

# 基于 IP 网络的动态部分缓冲共享方案

李 寅<sup>1</sup>, 林 闯<sup>1</sup>, 马 宁<sup>2</sup>, 周文江<sup>1</sup>

(1. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084; 2. 北京航空航天大学计算机学院, 北京 100083)

**摘 要:** 本文基于 IP 网络提出了一种分组丢弃控制方案——动态部分缓冲共享. 和已有的静态部分缓冲共享方案相比, 新方案根据分组丢弃行为对控制阈值进行动态调整, 从而对网络流量的变化具有更优的适应性. 同时新方案也避免了复杂的阈值设置问题, 任意设定的初始阈值都不会影响系统稳态性能. 实验结果显示, 新方案可以保证稳定的相对丢失率性能, 并且在相同的流量条件下比原有方案具有更低的抖动延迟.

**关键词:** 缓冲管理; 优先级分组丢弃; 部分缓冲共享

**中图分类号:** TP393.0 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 02-0214-05

## Dynamic Partial Buffer Sharing Scheme for IP Networks

LI Yin<sup>1</sup>, LIN Chuang<sup>1</sup>, Ma Ning<sup>2</sup>, ZHOU Wen-jiang<sup>1</sup>

(1. Dept. of Computer Science and Technology, Tsinghua Univ., Beijing 100084, China;

2. College of Computer, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**Abstract:** We present a packet loss control scheme for IP networks—Dynamic Partial Buffer Sharing (DPBS). Compared with Static Partial Buffer Sharing (SPBS), the new scheme adjusts control thresholds dynamically according to packets loss behavior, which is endowed with better adaptability to changing network traffic. Also, DPBS avoids complicated threshold-setting problem: arbitrary initial value will never degrade system steady-state performance. Simulation results show that, DPBS can assure nearly fixed relative loss ratio, and its loss jitter performance is also better than SPBS under same traffic condition.

**Key words:** buffer management; priority packet discarding; partial buffer sharing

### 1 引言

随着 Internet 的飞速发展, 传统的 best-effort 服务逐渐无法满足多变的用户需求, 因而如何解决 IP 网的服务质量 (QoS) 问题成为当务之急. 队列缓冲管理 (即分组丢弃控制) 机制, 作为 QoS 技术的一个核心部分已经被研究了很多年, 通常认为基于优先级的控制方案对改善系统性能有着相当大的潜力<sup>[1]</sup>. 其中, 完全分配方案 (CBP), 推出方案 (PO) 和部分缓冲共享方案 (PBS) 是研究领域内被广泛认同的三种<sup>[2-4]</sup>.

完全分配方案为每个优先级的分组分配一个单独的队列缓冲空间, 空间大小根据统计流量特性预先设定. 完全分配方案可以降低丢弃控制机制的复杂度, 但它以牺牲缓冲资源利用率为代价. 为改善静态资源分配导致的效率低下, 文 [5] 提出了虚拟分配的概念, 在作丢弃判决的同时也考虑当前缓冲资源的占用情况. 这样类似的改进方案对资源利用率的提高不大, 且灵活性和可操作性较差.

推出方案中, 所有优先级的分组完全共享同一个队列缓冲空间, 能够获得最优的资源利用率. 只要系统中仍有足够的

空闲缓冲资源, 到达分组就不会被丢弃; 当缓冲资源全部被占用时, 到达的低优先级分组将被丢弃, 而高优先级分组则会把已经缓存的低优先级分组 (如果存在的话) “推出”, 占据相应的空间. 然而, 推出方案过于复杂, 需要得到相应的硬件支持才能较好的实现. 而且在 IP 网中, 由于非固定的分组长度, 可能需要一次推出多个低优先级分组, 这更增加了实现的难度.

PBS 方案是前两者的折衷, 兼顾了系统性能和实现的复杂度. PBS 方案依据预先设定的丢弃阈值进行分组丢弃控制. 在两个优先级的情况下, 如果缓冲资源的占用低于丢弃阈值, 则所有到达分组都会被接受, 否则只有高优先级分组可以进入队列, 而低优先级分组将被丢弃. 多个优先级情况下采用嵌套的多个丢弃阈值, 情况也类似<sup>[6]</sup>. PBS 方案算法简单, 易于实现, 实验结果表明, 在最优阈值情况下和推出方案的性能非常接近, 因此获得了相当广泛的关注和深入研究.

