

网络拥塞中的非线性现象与控制^{*}

钱同惠^{1,2} 徐跃东¹ 关治洪¹ 王 华¹

(华中科技大学控制科学与工程系 武汉430074)¹ (江汉大学信息学院 武汉430056)²

摘 要 由于Internet通信量的快速增长和爆炸式膨胀,拥塞控制在当今正日益变得重要。Internet拥塞控制又存在着固有的、非常复杂的非线性动态问题。在本文中,我们利用随机早期检测算法(RED)研究了TCP的非线性现象,如RED的分叉、混沌以及鲁棒稳定性,同时考虑了线性和非线性的丢包函数。我们还证明了RED和PD-RED算法控制混沌与分叉的稳定性。仿真结果清楚展现以下两个算法结果的有效性。

关键词 拥塞控制,非线性,不稳定性,分叉,混沌

Nonlinear Behaviors and its Control in Internet Congestion

QIAN Tong-Hui^{1,2} XU Yao-Dong¹ GUAN Zhi-Hong¹ WANG Hua

(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074)¹

(Jiangnan University, Wuhan 430056)²

Abstract Congestion control is becoming increasingly important nowadays due to explosive expansion and rapid growth of traffic in the Internet. They are inherently very complex nonlinear dynamic problems. In this article we investigate nonlinear behaviors of TCP with random early detection(RED)gateways such as bifurcation, chaos as well as robust stability of RED. Both linear and nonlinear drop functions are considered. We also deduce the stability conditions of adaptive RED and proportional derivative RED algorithms controlling bifurcations and chaos. Simulation results explicitly manifest the effective outcomes of above two algorithms.

Keywords Congestion control, Nonlinear, Instability, Bifurcation, Chaos

1 引言

TCP/IP拥塞控制是近年来的热点研究问题,许多文献分别采用随机性的和决定性的非线性方法对TCP/AQM进行建模和分析。文[2]基于TCP网络流量服从Markov Modulated Poisson Process(MMPP)模型的假设,建立了TCP拥塞控制的和式增加积式减少(AIMD)的非线性时滞耦合的微分方程模型,采用经典控制理论的方法研究网络时延对于系统稳定性的影响。文[3,4]则从仿真实验和理论的角度出发,分别提出了稳定状态的TCP流量的决定性模型。文[5]也指出TCP/IP网络的混沌行为本身就存在于TCP的决定性流量过程,网络流量表现出一种自相似的性质。

文[6]中提出的TCP网络的流量模型在RED算法参数配置不当以及网络状况变化时,产生倍周期分叉与混沌的非线性现象。受到文[6]的启发,本文采用参数配置产生的非线性现象的新方法研究线性与非线性丢包函数^[7]的RED算法性能差别,分别考虑在相同情况下RED不同丢包策略的稳定性与鲁棒性。研究表明当采用非线性的丢包函数计算丢报率时,RED算法对于参数变化具有更强的鲁棒性。本文还证明了比例-微分RED^[8]算法控制混沌与分叉的稳定性条件,并采用MATLAB进行数学模型的仿真,分别展示自适应的RED算法和比例-微分RED算法的控制效果。

2 RED算法的分叉与混沌

2.1 随机早期检测算法

随机早期检测(Random Early Detection)^[1]算法是在网关处采用指数加权平均的低通滤波方法计算队列的平均长

度,并将平均队列长度与两个阈值 q_{max} 和 q_{min} 比较,当平均队列长度小于 q_{min} ,所有数据包都被接收,当平均队列长度处于两个阈值之间,网关将以相应的概率随机丢弃数据包,当平均队列长度大于 q_{max} 时,所有数据包都被强行丢弃。研究表明,RED算法可以有效地控制路由缓冲区平均队列长度,同时适应突发的数据流,对降低数据包的丢失率,提高了网络资源的利用率,降低了端到端的时延抖动,而且由于在预测到拥塞的发生时随机丢包,避免了网络数据流传输的同步状态。

随机早期检测(Random Early Detection)算法存在两个主要的缺陷,RED算法是一种无状态的队列管理算法,不需要标记每个流的信息,因而实现简单,但是难以保证网络流量的公平性。更主要的是RED算法增加了四个需要凭借经验确定的参数 $\omega, q_{min}, q_{max}, p_{max}$, RED算法对于参数配置十分敏感,网络状况的变化对于RED算法的性能也有很大影响。

