – 1061.
- [16] JACOBSON V, KARELS M. Congestion avoidance and control [C]// SIGCOMM '88: Symposium Proceedings on Communications Architectures and Protocols. New York: ACM, 1988: 314 – 329.
- [17] USC/ISI. The NS simulator and the documentation [EB/OL]. [2011 – 01 – 18]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.