然而, PBS 方案中的阈值设定是一个很大的难题. 如何能够获得最优阈值以增强系统资源利用率, 同时保证不同优先级之间的相对公平性, 至今没有给出理论结果. 而阈值的静态特性不能适应网络流量的变化, 尤其在流量突发性很强的情

收稿日期: 2002-08-29; 修回日期: 2003-10-16

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973 计划) 项目 (No. G1999032707); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 课题 (No. 2001AA112080); 国家自然科学基金 (No. 90104002, No. 60173012); Intel 公司 IXA 大学研究项目 (No. 9077)

况下. 在后面的叙述里, 为了和文中提出的动态部分缓冲共享 (DPBS) 方案相区别, 将静态阈值的 PBS 方案称为静态部分缓冲共享 (SPBS) 方案<sup>[3,10]</sup>.

DPBS 方案的基本思想是根据分组丢弃行为动态调整丢弃阈值, 确保相对丢失率稳定在期望值附近. 另一方面, 阈值的动态特性使得其能够一定程度上更适应网络流量的变化, 获得优化的缓冲资源利用率. 在 DPBS 方案中, 不同优先级分组相互竞争共享的缓冲资源, 在阈值的调整上形成一种负反馈机制, 推动阈值不断优化调整, 保持稳定的丢失率性能.

### 2 方案模型

DPBS 方案是在 SPBS 方案基础上改进的, 同样是根据队列长度和丢弃阈值的关系来做分组丢弃判决, 也可支持到多个丢弃优先级. 下面给出基于连续时间系统的模型描述及分析.

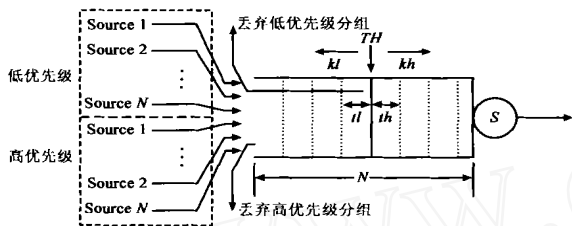


图 1 两个优先级 DPBS 方案队列模型

本文中引入 IP 交换的概念, 采用一致化的队列模型——将到达分组划分为若干信元, 个数取决于分组长度和设定的系统信元长度, 缓冲资源和服务资源都以信元为单位分配. 这样, 长分组将消耗更多的缓冲资源和服务资源, 而分组尾部不足一个信元长度的部分也将消耗一个信元所需的系统资源.

假定队列空间容量为  $N$  个单元, 可以容纳  $N$  个信元, 到达的 IP 分组按照其长度占据不同数目的单元数. 假定有  $D$  个分组丢弃优先级, 则相应有  $D$  个丢弃阈值  $TH_d (1 \leq d \leq D)$ , 并且满足关系  $0 < TH_1 < \dots < TH_{D-1} < TH_D = N$ . 其中  $TH_D$  只是为了便于理解而添加的, 运行期保持为总的队列空间容量  $N$  恒定不变. 优先级为  $d$  的到达分组, 当且仅当其进入队列后队列长度 (队列缓冲单元的占用数) 不超过相应丢弃阈值  $TH_d$  时, 即满足条件  $q + \lceil L/S \rceil \leq TH_d$  才可以进入队列, 否则将被丢弃. 其中,  $L$  为到达分组长度,  $S$  为系统信元长度,  $q$  为当前队列长度. 而一旦分组进入队列后, 将不会被后续到达的分组推出队列.

#### 2.1 两优先级方案

如图 1 所示, 两丢弃优先级情况下, 所有到达组归属高、低两个优先级. 丢弃阈值  $TH$  的初始值设置在  $0$  和  $N$  之间 (图中,  $0$  的位置在靠近服务器的队列右端), 后面将看到初始值的设定不影响算法的稳态性能. 只要队列中还有足够的容纳空间, 高优先级的分组就可以进入队列; 而如果队列长度将超过丢弃阈值, 到达的低优先级分组将被丢弃.