2.2 TCP/RED的决定性数学模型^[5]

TCP/RED算法本质上是源端通过检测数据包的丢失情况来改变拥塞窗口,从而调节发送速率的闭环反馈控制系统。根据文[4]提出的TCP数据流的吞吐量计算公式和Firou等^[9]提出的RED算法模型,建立TCP/RED拥塞控制算法决定性的离散动态模型^[6]。在每个采样时刻,计算路由器缓冲区的平均队列长度,并计算在目前的拥塞状况下数据包的丢失率。

为了简便起见,假设网络中TCP流相同,持续时间较长,网络连接的数目 N 不变,而且带宽几乎得到充分的利用。那么每条TCP流的吞吐量满足如下方程:

$$T(p, R) = \frac{M \cdot k}{R \cdot \sqrt{p}} \leq \frac{c}{N} \quad (1)$$

^{*}基金项目:国家自然科学基金项目,项目编号:60274004。钱同惠 博士研究生,徐跃东 硕士研究生,研究方向:Internet拥塞控制。

其中 T :每条 TCP 流的吞吐量; c :网络瓶颈处的带宽; M :分组大小; R :环路时延; p :丢包率; k :常量,此处取 $\sqrt[4]{8/3}$ 定义瞬时队列长度 q 是丢包率 p 的函数, $q=G(p)$;丢包率 p 是平均队列 $\bar{q}_e$ 的函数, $p=H(\bar{q}_e)$;平均队列长度是瞬时队列长度的指数加权滑动平均值,迭代方程如下,其中 k 表示第 k 次迭代的结果:

$$A(\bar{q}_{e,k}, q_{k+1}) = (1-\omega)\bar{q}_{e,k} + \omega q_{k+1} \quad (2)$$

$$G(p) = \begin{cases} \min(B, \frac{c}{M}(T_R^{-1}(p, \frac{c}{N}) - R_0)) & \text{if } p \leq p_0, \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

$$p_0 = \frac{M \cdot k}{R_0 \frac{c}{N}}$$

其中 R_0 为数据包的传输时延, p_0 为带宽能够被充分利用的阈值。当丢包率大于 p_0 时,由于发送速率降低过小,导致缓冲队列变空,链路带宽不能被充分利用。依据 RED 算法的定义,丢包率与平均缓冲队列长度的关系可由如下的分段函数表示, B 为路由器缓冲区的长度:

$$p = H(q_e) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \bar{q}_e < q_{\min} \\ \frac{\bar{q}_e - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}} p_{\max} & q_{\min} \leq \bar{q}_e < q_{\max} \\ 1 & q_{\max} \leq \bar{q}_e < B \end{cases} \quad (4)$$

综上所述, TCP/RED 系统决定性的动态离散数学模型可由如下的迭代方程组表示,由于 $A(\bar{q}_{e,k}, q_{k+1})$ 与 $H(\bar{q}_{e,k})$ 都是线性变换, TCP/RED 的数学模型实际上演化为一维回归映射。

$$\begin{cases} q_{k+1} = G(p_k) \\ \bar{q}_{e,k+1} = A(\bar{q}_{e,k}, q_{k+1}) \\ p_{k+1} = H(\bar{q}_{e,k+1}) \end{cases} \quad (5)$$

2.3 线性与非线性丢包函数的 RED 算法性能比较

Floyd 提出的 RED 算法采用线性的方法根据平均队列长度计算丢包率,虽然这样的函数比较简单,易于实现,但是它并非最优的。当网络的负载很小时, RED 算法工作在靠近 $q_{\min}$ 的线性区域内,由于丢包率函数斜率较大,很容易导致带宽的不能充分利用;当网络的负载较大时, RED 算法工作在靠近 $q_{\max}$ 的线性区域内,由于丢包率函数斜率很小, RED 网关不能及时地通知拥塞的发生,从而使得经常处于溢出状态,导致不必要的丢包现象。文[7]提出非线性丢包函数的概念,实验仿真不仅考虑长时间的 FTP 流,而且也研究了 WEB 流,结果表明该方法在上述情况下表现出比线性丢包函数具有更好的性能。非线性的丢包函数为我们寻找最优的丢包率提供一个很好的思路。非线性丢包函数形式如下:

$$p = H(\bar{q}_e) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \bar{q}_e < q_{\min} \\ (\frac{\bar{q}_e - q_{\min}}{q_{\max} - q_{\min}})^j p_{\max} & q_{\min} \leq \bar{q}_e < q_{\max}, j=1, 2, 3 \\ 1 & q_{\max} \leq \bar{q}_e < B \end{cases} \quad (6)$$

