

基于时间槽的自相似流量随机早检测算法——SFRED

王晖, 季振洲, 孙彦东, 王远征

(哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 分析研究了网络流量的自相似和长相关性, 并基于分形布朗运动模型导出了自相似流量环境 RED 算法分组丢失概率的一种计算方法, 从而提出了基于时间槽的自相似流量随机早检测队列管理算法 SFRED。该算法在每个时间槽内计算一次分组丢失概率, 大大降低系统负担。NS2 仿真实验表明 SFRED 算法性能明显优于 RED, 能够很好地在自适应流背景下控制队列长度, 并具有良好的吞吐量性能。

关键词: 自相似; 随机早期检测; 主动队列管理; 拥塞控制; 网络流量模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)10-0115-06

Time slot-based RED algorithm on self-similar flows: SFRED

WANG Hui, JI Zhen-zhou, SUN Yan-dong, WANG Yuan-zheng

(School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Based on fractional Brownian motion (FBM), one calculation of the packet drop probability in the RED algorithm was derived under self-similar flows. Based on the self-similarity and the long-range dependence characteristics of Internet network traffics, a time slot-based RED algorithm on self-similar flows (SFRED) was proposed to the router queue management. The packet drop probability is calculated in every time-slot so that the burden is greatly reduced. It is simulated by NS2 and the experimental results show that the algorithm SFRED outperforms RED. SFRED can control the queue length under adaptive flows with a good throughput.

Key words: self-similarity; random early detection; active queue management; congestion control; network traffic

1 引言

20 世纪 70 年代, 人们借鉴公共交换电话网络 PSTN 的流量模型, 主要用泊松过程来描述数据网络流量模型^[1], 将网络中分组或连接的到达假设为泊松过程, 即分组的到达时间间隔服务独立的负指数分布。在理论分析上泊松到达简单、有效, 被广泛应用在网络算法协议设计、网络性能评价上, 这些模型的共同点是所描述的业务序列具有短相关性。自 1994 年, Leland 对 Bellcore 局域网的测试与分析结果发表后^[2], 大量的业务流(如 WAN、LAN、VBR 及 ISDN 等)监测和分析表明: 计算机网络上的各种业务, 都在相当长的时间尺度下呈现统计自

相似性, 即网络流量的时间序列在不同的时间尺度上都存在着突发性。无论网络的拓扑结构、用户数量、协议类型、传输介质、业务地点、编码方式、服务和业务类型如何变化, 这些自相似性始终存在。

网络自相似性的发现打破了原有网络流量是短相关的基础性假设, 由于业务量的突发性更为明显, 导致拥塞易于积累, 这势必导致网络的流量特征、排队特性、拥塞控制策略及缓存大小的选取均异于原假设, 同时也会引入新的解决方法, 吸引了众多学者的研究兴趣。文献[3]研究分析了无线局域网的自相似性以及无线局域网基于自相似流量的 RED 算法性能。文献[4]提出了基于信号能量的小波

分解算法的自相似流量随机早期检测算法。文献[5]推导出 RED 算法的最大队列长度阈值计算公式，并试图寻找自相似流量环境下 RED 算法的一种柔和分组丢失策略。文献[6]提出了一种自适应的队列管理算法 IARED，该算法利用自相似流量的自相关函数来设置平均队列长度计算权值 W_q ，再动态调整最大分组丢失概率实现自适应。以上算法实现起来都较为复杂。本文提出了一种基于时间槽的自相似流量随机早期检测算法，算法实现简单高效，并用 NS-2 仿真验证了算法的有效性。

2 网络自相似流量模型

2.1 统计自相似和自相似过程

统计自相似是时间序列在统计意义上的自相似，定义为： $\{x(t)\}$ 满足式(1)，则称 $\{x(t)\}$ 是自相似的过程。

$$x(t)^p = a^{-H} x(at) \quad (1)$$

其中， a 是缩放比例， H 被称为 Hurst 参数，是描述自相似度的唯一参数。 $0 < H < 1/2$ 表示负相关， $1/2 < H < 1$ 为正相关， $H=1/2$ 为没有相关性。正相关时， H 越大，自相似程度越高。