为了实现丢弃阈值的动态调整, 每个优先级对应有一个

丢弃计数, 用来记录该优先级丢弃分组个数, 丢弃计数的累计将会推动阈值逐渐调整. 以高优先级为例, 当丢弃计数超过相应的丢弃上限  $kh$  时, 算法将控制  $TH$  减小相应的修正步长  $th$ . 反之, 对于低优先级也有类似的机制, 当丢弃计数超过相应的丢弃上限  $kl$  时, 算法将控制  $TH$  增大相应的修正步长  $tl$ .

这种动态阈值调整的基本思想在于, 数据流的到达在短时间内是相对平稳的, 根据当前的丢失量一定程度上可以预测到下一阶段的数据流量. 如果一段时间内某优先级的分组丢失量较大, 则相应下一时间段内该优先级到达流量大的概率也较高, 反之亦然. 同时, 如果高优先级的分组丢弃过多, 则应该减小丢弃阈值以压缩低优先级可用的缓冲空间, 而如果低优先级的分组丢弃过多, 则应该增大丢弃阈值, 增大低优先级分组的可用缓冲空间, 保证相对丢失率维持在期望值附近. 当系统进入稳定状态时, 丢弃阈值将会依据丢弃行为不断调整, 达到动态平衡.

丢弃阈值  $TH$  的调整速度是由设定的控制参数  $kh, kl, th, tl$  决定的. 随着  $kh$  和  $kl$  的增大, 阈值的调整速度会越来越慢, 当增大到一定程度时, 将不再出现丢弃阈值的变化, 这时 DPBS 方案退化成 SPBS 方案, 因此可以说, SPBS 方案是 DPBS 方案的一个特殊情形. 第 3 节将详细讨论相对丢失率性能和设定的系统控制参数之间的数学关系.

#### 2.2 多优先级方案

假定现有  $D$  个丢弃优先级, 类似于嵌套多优先级的 SPBS 方案, 需要设定  $D$  个相应的丢弃阈值  $TH_d (1 \leq d \leq D)$ , 并同样满足关系  $0 < TH_1 < \dots < TH_{D-1} < TH_D = N$  (见图 2).

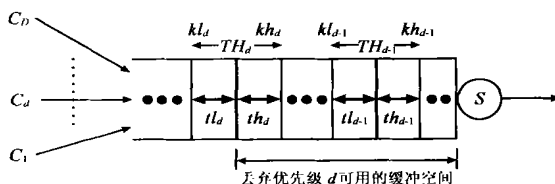


图 2 多优先级 DPBS 方案队列模型

在多优先级 DPBS 方案中, 每个丢弃阈值  $TH_d (1 \leq d \leq D - 1)$  介于两个优先级  $C_d$  和  $C_{d+1}$  之间, 相应和两个丢弃计数  $L_d$  和  $L_{d+1}$  相关联. 类似于两个优先级时的情况,  $L_d$  的增大将推动  $TH_d$  向增大的方向移动, 而  $L_{d+1}$  的增大将推动  $TH_d$  向减小的方向移动. 位于两端的最低优先级  $C_1$  和最高优先级  $C_D$ , 分别只受阈值  $TH_D$  和  $TH_{D-1}$  的影响, 分组丢弃的积累也分别只影响这两个阈值. 而中间的优先级  $C_d (2 \leq d \leq D - 1)$  都受两个丢弃阈值  $TH_{d-1}$  和  $TH_d$  的影响,  $TH_d$  决定了其可用的队列缓冲空间大小, 而  $TH_{d-1}$  为其与更低优先级分组共享的缓冲空间; 相应每个优先级的丢弃计数  $L_d$  也对两个丢弃阈值  $TH_{d-1}$  和  $TH_d$  产生影响, 并和两组控制参数  $(kh_{d-1}, th_{d-1})$  和  $(kl_d, tl_d)$  相关联.  $L_d$  每增大  $kh_{d-1}$  将推动  $TH_{d-1}$  减小  $th_{d-1}$ , 同时每增大  $kl_d$  将推动  $TH_d$  增大  $tl_d$ .

