

大时滞网络自适应主动队列管理新算法

侯萍^{1,2}, 王执铨¹HOU Ping^{1,2}, WANG Zhi-quan¹

1. 南京理工大学 自动化学院, 南京 210094

2. 南京人口管理干部学院 工商管理系, 南京 210042

1. Department of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China

2. Department of Business Administration, Nanjing College for Population Program Management, Nanjing 210042, China

E-mail: houpinghi@163.com

HOU Ping, WANG Zhi-quan. New adaptive AQM algorithm in large delay network. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(19): 132-135.

Abstract: PID controller for Active Queue Management(AQM) is not realizable to deal with the large delay and turn parameters online in dynamic network condition. A novel active queue management algorithm for delay network based on Fuzzy PID control and Gain Adaptive Smith(GAS-FPID) is proposed, which can achieve PID parameters on-line self-adapting by fuzzy control under the dynamic delay network circumstances. And, gain adaptive Smith is successfully introduced into feedback data's advanced prediction to compensate delay. The performance of the GAS-FPID is verified by NS simulation results, which also shows higher robustness and stability.

Key words: Active Queue Management(AQM); large delay; fuzzy PID control; gain; Smith predictor

摘要: 针对PID控制器无法严格处理主动队列管理(AQM)中的大时滞情况,且不能随着变化的网络环境在线调节参数,提出了一种基于增益自适应Smith预估控制和模糊控制的大时滞网络的自适应PID主动队列管理(GAS-FPID)算法。引入增益自适应Smith预估控制器实现滞后补偿,模糊控制器来实现PID参数动态网络环境的在线调整;NS2仿真表明,所提出算法能克服滞后的影响,能快速的适应动态网络环境,具有很好的稳定性和鲁棒性。

关键词: 主动队列管理; 大时滞; 模糊PID控制; 增益; Smith预估器

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.19.040 **文章编号:** 1002-8331(2008)19-0132-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP393

1 引言

主动队列管理 AQM(Active Queue Management)机制是在路由器中间节点实现的拥塞控制。AQM 的代表算法是 RED(Random Early Detection)。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,但是 RED 也存在一些缺陷。文献[1]应用控制理论分析 TCP/AQM 模型^[1],并设计 PI 控制器实现 AQM 算法,提出采用瞬时队列代替平均队列用于拥塞控制。与 RED 算法相比,PI 控制器能更好的保持队列长度的稳定。文献[3,4]在 PI 基础上提出了 PID 控制算法,取得了比 RED 以及 PI 控制器相对理想的控制性能。但无论是 RED 算法还是 PI, PID 算法,都缺乏自适应机制。API 算法^[5]就是在 PI 基础上考虑提高控制器的自适应性能,关于 PID 控制自适应性^[6,7]的研究在大量进行中。

网络拥塞控制系统本质上是一个时滞系统。纯滞后环节是引起控制信息混乱的根源,这是因为时滞系统的控制量要等待一段时间才会有反映,所以当系统的时滞时间大时就会产生控制量过大,从而产生振荡。要提高控制品质必须要对控制器进

行补偿。

本文针对长时滞和网络动态变化,提出一种大时滞网络自适应 PID 主动队列管理算法,利用模糊控制器来在线整定 PID 控制器的参数,利用增益自适应 Smith 预估控制器对大时滞进行补偿。NS2 仿真表明该算法在大时滞的情况下具有很好的控制性能,在网络环境变化的情况下,能快速稳定的适应动态网络环境,收敛于期望队列长度,具有稳定性和鲁棒性。

2 TCP/AQM 控制理论模型及其一阶近似

在文献[2]中,采用流体理论建立了基于拥塞 AQM 路由器的 TCP 动态模型,把网络拥塞控制抽象为一个线性时滞反馈控制系统,它可以用如下一组非线性微分方程来描述:

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

作者简介: 侯萍(1977-),女,博士,讲师,主要研究领域为网络系统的拥塞控制,智能控制;王执铨(1939-),男,博士生导师,教授,主要研究领域为网络系统的拥塞控制,混沌控制,鲁棒控制,容错控制,信息安全。