2.4 RED 算法的非线性现象—分叉与混沌

文[6]充分研究了 Linear RED 算法参数的变化以及网络连接的数目变化时,拥塞控制系统数学模型的 1- $\rightarrow$ 2 分叉直至混沌的非线性动力学现象。这里我们采用与文[6]一致的网络拓扑结构和 RED 算法参数,提出一种新的方法来比较线性与非线性的 RED 算法对于参数配置的鲁棒性。通常情况下,部署 RED 算法的路由器缓冲队列工作在 $\min_{th}$ 和 $\max_{th}$ 之间。

$$q_{\min} = 50 \quad q_{\max} = 100 \quad c = 1500 \text{ kbps} \\ B = 300 \quad R_0 = 0.1 \text{ s} \quad M = 0.5 \text{ kb} \quad N = 20$$

a) Linear RED 算法的非线性现象

依据 TCP/RED 的决定性动态离散数学模型,计算出常

量 b_1 和 b_2 :

$$b_1 = \begin{cases} \frac{p_0(q_{\max} - q_{\min})}{p_{\max}} + q_{\min} & \text{if } p_{\max} \geq p_0 \\ q_{\max} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$b_2 = \left(\frac{N \cdot K}{B + \frac{R_0 \cdot c}{M}} \right)^2 \cdot \frac{q_{\max} - q_{\min}}{p_{\max}} + q_{\min}$$

那么,拥塞控制系统的模型简化为如下的一维回归映射:

$$\begin{cases} \bar{q}_{e,k+1} = (1-\omega) \cdot \bar{q}_{e,k} + \omega \cdot B & \text{if } q_{e,k} \leq b_2 \\ \bar{q}_{e,k+1} = (1-\omega) \cdot \bar{q}_{e,k} + \omega \left(\frac{N \cdot K}{\sqrt{\frac{p_{\max}(\bar{q}_{e,k} - q_{\min})}{q_{\max} - q_{\min}}} - \frac{R_0 c}{M}} \right) & \text{if } b_2 < q_{e,k} \leq b_1 \\ \bar{q}_{e,k+1} = (1-\omega) \cdot \bar{q}_{e,k} & \text{if } q_{e,k} > b_1 \end{cases} \quad (7)$$

当 RED 算法权值 ω 从 0.04 变化到 0.08 时,拥塞控制数学模型的特征值逐渐趋向单位圆外,系统逐渐变得不稳定,平均队列长度产生倍周期分叉直至混沌现象,见图 1。

b) Nonlinear RED 算法的非线性现象

同理,根据(6)式可以计算 Nonlinear RED 算法的一维回归映射,当 Nonlinear RED 算法权值 ω 从 0.07 变化到 0.10 时,拥塞控制数学模型的特征值也逐渐趋向单位圆外,系统逐渐变得不稳定,平均队列长度产生倍周期分叉直至混沌现象与 Linear RED 类似,见图 2。仿真表明,虽然 Nonlinear RED 算法平均队列长度的不动点比 Linear RED 算法的不动点的数值大,但是 Nonlinear RED 算法却表现出对于参数配置具有很好的鲁棒性。即使 RED 权值 ω 较大时, Nonlinear RED 算法仍然具有较大的稳定裕度。