这样, 当优先级  $C_d$  的分组丢弃过多的时候, 控制方案将减小  $TH_{d-1}$ , 并同时增大  $TH_d$ . 这样一方面增大其可用的缓冲空间, 一方面压缩更低优先级的可用空间, 来减小该优先级的丢失率, 保持相对丢失率性能的稳定.

### 3 性能分析

前面已经提到,在 DPBS 方案中,由于丢弃阈值是在系统运行过程中动态调整的,其初始值设定不影响算法的稳态性能,这也是 DPBS 方案的一个重要优点.在这里,我们主要关注的是相对公平性,即为不同优先级分组的相对丢失率,而不是绝对意义上的丢失率.

下面以图 1 中两优先级 DPBS 方案为例进行分析.易见,低优先级分组的丢弃逐渐积累,将推动丢弃阈值  $TH$  向左移动(增大方向),且移动的平均速率为

$$v_{inc} = P_{1-1}(tl/kl) \tag{1}$$

其中,  $P_1$  为低优先级分组丢失率,  $v_1$  为低优先级分组的平均到达速率.类似,高优先级分组的丢弃将推动丢弃阈值  $TH$  向右移动(减小方向),其平均速率为

$$v_{dec} = P_{2-2}(th/kh) \tag{2}$$

其中,  $P_2$  为高优先级的分组丢失率,  $v_2$  为高优先级分组的平均到达速率.通常情况下,到达稳态时丢弃阈值不会停留在队列的两端(即  $TH=0, TH=N$ ).这样,阈值的增大、减小变化必然满足动态平衡的条件,即有:

$$v_{inc} = v_{dec} = P_{1-1}(tl/kl) = P_{2-2}(th/kh) \tag{3}$$

考虑极限情况,当  $TH=N$  时,低优先级分组的可用缓冲空间是整个队列空间,和高优先级分组享有相同的服务等级,这时  $P_2/P_1$  取最大值 1;而当  $TH=0$  的时候,所有到达的低优先级分组都将被丢弃,丢失率  $P_1$  为 1,这时  $P_2/P_1$  取最小值  $P_2$ .这样式(3)又可写成:

$$P_2 < P_2/P_1 = \frac{kh \times v_1 \times tl}{kl \times v_2 \times th} < 1 \tag{4}$$

上式中  $v_i (i=1,2)$  是到达数据流的特性,和控制算法本身没有关系,因此在已知到达数据流特性的情况下,可以通过四个控制参数的选取,来获得期望的相对丢失率  $P_2/P_1$ .需要注意的是,两个优先级分组的整体丢失率受到队列容量和其他条件的影响,如果设定的相对丢失率期望值太低,即使低优先级分组全部丢失也无法满足要求,这时阈值  $TH$  将近似稳定在队列右端 ( $TH=N$ ).这将导致算法的调整机制失效,并非我们的设计初衷,应当在具体实现中避免出现.

对于多优先级的 DPBS 方案,也有类似的结果,优先级  $C_{d+1}, C_d$  的分组丢失率满足如下关系:

$$P_{d+1} < P_{d+1}/P_d = \frac{kh_d \times v_d \times tl_d}{kl_d \times v_{d+1} \times th_d} < 1 \tag{5}$$

在 DPBS 方案中,所有不同优先级的分组共享同一个队列空间,相互竞争缓冲资源.分组丢弃行为导致的阈值调整形成一个负反馈作用.在网络流量变化的情况下,会推动丢弃阈值不断调整,达到自适应的效果.因此可以获得较小的丢失率抖动,并且相对丢失率性能也能够保持比较稳定.第 4 节中给出的模拟数据将更清楚的体现 DPBS 方案的这些优点.

负反馈机制对方案性能有着相当大的影响.如果调整速度太快,丢弃阈值将频繁变化甚至可能产生振荡,虽然相对丢失率性能会更趋于稳定,但这是以牺牲绝对分组丢失率为代价的,而如果负反馈的速度太慢,相对丢失率的稳定性将会下

降,以至退化为 SPBS 方案,失去对流量变化的适应性.负反馈机制的速度决定于控制参数的设定,  $kl_d$  和  $kh_d$  越小,负反馈的速度越大;  $tl_d$  和  $th_d$  越大,负反馈的速度越大.