收稿日期: 2007-10-09 **修回日期:** 2007-12-26

其中, $W(t)$ 代表平均 TCP 窗口大小(包); $q(t)$ 代表平均队列长度(包); $R(t)$ 代表往返时间(RTT); $C(t)$ 代表链路容量(包/s); T_p 代表传输延时(s); $N(t)$ 代表 TCP 连接数; $p(t)$ 代表数据包丢弃概率。

利用方框图 1 表示这些微分方程,更强调了 TCP 的窗口控制队列动态。

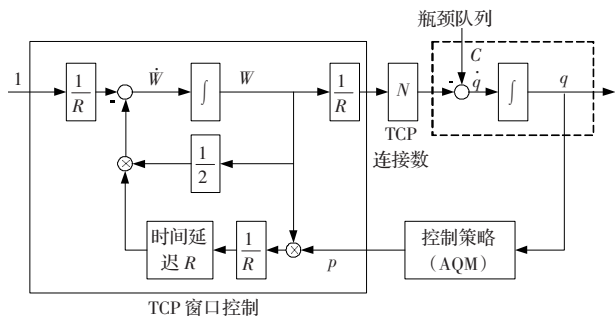


图1 TCP 拥塞避免控制图

为分析方便,把非线性微分方程在稳态工作点附近进行局部线性化处理方程(1),在忽略窗口动态的高频特性的前提下,得到长时滞二阶模型^[9],其对应的系统传递函数:

$$G_p(s) = \frac{(RC)^3 e^{-Rs}}{4N^2 (Rs+1)(\frac{R^2C}{2N}s+1)} \quad (2)$$

TCP/AQM 线性时滞反馈系统结构图如图 2 所示。

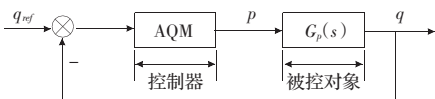


图2 TCP/AQM 线性时延反馈系统结构图

用一阶加纯滞后模型降阶拟合等效二阶 TCP 动态对象模型,也就是寻找(2)式和(3)式的关系。

$$\hat{G}_p(s) = \frac{Ke^{-Ts}}{(Ts+1)} \quad (3)$$

经推导,上述式中的参数关系如下:

$$\hat{G}_p(s) \approx \frac{Ke^{(-T_1-T_2-R+\sqrt{T_1^2+T_2^2})s}}{(\sqrt{T_1^2+T_2^2}s+1)} \quad (4)$$

3 大时滞自适应主动队列管理新算法 GAS-FPID 设计

GAS-FPID(Gain Adaptive Smith-Fuzzy PID)算法的控制结构图,如图 3 所示。该算法主要包括 2 个部分:(1)增益自适应 Smith 预估控制,用于克服网络数据反馈的滞后性;(2)模糊 PID 控制器,用于在线调解 PID 参数。GAS-FPID 控制方式综合了模糊控制、PID 控制及 Smith 控制的优点,在很大程度上克服了 PID 算法精度不高及其鲁棒性差的缺点,也大大的减小了 Smith 控制算法对于模型误差的敏感性。

3.1 增益自适应 Smith 预估器

由于 Smith 预估器对模型结构与参数的精确性过于敏感,使其难以应用于实践。本文基于 Lyapunov 渐近稳定原理,在原 Smith 预估器的基础上加入增益自适应算法,引入一种新型增益自适应 Smith 预估器^[9,10]。增益自适应预估补偿控制系统结构

图如图 3 所示,经预估得到的 $\tilde{y}(t)$ 与预估器输出 $y_m(t)$ 进行比较,得其误差 $e_y(t)$,经增益自适应算法,得 $k_m(t)$, $k_m(t)$ 力图使 $e_y(t)$ 趋于零。