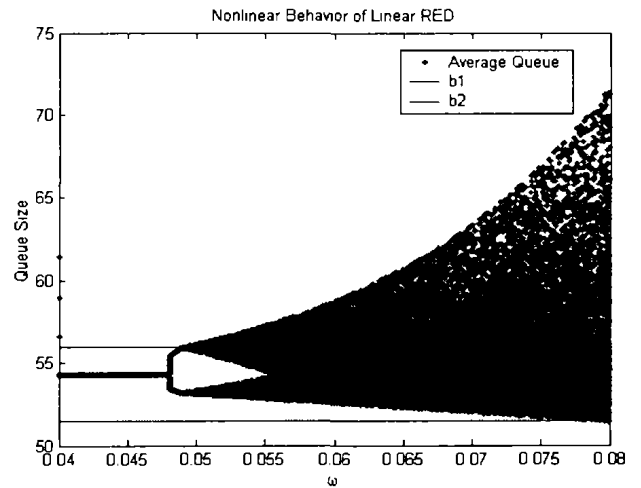


图1 线性 RED 算法的队列长度分叉图

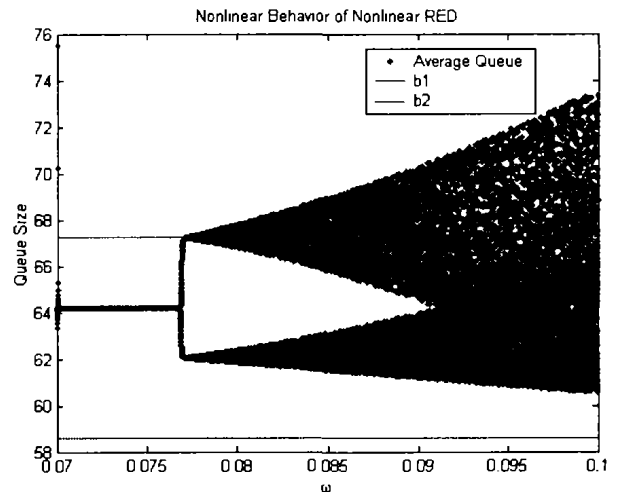


图2 非线性 RED 算法队列长度的分叉图

3 控制混沌与分叉的稳定性条件

3.1 Adaptive RED 和 PD-RED 算法

RED 算法的性能好坏往往取决于其参数的配置和网络负载大小,但是由于网络拓扑结构的不同和网络状况的不断变化,因而根据网络流量状况自适应地调节参数配置可以有效地提高网络的性能。Xiaofan Wang^[9]提出自适应的 RED 算法,前者通过判断缓冲区平均队列长度是处于 $q_{\min}$ 附近还是 $q_{\max}$ 附近来自适应调整最大丢包率,即将 $p_{\max}$ 乘以一个常数因子;后者对 $p_{\max}$ 增加一个反馈扰动变量 $\delta p_{\max}$,通过设置适当的反馈系数来控制 RED 算法平均队列长度,镇定其不动点。此外 Jinsheng Sun 和 Guanrong Chen 等人也提出比例-微分的 RED 算法^[9]控制策略,通过设定期望的平均队列长度,将实际平均队列长度值与期望值的误差及其微分量反馈给路由器,调节最大丢包率 $p_{\max}$,从而改变 RED 算法的丢包概率。TCP/RED 的离散动态反馈控制系统的数学模型变为:

$$\bar{q}_{e,k+1} = f(\bar{q}_{e,k}, p_{\max,k}) \quad (8)$$

3.2 Adaptive RED 算法的稳定性条件^[10]

本文以 Xiaofan Wang 提出的鲁棒的自适应 RED 算法为例,研究确保 RED 算法平均队列长度不动点的稳定性条件。设 h 是反馈增益,Adaptive RED 的最大丢包率为:

$$p_{\max,k} = p_{\max} + \delta p_{\max,k} \quad (9)$$

$$\delta p_{\max,k} = h \cdot (\bar{q}_{e,k-1} - \bar{q}_{e,k}) \quad (10)$$

引理:在不动点 $\bar{q}_e^*$ 位置处,对于上述的离散动态反馈控制系统,假设:

$$a = \frac{\partial f(\bar{q}_e^*, p_{\max})}{\partial \bar{q}_e} < 1, b = \frac{\partial f(\bar{q}_e^*, p_{\max})}{\partial p_{\max}} < 0$$

在不动点附近, $\delta \bar{q}_{e,k+1} = a \delta \bar{q}_{e,k} + b \delta p_{\max,k}$ (11)

那么系统(8)的不动点是渐进稳定的,当且仅当下式成立:

$$-3 < a < 1, \text{ 并且 } \frac{a+1}{2b} < h < -\frac{1}{b}$$

3.3 PD-RED 算法的稳定性条件

Jinsheng Sun 和 Guanrong Chen 等人提出的 PD-RED 算法定义 Q_e 为平均队列长度的目标值,在每个采样周期计算平均队列长度的误差: $e_k = \bar{q}_{e,k} - Q_e$,并依据如下公式调整最大丢包率 $p_{\max}$,使平均队列长度保持在期望值附近。

$$p_{\max,k} = p_{\max,k-1} + k_p e_k + k_d (e_{k-1} - e_k) \quad (12)$$

设稳态时最大丢包率为 $p_{\max}^*$,则 $\delta p_{\max,k} = p_{\max,k} - p_{\max}^*$,且 $\delta \bar{q}_{e,k} = e_k$,式(12)可改写为:

$$\delta p_{\max,k} = \delta p_{\max,k-1} + k_p \bar{q}_{e,k} + k_d (\delta \bar{q}_{e,k} - \delta \bar{q}_{e,k-1})$$