### 4 模拟结果及分析

由于队列模型直接求解的复杂度太大,这里主要采用计算机模拟的方法来进行分析,比较 DPBS 和 SPBS 方案性能上的差异,这里主要关注的性能参数是相对丢失率及其抖动.模拟中采用两种数据源模型:负指数分布的 ON/OFF 模型和 Pareto 分布的 ON/OFF 模型(具有渐近自相似特性)<sup>[12]</sup>.模拟中采用的公共参数说明如下:

数据源的峰值发送速率为  $C=100\text{Mbps}$ ,系统信元长度为  $S=64\text{Bytes}$ ,采用服务时间确定分布的服务器模型,以信元为服务单元,单个信元的服务时间为  $t=S/v$ ,其中  $v$  为服务器的峰值服务速率.

模拟过程中一共产生  $8E+7$  个分组,平均选取 20 个采样点,每个采样区间内模拟分组个数为  $4E+6$ .

#### 4.1 负指数分布数据流模型下的性能比较

模拟参数设置如下:低优先级数据源  $p_{on}=150\mu\text{s}$ ,  $p_{off}=120\mu\text{s}$ ;高优先级数据源  $p_{on}=150\mu\text{s}$ ,  $p_{off}=390\mu\text{s}$ ;队列容量  $N=400$ ,队列服务峰值速率  $v=100\text{Mbps}$ .控制参数  $kh=8$ ,  $kl=4000$ ,  $th=tl=1$ ,相对丢失率的期望值为  $r=4E-3$ .

在没有获得最优化阈值的情况下,选择初始阈值  $TH=350$ ,两种方案的模拟性能如图 3 所示.SPBS 方案无法保证得到预期的相对丢失率,而且相对于 DPBS 方案,其相对丢失率的抖动也相当大.而此时,DPBS 方案可以保持稳定的相对丢失率,并和期望值相吻合,验证了 DPBS 方案中初始阈值设定不影响算法稳态性能的结论.

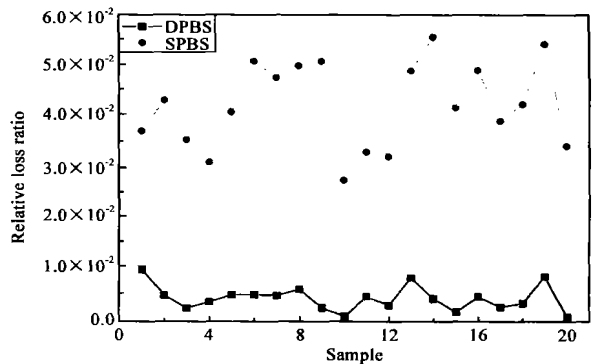


图 3 非优化阈值相对丢失率变化曲线

通过对 DPBS 方案模拟结果的分析,可以获得最优化阈值  $TH=304$ .图 4 给出了这一情况下的相对丢失率变化曲线.

阈值参数的优化设定一直以来就是 SPBS 方案面临的一个重大问题,而 DPBS 方案的稳态性能和初始阈值参数无关,可以针对网络流量的变化做自适应调整,很好的解决了阈值参数设定的问题.两种方案的平均丢失率性能非常接近,而 DPBS 方案的适应性更强,同时能够获得稳定的相对丢失率和较低的丢失率抖动.

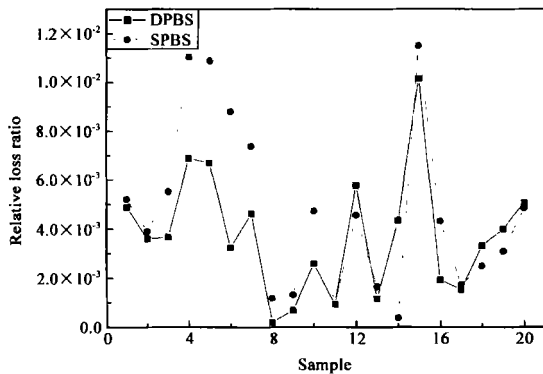


图 4 负指数数据流,最优化阈值下相对丢失率变化曲线

#### 4.2 Pareto 分布数据流模型下的性能比较

模拟参数设置如下:低优先级数据源  $p_{on} = 100\mu s$ ,  $p_{off} = 80\mu s$ ;高优先级数据源  $p_{on} = 100\mu s$ ,  $p_{off} = 260\mu s$ ;  $\rho = 1.5$ , Hurst 参数  $H = 0.75$ ;队列容量  $N = 1600$ ,队列服务峰值速率  $v = 120\text{Mbps}$ ;控制参数  $kh = 50$ ,  $kl = 2500$ ,  $th = tl = 1$ ;相对丢失率的期望值为  $r = 4E - 2$ .