2.2 自相似过程的模型

实际网络业务流的自相似特性决定了自相似业务流模型成为网络建模的主要工具，其可分为两类^[7]：物理模型和统计模型。物理模型的建立是基于自相似过程物理意义的，模型在精度和灵活性方面与统计模型相比较差，但鉴于具有明确的物理意义，有助于理解自相似产生的原因。其中主要有流叠加法的 ON/OFF 模型^[8]、 α -Stable 业务流模型^[9]等。统计模型是基于统计特性下表现出的性质（长相关性）建立模型，模型比较精确灵活，常用的统计模型有分形布朗运动 FBM 模型、小波模型和分形自回归整合滑动平均 FARIMA 模型^[10]。

本文采用 ON/OFF 模型生成自相似流业务流量，该模型只有 ON 和 OFF 2 个状态，当业务处于 ON 状态时，以恒定的速率产生数据，而处于 OFF 状态时不产生任何数据。假设网络上传的多业务源模型为上述若干个单个 ON/OFF 业务源的叠加。设有 m 个同类的业务源，单个业务源 ON 状态持续时间为 $\tau^{(i)}$ ，OFF 状态持续时间为 $\theta^{(i)}$ 。随机变量 $\tau^{(i)}$ 、 $\theta^{(i)}$ 独立同分布，其分布函数为

$$p(\tau > t) = t^{-\alpha}; t \rightarrow \infty, 1 < \alpha < 2 \quad (2)$$

即 $\tau^{(i)}$ 、 $\theta^{(i)}$ 均服从 Pareto 分布，具有有限均值和无限方差。注意到式(2)与传统的泊松过程的负指数分布 $P(\tau > t) = e^{-\lambda t}$ ， $t \rightarrow \infty$ 有很多的不同。文献[11]已经证明，当叠加的业务源个数趋于无穷时，总的业务是渐近自相似的，且满足 $\beta = \alpha - 1$ ， $H = (3 - \alpha) / 2$ 。

3 SFRED 的设计

3.1 协议设计理论

为了刻画自相似流量，Norros 提出了如下的分形布朗运动模型^[12]：

$$A_H(t) = mt + G_t; t \in (-\infty, +\infty) \quad (3)$$

$$G_t = \sqrt{am} Z_t \quad (4)$$

其中， $A_H(t)$ 表示 t 时间内到达的流量； Z_t 是标准的分形布朗运动， G_t 是分形高斯噪声；分形布朗运动有 3 个参数，分别是： $m > 0$ 表示平均发送速率； $a > 0$ 表示偏差系数， $H \in [0.5, 1)$ 为 Z_t 的 Hurst 系数。 $Z(t)$ 均值为 0、方差 $\text{var}(Z(t)) = |t|^{2H}$ ，当 $H=0.5$ 时， A_t 为无自相似性的布朗业务流。

将 A_t 业务流输入到一个服务速率为 $C(C > m)$ 的队列中，根据 Reich 公式可以得到队列长度：

$$X_t = \sup_{s \leq t} (A_t - A_s - C(t - s)); s, t \in (-\infty, +\infty), s \leq t \quad (5)$$

其中， A_s 是时间参数为 s 的分形布朗业务流。

$P(X > x)$ 是队列长度超过 x 的概率，Norros 推导出：

$$P(X > x) \sim \exp(-Kx^{2-2H}) \quad (6)$$

其中，

$$K = \frac{(C - m)^{2H}}{2(H^H (1 - H)^{1-H})^2 am} \quad (7)$$

令 Q_{\max} 和 Q_{\min} 分别为路由器队列长度的最大和最小阈值，协议设计的目标对于足够小的 ϵ ，找出一个分组丢失概率 $p_b (0 \leq p_b < 1)$ 使得：

$$P(X > Q_{\max}) < \epsilon \quad (8)$$

$$P(X > Q_{\min}) > 1 - \epsilon \quad (9)$$

简单起见，不考虑 TCP 的拥塞控制机制，令 $p = 1 - p_b$ ，则由式(6)及式(7)代入式(8)可得：

$$\exp\left(-\frac{(C - pm)^{2H}}{2(H^H (1 - H)^{1-H})^2 amp^2} Q_{\max}^{2-2H}\right) < \epsilon \quad (10)$$

整理可得：

$$\frac{(C - pm)^{2H}}{p^2} > \frac{2 \ln \frac{1}{\epsilon} (H^H (1 - H)^{1-H})^2 am}{Q_{\max}^{2-2H}} \quad (11)$$

注意到，当 $0 < p \leq 1$ 时：

$$f(p) = \frac{(C - pm)^{2H}}{p^2} \quad (12)$$

$f(p)$ 是一个单调递减函数，基于应用目的，在 $(0,1]$ 范围内二分查找，可以求得任意精度的近似解 α ，即有 $p < \alpha$ ；同理可由式(10)推出 $p > \beta$ 。从而得到 $1 - \alpha < p_b < 1 - \beta$ 。