定理:用期望队列长度替换不动点的概念,系统(8)是渐进稳定的,当且仅当下式成立: $k_p > 0$ 且 $2a + (k_p - 2k_d)b + 2 > 0$

证明:PD-RED 算法的拥塞控制系统状态空间如下所示,

$$\begin{bmatrix} \delta \bar{q}_{e,k+1} \\ \delta p_{\max,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ (k_p + k_d) \cdot a - k_d & 1 + (k_p + k_d) \cdot b \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta \bar{q}_{e,k} \\ \delta p_{\max,k} \end{bmatrix} \quad (14)$$

该离散动态系统的特征方程为:

$$D(\lambda) = \lambda^2 - [(a - k_d b) + (k_p b + 1)]\lambda + (a - k_d b)$$

$\lambda_{1,2} =$

$$\frac{(a - k_d b) + (k_p b + 1) \pm \sqrt{[(a - k_d b) + (k_p b + 1)]^2 - 4(a - k_d b)}}{2}$$

如果 PD-RED 算法稳定在期望值附近,那么 $\|\lambda_{1,2}\| < 1$,由于 $b < 0$,因而 PD-RED 算法必须满足如下条件:

$$k_p > 0 \text{ 且 } 2a + (k_p - 2k_d)b + 2 > 0$$

4 实验仿真结果

4.1 Adaptive RED 和 PD-RED 的性能仿真

本节通过使用 MATLAB 对 TCP/RED 算法的离散动态数学模型以及改进的控制策略进行仿真,仿真对象的 RED 算法的权值 ω 取 0.08,其余参数和网络状况与 2.4 节相同。对于 Adaptive RED 算法,我们取 $h = 0.01$,对于 PD-RED 算法取 $k_d = 0.01, k_p = 0.001$,为了与 Adaptive RED 算法的平均队列长度的不动点对应,期望的队列长度 Q_e 保持在 55。初始状态为 $b_2 = 51.4815$,迭代总次数为 500,前 250 次采用一般的 TCP/RED 离散动态模型,后 250 次分别采用 Adaptive RED 和 PD-RED 控制策略镇定其分叉与混沌现象,控制效果如图 3,图 4 所示。

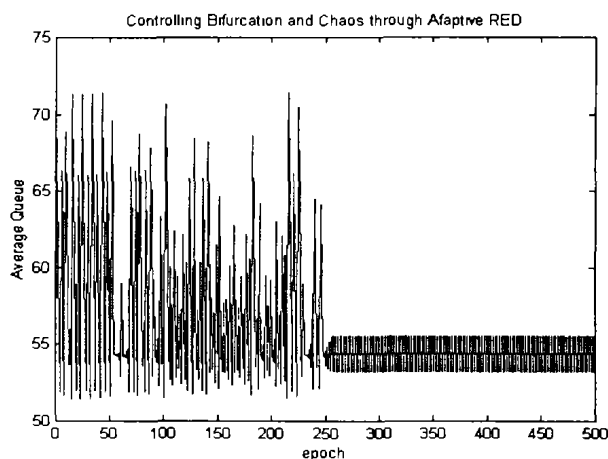


图3 Adaptive RED 算法控制混沌与分叉

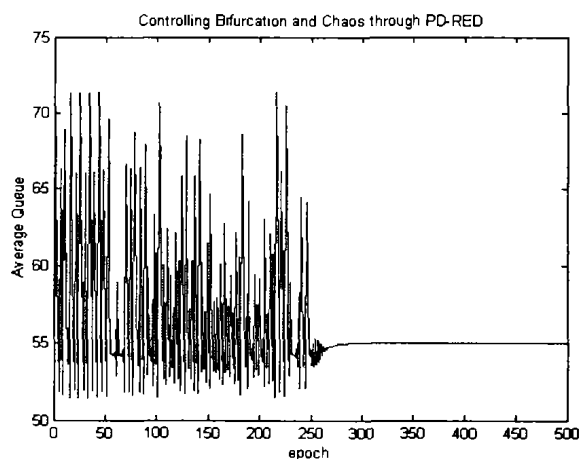


图4 PD-RED 算法控制混沌与分叉

仿真研究表明 PD-RED 算法具有能够更好的镇定 TCP/RED 模型的分叉与混沌现象,缓冲区平均队列长度稳定在期望的队列长度,而具有相同微分增益的 Adaptive 算法的平均队列长度在不动点附近小幅振荡。但是 PD-RED 算法增加了更多的参数,无疑也增加路由器的开销,加大算法实现的难度。