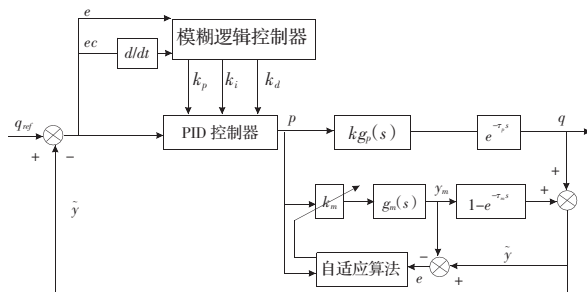


图3 基于增益自适应 Smith 预估器的模糊 PID 控制结构图

下面针对控制对象一阶近似式(4),推导增益自适应算法。

设 $g_p(s) = \frac{1}{T_p s + 1}$, 其中 $T_p = \sqrt{T_1^2 + T_2^2}$, $g_m(s) = \frac{1}{T_m s + 1}$, 由图 3

可推知:

$$\dot{y}_p(t) = -\frac{1}{T_p} y_p(t) + \frac{k}{T_p} u(t) \quad (5)$$

$$\dot{y}_m(t) = -\frac{1}{T_m} y_m(t) + \frac{k_m}{T_m} u(t) \quad (6)$$

假设 $T_m = T_p$, $\tau_m = \tau_p$, 根据式(4) $\tau_p = T_1 + T_2 + R - \sqrt{T_1^2 + T_2^2}$, 则有

$\tilde{y}(t) \approx y_p(t)$, 即:

$$\dot{\tilde{y}}(t) = -\frac{1}{T_p} \tilde{y}(t) + \frac{k}{T_p} u(t) \quad (7)$$

而 $e_y(t) = \tilde{y}(t) - y_m(t)$,

$$\dot{e}_y(t) = \frac{1}{T_p} e_y(t) + \frac{1}{T_p} [k - k_m(t)] u(t) \quad (8)$$

令 Σ 为包含变量 $e_y(t)$, $k - k_m(t)$ 的一个二维空间, 设 $\epsilon^T = \{e_y, [k - k_m(t)]\}$ 为空间的向量, 选 Lyapunov 函数为:

$$V(\epsilon) = \frac{1}{2} \{T_p e_y^2(t) + \frac{1}{\lambda} [k - k_m(t)]^2\} \quad (9)$$

式中: $\lambda > 0$, $T_p > 0$, 所以对所有 $V(\epsilon) > 0$ 成立。

$$\dot{V}(\epsilon) = -e_y^2(t) - [k - k_m(t)] \left[\frac{1}{\lambda} \dot{k}_m(t) - e_y(t) u(t) \right] \quad (10)$$

令 $\dot{k}_m(t) = \lambda e_y(t) u(t)$, 即:

$$k_m(t) = \lambda \int e_y(t) u(t) dt + k_{m0} \quad (11)$$

则:

$$\dot{V}(\epsilon) = -e_y^2(t) \leq 0 \quad (12)$$

由 Lyapunov 渐近稳定原理知, 式(8)渐近稳定^[11]。式(11)为增益自适应算式。

3.2 模糊控制器在线整定 PID 控制器参数

模糊控制器以偏差 $e(k) = q_{ref} - \tilde{q}(k)$ 和偏差变化 $ec(k) = e(k) - e(k-1)$ 作为模糊控制器的输入, 利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修正, 并以 PID 参数的修正量 ($\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$) 为输出, 以满足不同时刻系统偏差和偏差变化对 PID 参数整定的要求。在实际运行中通过不断的监测 e 和 ec , 根据模糊控制原理对 3 个参数进行在线自动调整。

将系统的误差 e 和误差变化 ec 的变化范围定义为模糊集上的论域: $e, ec = \{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, 其模糊子集

为 $E, EC=\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。 e 和 ec 的基本论域设为 $[e_a, e_b], [ec_a, ec_b]$ 。3 个二维模糊控制器的输出变量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$, 取其论域和模糊子集也均为 $\{-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ 和 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 基本论域分别为 $[\Delta k_{pa}, \Delta k_{pb}], [\Delta k_{ia}, \Delta k_{ib}], [\Delta k_{da}, \Delta k_{db}]$ 。各个模糊语言变量隶属度函数均为正态型 $\mu(x) = e^{-\frac{(x-a)^2}{b^2}}$ 。采用经典模糊控制规则^[12], 建立合适的模糊规则表。的模糊规则表如表 1 所示, Δk_i 和 Δk_d 的模糊规则表与其类似, 在此省略。

