

# 一种新颖的数据估计技术——dEWMA 及其在 RED 中的应用

岳 鹏 刘增基

(西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室 西安 710071)

**摘 要:** 该文首先提出了一种新颖的估计技术——dEWMA(double Exponential Weighted Moving Average)。该技术采用两个 EWMA 估计器进行数据测量,克服了传统 EWMA 估计技术不能同时获得良好的时效性和平稳性的缺点,能够为相关应用提供更加准确、灵活的数据估计。其次通过在 RED 网关中应用 dEWMA 技术,对其有效性进行验证。仿真结果表明采用 dEWMA 的 RED 性能较之未采用 dEWMA 的 RED 有明显的改善。

**关键词:** 拥塞控制, 双指数加权移动平滑估计器, 时效性, 主动队列管理

**中图分类号:** TP393.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)08-1320-04

## A Novel Data Estimation Technology—dEWMA and Its Application to RED Gateway

Yue Peng Liu Zeng-ji

(State Key of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract** This paper firstly presents a novel estimation technology—dEWMA (double Exponential Weighted Moving Average), which employs two EWMA filters to measure data, overcomes the defect that traditional EWMA estimation technology does not achieve fine agility and stability, and provides much more accurate, flexible data estimation. Secondly, the effectiveness of dEWMA is validated by applying to RED gateway. The simulations show that the performance of RED with dEWMA is better than that of RED with non-dEWMA.

**Key words** Congestion control, dEWMA estimator, Agility, Active queue management

### 1 引言

指数加权移动平滑(Exponential Weighted Moving Average)技术是一种理想的极大似然估计技术,广泛的应用于许多领域。在通信领域中,EWMA 主要用于对网络的状态参数进行估计和平滑,例如在 TCP 拥塞控制中 EWMA 被用来计算分组的往返时延(RTT),文献[1]中 EWMA 被用来平滑分组的到达率,另外在许多主动队列管理(AQM)技术<sup>[2-5]</sup>中 EWMA 被用来估计平滑拥塞指示参数(如平均队长)等。尽管 EWMA 技术简单实用,但是其最大的缺点是不能同时获得良好的时效性和平稳性,这对一些应用(例如 RED 的平均队长估计上)的性能将产生不良影响,严重的时候将引起应用失效。

笔者针对传统 EWMA 技术的缺点,提出了一种基于双 EWMA 估计器的数据估计技术,该技术可提供良好的时效性和平稳性,并能够为相关应用(例如 RED, Random Early Detection)提供更为准确、灵活的数据估计。本文具体安排如下:第 2 节简要介绍传统的 EWMA 技术,并在此基础上给

出 dEWMA 技术的设计思想、基本原理和实现方法;第 3 节重点讨论 dEWMA 技术如何在 RED 中实现;第 4 节对采用 dEWMA 技术的 RED 算法的性能进行仿真,并与传统 RED 算法的性能进行比较;第 5 节总结全文。

### 2 双指数加权移动平滑(dEWMA)

EWMA 是一种理想的极大似然估计技术,它采用一个权重因子  $w$  对数据进行估计,通常的表达式为

$$e_k = (1-w) \times e_{k-1} + w \times s_k \quad (1)$$

式中  $e_k$  为在第  $k$  次抽样时的估计值,它由前一次估计值  $e_{k-1}$  和当前的抽样值  $s_k$  共同决定,  $w(0 < w < 1)$  为权重因子,它决定 EWMA 估计器跟踪实际数据突然发生变化的能力。这种跟踪能力称为时效性,显然随着  $w$  增大,估计器的时效性就越强,反之,越弱;另一方面,由于  $w$  的存在,EWMA 还表现出一定的吸收瞬时突发的能力,这种能力称为平稳性。显然随着  $w$  减小,估计器的平稳性增强,反之降低。EWMA 估计器的时效性和平稳性在只有一个权重因子进行调节的情况下,是一对矛盾,即采用传统的 EWMA 技术不能同时

获得良好的时效性和平稳性。因而当某些应用既需要良好的平稳性以吸收短暂的突发,同时也需要良好的时效性以迅速跟踪数据变化的时候,则权重因子 $w$ 的设置通常变得非常困难。