结论 由于 Internet 拥塞控制是一种非常复杂的非线性动态过程,网络中数据流量表现出各种各样的非线性行为,如混沌和分形等,呈现出自相似的特性。本文在前人建立的 TCP 拥塞控制的离散动态数学模型基础上,通过研究随机早

(下转第163页)

等系统)。

4.2 关键技术

本节概要介绍 Star-TMM 中采用的关键技术,这些技术的实现细节将在后续的文章中介绍。

截获器技术:截获器(Interceptor)是一种重要的软件成长性设计方法,CORBA 开发商需要扩展 ORB 功能时,可以在 ORB 内核的基础上以 ORB 服务的形式对其进行扩展,截获器技术可以使 ORB 服务便携地“挂接”到 ORB 内核上。Session Controller 在结构上同 ORB 紧耦合,我们将其设计为一种 ORB 服务,由相应的截获器调用。

主动安全技术:在开放协同软件环境中,实体之间的授权关系具有较强的动态性。凭证的有效性需要不断刷新,这对系统造成很大开销。为此我们基于 StarBus 中的异步回调机制^[20]实现一种凭证的主动撤销制:当一个 CM 从其它 CM(目标 CM)获取凭证时,随即发送一个异步请求以“订阅”该凭证的撤销事件。当目标 CM 撤销该凭证的时候,就会检查是否存在相应的“订阅”请求。如果存在,则对所有请求产生相应,以达到主动撤销的目的。

凭证缓存技术:授权决策的响应时间对系统的效率会产生重要影响。现有 TM 系统的响应时间完全取决于凭证发现算法和策略满足性验证(Proof Of Compliance)所耗费的时间。虽然对 POC 算法本身的直接优化或采用更好的计算模型是提高效率的直接方法,但 POC 算法复杂性往往随着 TM 语言描述能力的增强迅速增加。凭证发现算法因为涉及网络延迟,更加难以控制。因此从系统结构的角度出发,尽可能减少对 POC 算法的调用次数是一种有效的方法。Star-TMM 的 Session Manager 采用 Cache 技术,将输入凭证、本地策略状态和相应 POC 结果作为记录写入“凭证 Cache”中,如果后续请求提交的凭证集同“凭证 Cache”中缓存的记录具有“一致性”,则直接采用该记录中的 POC 结果作为对本次请求的授权决策。

结论 本文提出的通用 TM 中间件体系结构将信任管理思想引入到中间件框架中。同其他中间件平台的安全体系结构相比,该体系结构能够支持授权代理和能力代理两种重要的代理机制。这对提高授权管理的活性和伸缩性具有重要意义,对解决企业联盟(enterprise coalitions)系统,多中心协作系统以及 Grid 计算平台的授权管理问题具有较强的理论和实用价值。

Star-TMM 能够支持 CORBA 安全规范中定义的代理模型,并在此基础上实现了管理层代理和多级代理机制。为解决

跨安全域的授权问题给出新的解决方法,是对 CORBA 安全体系结构的有意义的补充。另外,Star-TMM 在开发过程中提出的主动安全技术和凭证缓存技术也具有一定的普遍意义。