表 1 Δk_p 模糊规则表

ec	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
e	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB

根据各模糊子集的隶属度赋值表, 隶属函数曲线和各参数模糊控制模型, 应用模糊合成推理可以设计出 PID 参数的模糊矩阵表, 然后查出修正参数代入下式:

$$k_p(k) = k_p(k-1) + \Delta k_{p[e, ec]}(k-1) \quad (13)$$

$$k_i(k) = k_i(k-1) + \Delta k_{i[e, ec]}(k-1) \quad (14)$$

$$k_d(k) = k_d(k-1) + \Delta k_{d[e, ec]}(k-1) \quad (15)$$

根据模糊 PID 控制理论, 得到自适应主动队列管理数据包丢弃率的调节公式:

$$\Delta P(k) = K_p \left[\left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e(k) - \left(1 + \frac{2T_d}{T} \right) e(k-1) + \frac{T_d}{T} e(k-2) \right] \quad (16)$$

其中 $e(k) = q_{ref} - \tilde{q}(k)$, $T_i = K_p / K_i$, $T_d = K_d / K_p$, T 为采样时间。

4 算法性能仿真及性能评价

下面利用网络仿真软件 NS2^[13] 进行仿真, 验证 GAS-FPID 算法的性能。模拟网络拓扑结构如图 4 所示, $s_i (i=1 \sim n)$ 为 TCP 应用发送端, s_d 为 UDP 应用发送端, 结点 $nn1$ 和 $nn2$ 之间为瓶颈链路。队长期望值 $q_{ref} = 200$ packet, 经整定得到 PID 控制器的初始参数^[14], $k_p = 4.75 \times 10^{-5}$, $k_i = 1.74 \times 10^{-5}$, $k_d = 8.37 \times 10^{-6}$ 。采样时间 $T = 0.033$ s, 偏差 e 的论域为 $[-200, 200]$, 偏差变化 ec 的论域为 $[-100, 100]$, 3 个输出变量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的论域分别为 $[-1 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-5}]$, $[-5 \times 10^{-6}, 5 \times 10^{-6}]$, $[-2 \times 10^{-6}, 2 \times 10^{-6}]$, 正态型隶属函数参数 a, b 分别取为 0, 1。

实验 1 考察大时滞对算法的影响。图 4 中由 TCP 连接承

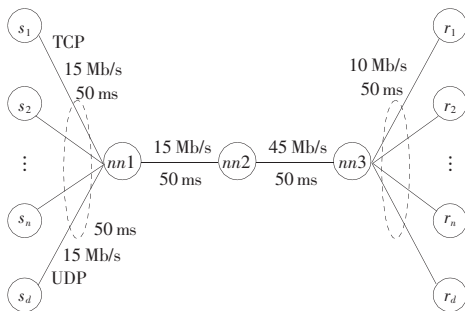


图 4 模拟网络拓扑结构图

载 FTP 业务模拟网络负载, 数据源为 60 个 FTP 产生的数据流, 包大小为 500 byte, 瓶颈链路带宽 C 为 15 Mb/s, 任意两结点之间的传播延时都为 50 ms, 则总的 RTT 至少为 400 ms。连接结点缓冲区空间均为 500 个包。瓶颈链路采用 GAS-FPID 控制策略, 其他链路队列管理算法均采用 DropTail 算法。实验仿真结果如图 5 所示。

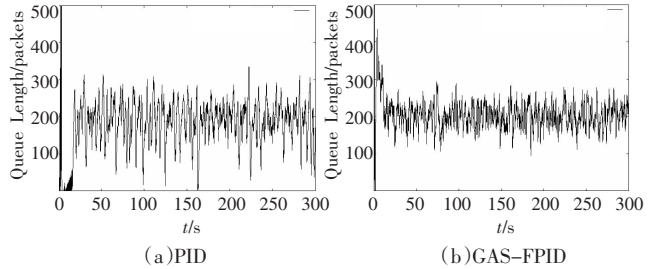


图 5 PID 和 GAS-FPID 瞬时队列长度曲线 ($R=400$ ms)