针对传统 EWMA 的缺点,笔者另辟新径,提出一种新颖的数据估计技术——dEWMA(double EWMA)。在模拟电路设计中,甲类功放放在无输入信号时工作点电流较大,因而效率较低。如果采用乙类工作状态,使晶体管静态工作电流为零,这时晶体管就不消耗功率,于是效率就得以提高,但是其输出波形将被消去一半,产生严重的非线性失真。为解决此矛盾,通常选用两只特性完全相同的晶体管,使它们都工作在乙类状态。两只晶体管轮流工作,一只晶体管在输入信号正半周导通,另一支在输入信号的负半周导通,这样两管交替工作,犹如一“推”一“挽”,在负载上合成完整的信号波形,从而提高功放的效率。dEWMA 技术的设计思想正是来源于“推挽”功放。如图 1 所示,它是由两个 EWMA 估计器和一个控制器组成的。根据需要一个 EWMA 估计器(称为 EWMAa)选择较大权重因子以跟踪所测数据的突然变化情况,即保证一定的时效性;另一个 EWMA 估计器(EWMA<sub>s</sub>)则选择较小的权重因子以吸收暂时的突发,保证所测数据良好的平稳性;控制器的功能主要是通过一套判决算法在两个 EWMA 输出中选择合适的结果。

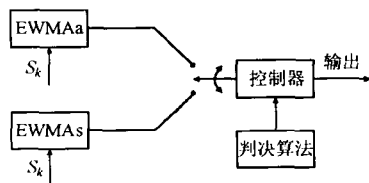


图 1 dEWMA 结构框图

一般而言当无大的突发发生时,控制器选择 EWMA<sub>s</sub> 的输出作为估计结果,这时的 dEWMA 就是 EWMA。当两个估计器得到的估计结果之间差值大于预设值  $\zeta$ , 则计数器 Cnt 增加 1, 若 Cnt 连续增加超过预设的门限 Td1, 表明当前的 EWMA<sub>s</sub> 的估计值已经无法有效跟踪数据的变化, 则控制器选择 EWMAa 的输出作为估计结果; 当数据变化趋于稳定, 两个估计器得到的估计结果之差值小于预设值  $\zeta$ , 则 Cnt 减少 1, 若 Cnt 连续减少低于预设的门限 Td2, 表明 EWMA<sub>s</sub> 的估计值又重新跟踪上了数据的变化, 则控制器重新选择 EWMA<sub>s</sub> 的输出作为估计结果。以上判决算法由下面的伪码给出:

初始化

```
1 Cnt=0, Flag = 0, EWMAa_output = 0, EWMA_s_output
   = 0, Estimator_output = 0;
```

在每个抽样时刻:

```
2 calculate EWMAa_output ;
```

```
3 calculate EWMA_s_output;
4 Estimator_output = EWMAa_output;
5 if (|EWMAa_output - EWMA_s_output| >= \zeta ) {
6   Cnt ++;
7   if (Cnt > Td1) {
8     Estimator_output = EWMAa_output;
9     Flag = 1;
10    Cnt = Td1;
11  }
12  else
13  if (Flag == 1)
14    Estimator_output = EWMAa_output;
15  }
16  else
17  if (Cnt > 0) {
18    Cnt --;
19    if (Cnt > Td2) && (Flag == 1)
20      Estimator_output = EWMAa_output;
21    else
22    {
23      if (Flag == 1)
24        Flag = 0;
25      Cnt = 0;
26    }
27  }
28 }
```

其中  $\zeta$  定义为系统最大允许的偏离值, 若

$$|e_m^a - e_m^s| \geq \zeta \quad (2)$$

则表明 EWMA<sub>s</sub> 估计器已经不能跟踪数据的变化; Td1 定义为系统允许的最大失调时间, 在该时间间隔 (Cnt < Td1) 内, 控制器忽视数据变化的影响, 维持 EWMA<sub>s</sub> 的输出作为估计结果, 这样做的目的是防止数据暂时的变化引起估计结果产生震荡。Td2 定义为系统恢复到平稳状态前经历的最大时间间隔, 在该时间间隔 (Cnt > Td2) 内, 控制器维持 EWMAa 的输出作为估计结果。Td2 的作用也是防止数据暂时的变化引起估计结果产生震荡。

$\zeta$ , Td1, Td2 的设置和具体的应用有关, 下一节以 dEWMA 如何在 RED 中应用为例, 详细讨论  $\zeta$ , Td1, Td2 的设置问题。