3.2 协议算法设计及理论分析

依据上节所描述的思想提出基于时间间隔的随机早期检测算法：将业务流在时间上划分成等间距的时间区间，每一个区间称为一个时间槽；根据前 k 个时间槽的观测参数，可以简单计算出 m （平均速率）和 a （偏差系数）；通过 R/S 重标定域法可以估算出 H （Hurst 系数）；这样根据上节结论即可求得分组丢失概率 p_b ，下一个时间槽内，所有分组都按照该概率进行分组丢失。实际算法实现中， $p_b = (\alpha - \beta)[(Q_{avg} - Q_{min}) / (Q_{avg} - Q_{min})]^{2H} + 1 - \alpha$ ，其中 Q_{avg} 为路由器平均队列长度。

SFRED 算法流程如图 1 所示，可以用如图 2 所示的伪代码概括。

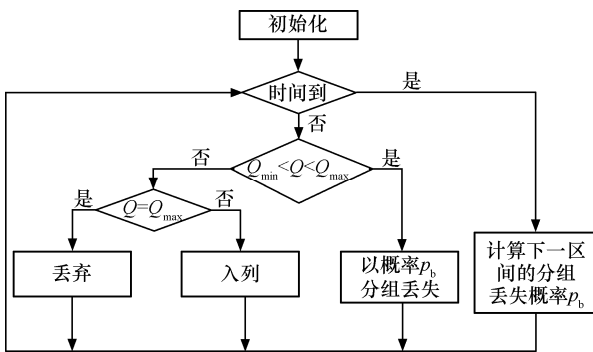


图 1 SFRED 算法流程

```

For each time interval
  Calculate  $p_b$ 
For each packet arrives
  If ( $Q < Q_{min}$ )
    // 队列长度小于  $Q_{min}$  时
    Enqueue();
  Else if ( $Q_{min} \leq Q \leq Q_{max}$ )
    Drop packet with probability  $p_b$ ;
  Else
    // 队列已满
    Drop all new packet;
    
```

图 2 SFRED 算法伪代码

SFRED 算法在数据分组到来时只需记录该时间槽的流量，记录的流量用于计算以下 2 个参数。

1) 因为时间槽长度相等且是确定的，通过时间

槽内的流量可以计算得到槽内的自相似流速率，这时候再与记录的之前若干个时间槽的速率进行统计计算得到 a 。

2) 用于估计下一时间槽的流量 m 。目前已经有学者提出了一些有价值的自相似流量估计方法^[13]，并且发现如果某一平均流量较大，那么下一区间内的平均流量大的可能性也较大，反之亦同^[14]。所以，简单起见，本文采用最简单的估计方法： $f(n+1) = f(n)$ 。

其中计算 m 的时间复杂度为 $O(1)$ ，计算 a 的时间复杂度为 $O(k)$ ，R/S 法的时间复杂度是 $O(k^2)$ ^[15]，求 p 的时间要求也较大 $O(\log(1/e))$ ， e 是求 p 时二分查找的精度；然而由于 k 是固定值，而且一个时间槽只计算一次，计算的时间复杂度完全可以接受。

与传统 RED、HWRED^[16]以及 SS-RED^[5]算法相比，算法 SFRED 作了如下的改进。

1) RED、HWRED 以及 SS-RED 算法是以分组到达来计算丢失概率的，计算的是每个分组丢失概率；而 SFRED 算法则是以测量时间间隔来计算丢失概率的，计算的是下一个时间槽内流量的丢失概率。文献[15]对基于时间间隔进行控制的 AQM 机制进行了实验，发现其对排队队列长度的控制效果较好，并指出“对于每个到达分组都进行采样过于频繁，而且也得不到什么能察觉到的好处”。假设分组到达速率是 50packet/s，RED 算法每秒钟就需要采样 50 次；如果取 4~8Hz 的测量频率，那么 SFRED 算法每秒钟只需采样 4~8 次，相比之下大大降低了系统负担。