由图 5 可以看出, 在大时滞情况下, PID 算法得瞬时队列曲线出现了轻微震荡和抖动, 调整到稳定状态需要的时间较长, 最初 20 s 时间出现链路利用为空, 丢包率较高, 20 s 后队列变化范围大致在 100~300 之间。相比之下, GAS-FPID 算法具有较快的响应速度, 在大约 10 s 后进入稳定的状态, 瞬时队列比较集中, 在 180~220 之间, 且稳定, 综合性能较好。

实验 2 考察网络参数配置发生变化对算法的影响。保持链路带宽 C 和 RTT 不变, 仅改变连接数 N , 在实验开始时, 有 60 个 FTP 源发送数据, 在 30 s 时, 有 12 个新的 FTP 源开始发送数据, 在 180 s 的时候, 这 12 个 FTP 源停止发送数据, 仿真结果如图 6 所示; 保持 C, N 和 RTT 不变, 加入一个 UDP/CBR 源作为噪声干扰, 每个 CBR 包的大小为 1 000, 其发送带宽为 1.5 Mb, 在 80 s 时开始发送数据, 在 240 s 时停止发送数据, 仿真结果如图 7 所示。

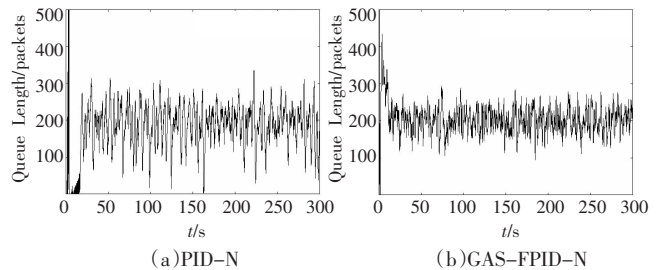


图 6 PID 和 GAS-FPID 瞬时队列长度曲线 (连接数 N 变化)

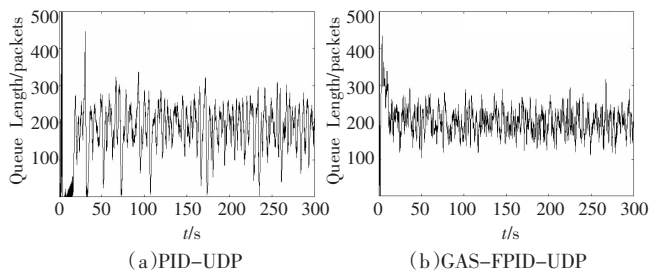


图 7 PID 和 GAS-FPID 瞬时队列长度曲线 (存在 UDP 干扰时)

由图 6~图 7 可以看出, 在 N 发生变化和增加噪声干扰的情况下, 在 30 s 时, PID 有一定的影响, 队列长度有所上升, 增加噪声干扰的最明显, 在 30 s 时 PID 的队列长度升到了 450,

而在 180 s,干扰终止时,PID 队列有所下降,出现振荡,链路利用率下降。相比之下,GAS-FPID 算法体现了较强的抗干扰能力,超调量小,振荡轻微,快速收敛于队列长度期望值,同时具有较小的丢包率。

5 结束语

本文针对长时滞和网络动态变化,提出一种大时滞网络自适应 PID 主动队列管理算法,利用模糊控制器来在线整定 PID 控制器的参数,利用增益自适应 Smith 预估控制器对大时滞进行补偿。NS2 仿真表明该算法在大时滞的情况下具有很好的控制性能,在网络环境变化的情况下,能快速稳定的适应动态网络环境,收敛于期望队列长度,具有稳定性和鲁棒性。该算法适合复杂网络环境的在线实时控制。

参考文献:

- [1] Hollot C,Misra V,Towsley D.On designing improved controllers for AQM routers supporting TCP flows[C]//Proceeding of the INFOCOM 2001.Anchorage:IEEE Computer Society,2001:1726-1734.
- [2] Misra V,Gong W B,Towsley D.Fluid-based analysis of a network of AQM routers supporting TCP flows with an application to RED[C]//Proceedings of the ACM/SIGCOMM 2000.Stockholm:ACM press,2000:386-399.
- [3] 任丰原.主动队列管理中控制器的设计[J].电子与信息学报,2003,25(1):94-99.