### 3 dEWMA 在 RED 中的应用

上节详细讨论了 dEWMA 技术的设计思想、基本原理和实现方法。本节以 RED 为例, 详细讨论 dEWMA 在 RED 中的应用。

RED 是 Sally Floyd 和 Van Jacobson<sup>[2]</sup>提出的一种著名的 AQM 技术,它对于新到来的分组先按 EWMA 近似的估计平均队列大小  $avg$

$$avg = old\_avg \times (1 - w_q) + q \times w_q, \quad 0 < w_q < 1 \quad (3)$$

其中  $avg$  为当前平均队列大小,  $old\_avg$  为前一次平均队列大小,  $q$  为当前队列大小,  $w_q$  为加权权值。采用 EWMA 的目的是为了使平均队列长度随业务流量变化温和的变化,减缓高速通信中瞬时数据突发对拥塞指示的影响,从而减少失真。然后 RED 通过观察当前平均队列大小  $avg$ , 设置不同丢包概率: 若  $avg$  小于最小阈值  $min_{th}$ , 不丢包; 若大于最大阈值  $max_{th}$ , 以概率 1 丢包; 若在两者之间, 按一定概率随机丢包。丢包概率  $p$  可描述为

$$p(avg) = \begin{cases} 0, & 0 \leq avg < min_{th} \\ \frac{avg - min_{th}}{max_{th} - min_{th}} p^{max}, & min_{th} \leq avg \leq max_{th} \\ 1, & max_{th} < avg \end{cases} \quad (4)$$

丢包概率  $p$  随平均队列长度估计值的增加而增加, 由于每个流的丢包概率与流所占资源成正比, 路由器实现 RED 不需要知道每个流的状态, 这对每个链路都有成千上万数据流的因特网来说非常重要, 可大大降低路由器的复杂度。另外, RED 维持平均队列长度进行拥塞控制, 可以吸收瞬时的突发数据而不丢包; 同时, 其随机丢包也大大减少了因队尾丢弃(drop-tail)策略引起的全局同步而导致的链路带宽震荡现象, 从而提高链路利用率。RED 的诸多优点不论在仿真实验还是实际应用中都得到验证, 因此受到 IETF 的推崇, 设备制造商的青睐。

RED 尽管优点突出, 但面对千变万化的网络仍存在诸多问题, 其最大的问题是网络性能对参数很敏感。RED 的参数包括  $w_q$ ,  $min_{th}$ ,  $max_{th}$  和  $p^{max}$ , 这些参数一旦配置不合理, 不仅不会改善网络的性能, 而且会引起网络的不稳定, 甚至会引起业务量崩溃。因而文献[7,8]等提出的算法致力于解决这个问题。

本文着重讨论权重因子  $w_q$  对 RED 性能的影响, 因而其它参数均采用默认配置。由式(4)可知, 当  $min_{th}$ 、 $max_{th}$  和  $p^{max}$  一定时, 丢失概率  $p$  由平均队列长度的估计值  $avg$  决定, 而  $avg$  由式(3)确定, 显然式(3)中权重因子  $w_q$  设置正确与否将直接影响  $avg$ , 从而间接影响 RED 丢失概率  $p$ 。在 RED 算法中,  $w_q$  通常从估计结果的平稳性(克服暂时的突发对估计结果的影响)考虑进行设计的, 因而较为保守。当业务变化不大时, 估计结果较为准确有效, 但是当业务变化非常剧烈的时候, 从平稳性角度设计的  $w_q$  将不能有效跟踪业务的变化速率, 即时效性很差, 这将导致估计结果严重失真, 引起欠(过)丢弃, 严重影响 RED 的性能。dEWMA 技术克服了传统 EWMA 技术的缺陷, 其最大的特点就是能够为相关应用提

供良好的时效性和平稳性。下面讨论在 RED 中如何应用 dEWMA, 即如何设置参数  $\zeta$ , Td1 和 Td2。

在 RED 中, 估计测量对象为队列的平均队长。因而  $\zeta$  的设置取决于两个估计器输出的平均队长差值, 定义  $d_i$  表示当实际队长增长到  $i$  时, 两个估计器输出的平均队长差值, 即

$$d_i = |avg_{w_a}^i - avg_{w_s}^i| \quad (5)$$

进一步定义  $L_{max}$  为预设的系统允许的最大突发分组数, 则设置  $\zeta$  为

$$\zeta = \frac{\sum_{i=1}^{L_{max}} d_i}{L_{max}} \quad (6)$$

Td1 定义为系统允许的最大失调时间。在 RED 应用中, Td1 等效为持续满足式(2)的最大失调抽样次数, 可近似的由下式确定:

$$Td1 = L_{max} - \left\lceil \left[ -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{8\zeta}{w_a - w_s}} \right] \right\rceil \quad (7)$$