参考文献

- 1 Lampson B. Protection. ACM Oper. Syst. Rev, 1974, 8(1): 18~24
- 2 Firozabadi B S, Sergot M. Power and Permission in Security Systems. In: Christianson B, Crispo B, Roe M, eds. Security Protocols, number 1796 in Lecture Notes of Computer Science, Cambridge, UK, Springer Verlag, 1999. 48~53
- 3 Foster I, Kesselman C, Nick J, Tuecke S. The Physiology of the Grid: An Open Grid Services Architecture for Distributed Systems Integration. 4th Global Grid Forum, Toronto, Canada, 2002
- 4 Blaze M, Feigenbaum J, Lacy J. Decentralized trust management. In: Proc. of 17th Symposium on Security and Privacy, Oakland, IEEE, 1996. 164~173
- 5 Blaze M, Feigenbaum J, Keromytis A D. Keynote: Trust management for public-key infrastructures. In: Cambridge 1998 Security Protocols Intl. Workshop, Cambridge, Springer-Verlag, 1999. 59~63
- 6 Li Ninghui, Grosz B N, Feigenbaum J. Delegation logic: A logic-based approach to distributed authorization. ACM Transaction on Information and System Security (TISSEC), Feb. 2003
- 7 Li Ninghui, Mitchell J C, Winsborough W H. Design of a role-based trust management framework. In: Proc. of the 2002 IEEE Symposium on Security and Privacy. IEEE Computer Society Press, May 2002, 114~130
- 8 Yao W, Moody K, Bacon J. A Model of OASIS Role-Based Access Control and its Support for Active Security. In: Proc. Sixth ACM Symposium on Access Control Models and Technologies. SACMAT 2001, Chantilly, VA, USA, May 2001. 171~181
- 9 Transport Layer Security Working Group. The SSL Protocol. Version 3.0, March 1996
- 10 IETF, "RFC 1510, The Kerberos Network Authentication Service, V5," Internet Engineering Task Force, 1993
- 11 Kaijser P. A Review of the SESAME Development. Lecture Notes in Computer Science, 1998, 1438: 1~8
- 12 Lai C, Gong L, Koved L, Nadalin A, Schemers R. User Authentication And Authorization In The Java Platform. In: Proc. of Annual Computer Security Applications Conf. Phoenix, Arizona, USA, 1999. 285~290
- 13 Microsoft. "DCOM Architecture." Microsoft, 1998
- 14 The Common Object Request Broker: Architecture and Specification, Version 3.0. July 2002
- 15 <http://www.objectsecurity.com/cv2.html>
- 16 <http://www.adiron.com/InterOpTest.html>
- 17 Clarke D, Elien J-E, Ellison C, Fredette M, Morcos A, Rivest R L. Certificate Chain Discovery in SPKI/SDSI. 1999
- 18 Zimmerman. Pgp user's guide: [Technical report]. MIT Press, 1994
- 19 Object Management Group. Security Service Specification, Version 1.8. March 2002
- 20 张志伟, 吴泉源, 王怀民, 贾焰. 支持时间无关激活的分布对象中间件异步模型. 计算机学报, 2004
- 21 徐锋. 开放协同软件环境中信任管理研究: [博士论文]. 2003

(上接第41页)

期算法(RED)参数配置产生的分叉和混沌现象,从新的角度得出具有非线性丢包函数的 RED 算法在相同参数配置下,比线性的 RED 算法具有更好的鲁棒性。本文通过实验仿真比较,分别给出了自适应的 RED 算法和比例-微分 RED 算法控制分叉与混沌的效果。

参考文献

- 1 Floyd S, Jacobson V. Random Early Detection Gateways for congestion avoidance. IEEE/ACM Transaction on Networkin, 1993, 1(4)
- 2 Hollot C V, Misra V, Towsley D, Gong W B. Analysis and design of controllers for AQM routers supporting TCP flows. In: Proc. of IEEE Infocom 2001. Volume: 3, 1510~1519
- 3 Mathis M, Semke J, Mahdavi J, Ott T. The Macroscopic Behavior

of the TCP Congestion Avoidance Algorithm. Computer Communications Review, 1997, 27

- 4 Johari R, Tan D K H. End-to-End Congestion Control for the Internet: Delays and Stability. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(6)
- 5 Veres A, Boda M. The Chaotic Nature of TCP Congestion Control. In: Proc. of IEEE INFOCOM 2000. Volume 3, 1715~1723
- 6 Ranjan P, Abed E H. Nonlinear Instabilities in TCP-RED. In: Proc. of IEEE Infocom 2002. Volume 1, 249~258
- 7 Erich P. On the Non-linearity of the RED Drop Function. In: Proc. of Intl. Conf. on Computer Communication, 2002
- 8 Sun J S, Ko K T, Chen G R, et al. PD-RED: to Improve the Performance of RED. IEEE Communications Letters, 2003, 7(8): 406~408
- 9 Firoiu V, Borden M. A Study of Active Queue Management for Congestion Control. In: Proc. of IEEE INFOCOM 2000
- 10 Wang X F. Controlling bifurcation and chaos in Internet congestion control system. In: Proc. of Intelligent Control and Automation, 2002, 1: 573~576