- [4] Ryu S,Rump C.Design of load-adaptive queue management for Internet congestion control[C]//ICOIN 2003,Cheju Island,Korea,2003:24-34.
- [5] Wang Chong-gang.API:Adaptive Proportional-Integral algorithm for active queue management under dynamic [C]//HPSR2004,Phoenix,Arizona,2004:51-55.
- [6] Deng Xi-dong.A control theoretic approach for designing adaptive AQM schemes[C]//GLOBECOM 2003,San Francisco,California,2003,5:2947-2951.
- [7] Ryu S.A predictive and robust active queue management for Internet congestion control[C]//ISCC 2003,Kemer-Antalya,Turkey,2003,2:991-998.
- [8] Hollot C V,Misra V,Towsley D,et al.A control theoretic analysis of RED[C]//IEEE INFOCOM 2001,2001.
- [9] 鲁照权,韩江洪.一种新型增益自适应 Smith 预估器[J].仪器仪表学报,2002,23(2):195-196.
- [10] 向少华,胥布工,彭达洲,等.基于增益自适应 Smith 预估器的鲁棒 AQM 拥塞控制算法[J].华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(9):40-44.
- [11] 郑大钟.线性系统理论[M].北京:清华大学出版社,1990.
- [12] 刘金琨.先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [13] VINT project.ns2:network simulator[EB/OL].(2004-04-05).http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-allinone.
- [14] 孙雁飞.一种时滞网络自适应主动队列管理算法研究[J].电子与信息学报,2006,28(10):1940-1945.

(上接 128 页)

5 结语

抽样技术和哈希技术是目前高速网络流测量中主要使用的技术,Bloom filter 也由于其哈希查找的常数时间和存储空间开销及哈希冲突较少,成为网络测量中的热门方法。本文从资源控制出发,根据网络流量的突发性特点,结合抽样技术和哈希技术,提出了基于 DCF 的资源可控流抽样,从限制抽样流样本数和对抽样流的处理两方面来减少资源消耗,有效保护了路由器的处理器和内存资源及传送流记录所需的带宽资源。该方法简单易行,抽样率自适应实际流量而变化,资源消耗可控,具有很好的实用性。

参考文献:

- [1] Duffield N,Lund C,Thorup M.Properties and prediction of flow statistics from sampled packet streams[C]//Proc of ACM SIGCOMM Internet Measurement Workshop 2002,USA,2002:159-171.
- [2] He Guang-hui,Jennifer C.An in-depth,analytical study of sampling techniques for self-similar internet traffic [C]//ICDCS'05,IEEE,2005:404-413.
- [3] Estan C,Keys K,Moore D,et al.Building a better NetFlow:technical report[C]//ACM SIGCOMM'04,Portland,Oregon,USA,2004.

- [4] Duffield N,Lund C,Thorup M.Estimating flow distributions from sampled flow statistics[J].IEEE/ACM Transactions on Networking,2005,13(5):933-946.
- [5] Wang Hong-bo,Wei An-ming,Lin Ynn,et al.Time stratified packet sampling based on measurement buffer for flow measurement[J].Journal of Software,2006,17(8):1775-1784.
- [6] Bloom B.Space/time tradeoffs in hash coding with allowable errors[J].Communications ACM,1970,13(7):422-426.
- [7] Border A,Mitzenmacher M.Network applications of bloom filters:a survey[J].Internet Math,2003(4):485-509.
- [8] Li F,Cao P,Almeida J,et al.Summary cache:a scalable wide-area Web cache sharing protocol[J].IEEE/ACM Transactions on Networking,2000,8(3):281-293.
- [9] NLANR PMA:Special traces archive [EB/OL].(2005-05-19).http://pma.nlanr.net/Special.
- [10] Aguilar-Saborit J,Trancoso P,Muntes-Mulero V.Dynamic count filters[J].ACM SIGMOD Record,2006,35(1):26-32.
- [11] Mori T,Uchida M,Kawahara R.Identifying elephant flows through periodically sampled packets[C]//IMC,2004:115-120.
- [12] Cohen S,Matias Y.Spectral bloom filters[C]//Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data,2003:241-252.