2) SFRED、HWRED 以及 SS-RED 算法都是基于自相似流量理论出发，采用式(6)和式(7)进行计算，都需要估算 m 、 a 和 H 等参数，所以时间复杂度差别不大。算法 HWRED 和 SS-RED 的分组丢失概率也都是 Q_{avg} 的显式函数： $P_{HWRED} = P(X > Q_{max}) [(Q_{avg} - Q_{min}) / (Q_{avg} - Q_{min})]^{2H}$ ， $P_{SS-RED} = P(X > (Q_{min} + Q_{max} - Q_{avg}))$ 。 C 、 m 、 a 和 H 等参数采用文献[5]中实验设置，如图 3 曲线所示，实际上 SFRED 是最为柔和的一种分组丢失策略：首先基于自相似流量应该满足比泊松流量较大的分组丢失需求；其次分组丢失概率曲线较为平缓，并没有比 RED 偏离太大，而 HWRED 的曲线表现最为激进，SS-RED 在队列长度接近最小阈值时显得有些保守，而在接近最大阈值时又显得有些激进。

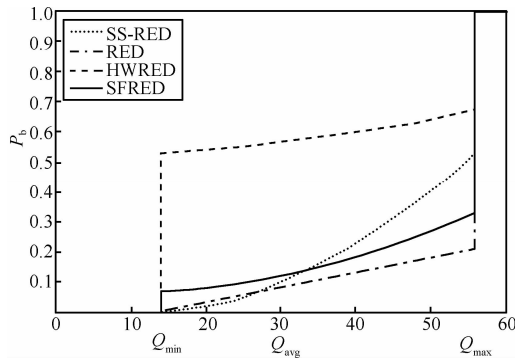


图 3 分组丢失策略柔和度比较

3.3 NS 模拟实验

实验采用如图 4 所示的哑铃结构，发送端和接收端都分别采用 100 个独立的 Pareto 分布的 ON/OFF 源 (POO_Traffic) 的叠加模型来模拟网络自相似流。另外，取 $\epsilon=0.01$ ，时间槽长度为 0.1s，路由器队列长度取 60 packet。生成的自相似流量速率图如图 5 和图 6 所示，获得的丢失概率曲线如图 7 所示。

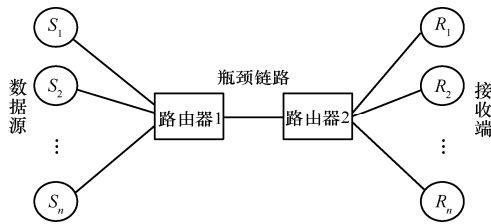


图 4 NS 模拟用网络拓扑

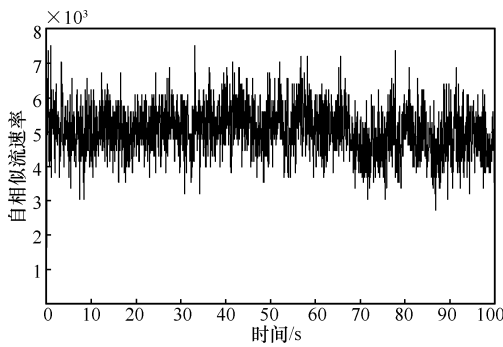


图 5 自相似流速率图 (100s)

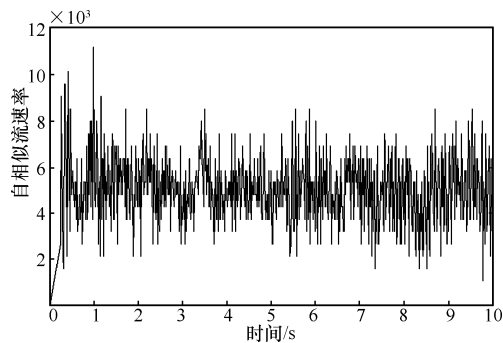


图 6 自相似流速率图 (10s 片断)

POO_Traffic 的参数如下:

```
set traffic[new Application/Traffic/Pareto]
$traffic set packetSize 1000
$traffic set burst_time_ 500ms
$traffic set idle_time_ 500ms
$traffic set rate_ 200KB
$traffic set shape_ 1.5
```

其中 burst-time_ 为平均 On (突发) 时间, idle-time_ 为平均 Off (空闲) 时间, rate_ 为突发期分组的发送速率, packetSize_ 为分组大小, shape_ 为 Pareto 分布的形状参数。