上式中  $\lceil \cdot \rceil$  表示上取整,  $w_s$ ,  $w_a$  分别为 EWMA<sub>s</sub> 和 EWMA<sub>a</sub> 的权值, 且  $0 < w_s < w_a < 1$ 。

Td2 定义为系统恢复到平稳状态前经历的最长时间。在 RED 应用中, Td2 等效为当系统状态处于 EWMA<sub>a</sub> 输出时, 持续不满足式(2)的最大抽样次数。为简单起见, 本文设置该值为 Td1 的一半, 即

$$Td2 = \left\lfloor \frac{1}{2} Td1 \right\rfloor \quad (8)$$

最后, 控制器采用前述的判决算法。

#### 4 性能仿真与分析

为验证 dEWMA 技术的有效性, 笔者采用 OPNET 仿真平台, 对图 2 所示 Dumbbell 拓扑结构进行仿真。

图 2 中网络规模为 200 个 FTP 流, 每个 FTP 流采用 TCP-Reno 协议。瓶颈链路位于路由器 1 和 2 之间, 瓶颈链路带宽为 100Mbps, 传播时延 20ms; 所有的接入链路带宽

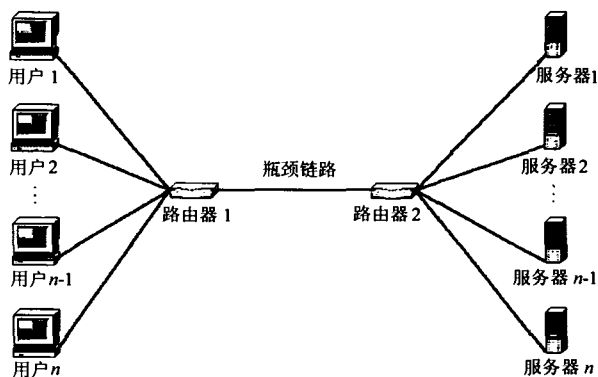


图 2 仿真拓扑结构

为 100Mbps, 传播时延 5ms。RED 参数配置如下: 缓存队列大小 200 个分组,  $\min_{th}$  为 30,  $\max_{th}$  为 130,  $P^{max}$  为 0.1。EWMA 权重配置采用文献[2]中的默认值 0.002, dEWMA 权重  $w_a$ ,  $w_s$  分别配置为 0.02, 0.002,  $L_{max}$  为 100, 依式(6)~式(8),  $\zeta$ , Td1 和 Td2 分别取 19, 54 和 27。另外, 仿真中假设所有业务流始终有足够多的发送数据, 用户 1~100 在 0s 同时向服务器 1~100 发送数据, 100s 后用户 101~200 同时向服务器 101~200 发送数据。仿真时间 200s, 数据包大小为 1000 byte。

首先考察当 RED 分别采用 EWMA 和 dEWMA 时, 路由器 2 输出链路的吞吐量变化情况。

为了尽量减少前 100 个流初始接入网络时暂态过程对仿真结果的影响, 突出当网络状态(本文采用增加流的个数)突然变化时, 对吞吐率的影响, 本文只对 80s 到 200s 区间的仿真结果进行统计。可以看到在 100s 时, 当后 100 个流同时注入网络, 采用传统 EWMA 的 RED 并不能有效同步上流量突然增加的趋势, 导致吞吐率损失较大, 图 3 中显示吞吐率最大损失 25%, 且吞吐率恢复需要较长的时间, 仿真结果表明大约需要 60s; 而采用 dEWMA 的 RED 尽管在相同的网络状态突变的情况下, 也会出现吞吐率损失的现象, 但是其损失程度相对前者小的多, 最大损失 15%, 并且吞吐率恢复时间很快, 大约 25s。可见 RED with dEWMA 较之 RED with EWMA 对网络状态突变造成的吞吐率损失有明显的改善。