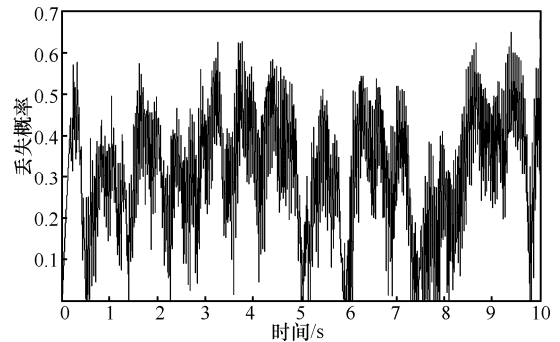


图 7 SFRED 分组丢失概率曲线

图 8 和图 9 分别是 SFRED 和 RED 算法的吞吐率, 可以发现 SFRED 的吞吐率要高于 RED。这是

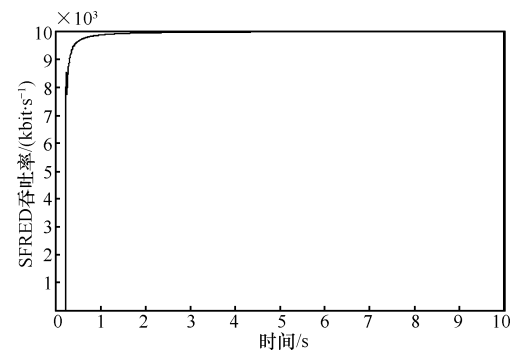


图 8 SFRED 吞吐率

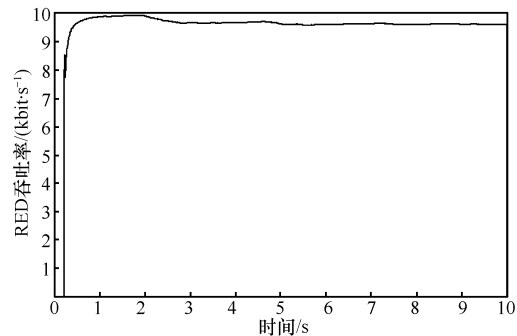


图 9 RED 吞吐率

因为 RED 算法在自相似流量下估计队列平均长度 Q_{avg} 具有滞后性, 当突发流流过路由器时, RED 算法仍会保持较大的 Q_{avg} 一段时间, 所以随后到来的较低速率流量反而会被丢失较多分组。

图 10 和图 11 分别是 SFRED 和 RED 算法在模拟期间的瞬时队列长度, 在图中可以看到: RED 在开始阶段有振荡, 队列长度一度超过 50, 后来基本上只能维持在 10 左右; 而 SFRED 算法则很好地控制了队列长度, SFRED 能够维持较大的瞬时队列长度且较为稳定, 最高瞬时队长也可以达到 30, 这也为达到较高的吞吐率提供了最有利的条件。

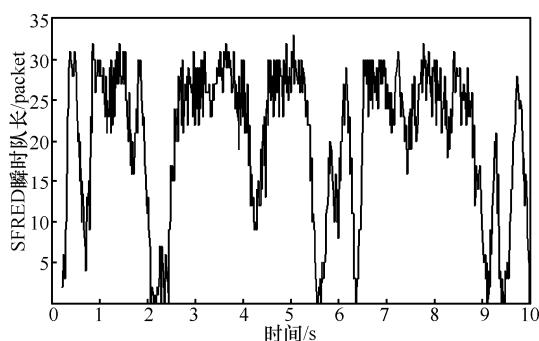


图 10 SFRED 瞬时队长

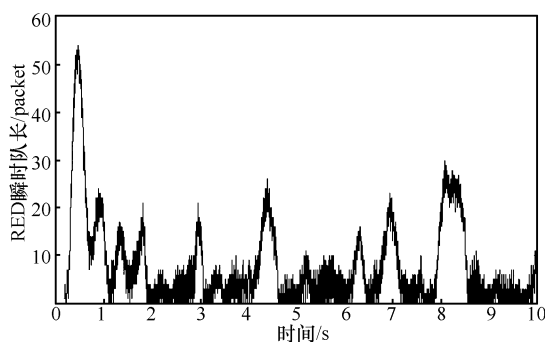


图 11 RED 瞬时队长

4 结束语

本文基于分形布朗运动的理论提出了 SFRED 队列管理算法, 基于时间槽计算分组丢失概率, 大大降低了系统负担, 算法实现简单有效, 分组丢失策略较为柔和。NS 模拟分析发现: SFRED 算法能够较稳定地在自相似流环境下控制队列长度, 并能够保持较高的队列长度, 从而得到较好的吞吐量性能。不过对于路由器缓存、 ε 等初值的设置对于协议的影响, 还需要进一步探讨。

参考文献:

- [1] FUCHS E, JACKSON P E. Estimates of distributions of random variables for certain computer communication traffic model[J]. Communication of ACM, 1970, 13(12): 752-757.
- [2] LELAND W E, TAQQU M S, BELLCORE W W. On the self-similar nature of Ethernet traffic[J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 1994, 2(1): 1-15.
- [3] 舒炎泰, 董林芳, 高德云. 基于自相似流量的 RED 算法性能研究[J]. 计算机工程, 2006, 32 (22): 104-106.
SHU Y T, DONG L F, GAO D Y. Study on RED algorithm performance based on self-similar traffic[J]. Computer Engineering, 2006, 32 (22): 104-106.
- [4] 温昱晖, 朱祥华, 张勇. 自相似流量的主动队列管理算法[J]. 电子与信息学报, 2006, 28 (7): 1303-1307.
WEN Y H, ZHU X H, ZHANG Y. Self-similar traffic control in active queue management[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28 (7): 1303-1307.
- [5] 谭献海, 黄媛辉, 金炜东. 自相似流量随机早期检测方法[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(1): 19-24.
TAN X H, HUANG Y H, JIN W D. Random early detection algorithm of self-similar traffic[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(1): 19-24.
- [6] 陈柏秀, 谭献海, 朱效稳. 自相似流量下自适应 AQM 算法性能研究[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(9): 28-31.
CHEN B X, TAN X H, ZHU X W. Research on performance of adaptive AQM algorithm of self-similar traffic[J]. Computer Technology and Development, 2009, 19(9): 28-31.
- [7] 吴援明, 宁正容, 梁恩志. 网络自相似模型业务进展[J]. 通信学报, 2004, 25(3): 97-104.
WU Y M, NING Z R, LIANG E Z. Review of self-similarity models of networks traffic[J]. Journal of China Institute of Communications, 2004, 25(3): 97-104.
- [8] ADLER R, FELDMAN R, TAQQU M S. A Practical Guide to Heavy Tails: Statistical Techniques and Applications[M]. Boston: Birkh user, 1998: 27-53.
- [9] 潘明, 季晓飞, 范戈. 基于 α -Stable 自相似随机过程的通信网业务量建模[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(2): 200-202, 206.
PAN M, JI X F, FAN G. Network traffic modeling based on α -Stable self-similar stochastic processes[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(2): 200-202, 206.
- [10] 曹书生. 网络业务流的自相似性[J]. 现代电子技术, 2007, 30(16):

152-154.

CAO S S. Self-similarity of network traffic[J]. Modern Electronics Technique, 2007, 30(16): 152-154.

[11] LIKHANOV N, TSYBAKOV B, GEORGANAS N D. Analysis of an ATM buffer with self-similar ("fractal") input traffic[A]. IEEE INFOCOM'95[C]. Boston, MA, USA, 1995. 985-992.

[12] NORROS I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1995, 13(6): 953-962.

[13] LI M, LI J Y. On the predictability of long-range dependent series[EB/OL]. <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2010/397454.html>, 2010.

[14] 张娅, 朱娜, 朱国军. 自相似业务下拥塞避免机制的实现[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(3): 167-169.

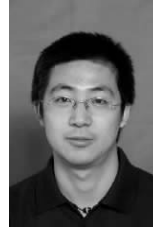
ZHANG Y, ZHU N, ZHU G J. Realization of congestion avoidance algorithm on self-similar traffic network[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(3): 167-169.

[15] HOLLOT C V, MISRA V, TOWSLEY D. On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows[A]. IEEE INFOCOM 2001[C]. Anchorage, Alaska, USA, 2001. 1726-1734.

[16] 黄丽亚, 王锁萍. 基于自相似业务流的 Hurst 加权随机早检测算法[J]. 通信学报, 2007, 28(4): 95-100.

HUANG L Y, WANG S P. Hurst weighted random early detection algorithm based on self-similar traffic input[J]. Journal on Communications, 2007, 28(4): 95-100.

作者简介:



王晖 (1983-), 男, 河北张北人, 哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为网络建模和卫星宽带网络拥塞控制。

季振洲 (1965-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 哈尔滨工业大学教授, 计算机科学与技术研究所副所长, 主要研究方向为高级计算机体系结构、并行计算技术、计算机网络安全和 QoS 体系。

孙彦东 (1978-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学博士生, 主要研究方向为计算机网络技术和卫星宽带网络拥塞控制。

王远征 (1986-), 男, 福建平潭人, 哈尔滨工业大学硕士, 主要研究方向为计算机网络拥塞控制。