接下来考察当 RED 分别采用 EWMA 和 dEWMA 时, 路由器 1 中分组平均排队时延的变化情况, 仿真结果如图 4 所示。可以看到在网络负载变化不大的时候, 采用两种估计器, 都可以获得较低的平均排队时延, 例如图 4 中 [80s, 100s] 时间段, 平均排队时延维持在 0.025 到 0.035s 之间。然而当 100s 后, 100 个流同时注入网络, 采用传统 EWMA 的平均排队时延剧烈上升, 并且需要较长的时间才能恢复到最初的水平 (0.025s~0.035s)。这表明 RED with EWMA 不能有效地抑制网络负载突然变化对平均排队时延的影响, 显然这对保障时延敏感性业务的服务质量是很不利的。而采用 dEWMA 的时延性能较之 EWMA 改善许多, 仿真结果显示, 尽管分组平均排队时延随着网络负载突然变化而增大, 但是其增加幅度远小于 EWMA, 大约为 EWMA 的一半, 并且收敛时间较之 EWMA 短的多。可见 RED with dEWMA 较之 RED with EWMA 对网络状态突变造成的平均排队时延剧烈上升有明

显的抑制能力, 改善了网络的性能。

## 5 结束语

本文主要做了两方面工作: 第一, 针对传统 EWMA 估计技术不能同时提供良好的时效性和平稳性的缺陷, 提出了一种新颖的数据估计技术——dEWMA。该技术通过两个 EWMA 估计器之间的相互配合, 采用一套简单的判决算法, 能够较好地实现良好的时效性和平稳性的统一。第二, 通过在 RED 中应用 dEWMA 技术, 进一步验证了 dEWMA 技术的有效性。仿真结果表明, 在相同的配置下, 采用 dEWMA 技术的 RED 算法的性能(吞吐率、分组平均排队时延)较之采用 EWMA 的 RED 有明显的改善。

## 参考文献

- [1] Stoica I, Shenker S, Zhang H. Core-stateless fair queueing: Achieving approximately fair bandwidth allocations in high speed networks. In Proc. ACM SIGCOMM 1998, Vancouver, Oct. 1999, vol. 28: 118 - 130.
- [2] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1993, 1(4): 397 - 413.
- [3] Pan R, Prabhakar B, Psounis K. CHOCe, a stateless active queue management scheme for approximating fair bandwidth allocation, in Proc. IEEE INFOCOM, Tel-Aviv, Israel, Mar. 2000, vol.2: 127 - 137.
- [4] Athuraliya S, Li V H, Low S H, Yin Q. REM: Active Queue Management. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2001, 9(1): 48 - 53.
- [5] Wyrowski B, Zukerman M. GREEN: An active queue management algorithm for a self-managed Internet, Proceedings of ICC 2002, New York, April 2002, vol. 4: 2368 - 2372.
- [6] Floyd S, Fall K. Router mechanisms to support end-to-end congestion control, Tech. rep, LBL, 1997 (<http://www.nrg.ee.lbl.gov/nrg-papers.html>.)
- [7] Feng W C, Dandlur D, Saha D, Shin K. A self-configuring RED gateway, In INFOCOM'99, New York, Feb. 1999: 1320 - 1328.
- [8] Floyd S, Gummadi R, Shenker S. Adaptive RED: An algorithm for increasing the robustness of RED's active queue management. 2001.8 (<http://www.icir.org/floyd/red.html>).

岳 鹏: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为因特网拥塞控制和服务质量、光城域网。

刘增基: 男, 1937 年生, 教授, 西安电子科技大学综合业务网国家重点实验室学术委员会主任。近年来一直从事交换网络、因特网拥塞控制和服务质量、下一代网络的体系架构和光网络等领域的研究工作。

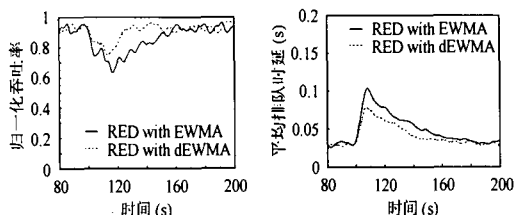


图 3 吞吐率比较

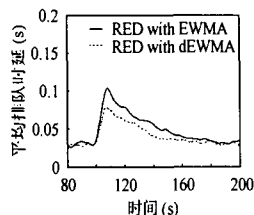


图 4 平均排队时延比较