由于 Pareto 分布的强突发性,DPBS 方案中阈值的调整速度远远大于负指数分布情况下,难以获得优化阈值参数,下面在  $TH = 400$  和  $TH = 50$  两组初始阈值条件下比较两种方案的丢失率性能,如图 5,图 6 所示.

在这两组不同初始阈值情况下,DPBS 方案都能获得较为稳定的相对丢失率,且和期望值吻合程度也较好;而 SPBS 方案仅在  $TH = 50$  的情况下相对丢失率较为接近期望值.

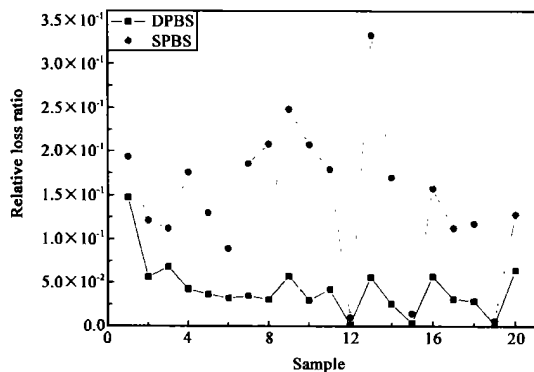


图 5 Pareto 模型,  $TH = 400$  相对丢失率变化曲线

#### 4.3 四优先级情况下的性能比较

模拟参数设置如下:最低优先级  $P1$  数据源  $p_{on} = 150\mu s$ ,  $p_{off} = 120\mu s$ ;优先级  $P2$  数据源  $p_{on} = 150\mu s$ ,  $p_{off} = 390\mu s$ ;优先级  $P3$  数据源  $p_{on} = 150\mu s$ ,  $p_{off} = 390\mu s$ ;最高优先级  $P4$  数据源  $p_{on} = 150\mu s$ ,  $p_{off} = 930\mu s$ ;队列容量  $N = 800$ ,队列服务峰值速率  $v = 150\text{Mbps}$ ;控制参数  $th(1) = tl(1) = th(2) = tl(2) = th(3) = tl(3) = 1$ ,  $kh(1) = 50$ ,  $kl(1) = 500$ ,  $kh(2) = 5$ ,  $kl(2) = 50$ ,  $kh(3) = 1$ ,  $kl(3) = 5$ ;所有相邻优先级间的相对丢失率期望值为  $r = 2E - 1$ .

根据 DPBS 方案模拟结果确定最优化阈值为  $TH(1) = 728$ ,  $TH(2) = 768$ ,  $TH(3) = 787$ .

图 7 给出的  $P4/P3$  相对丢失率变化曲线显示出,DPBS

方案的相对丢失率变化更加平稳,而两者的绝对丢失率性能差别不大.这样的结果是在最优化阈值的前提下得到的,然而在大多数情况下无法获得最优化阈值,SPBS 方案的性能会有很大衰减,而 DPBS 依然能够保持稳定的性能.

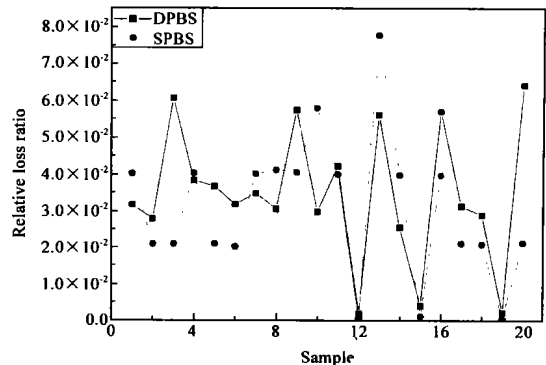


图 6 Pareto 模型,  $TH = 50$  相对丢失率变化曲线

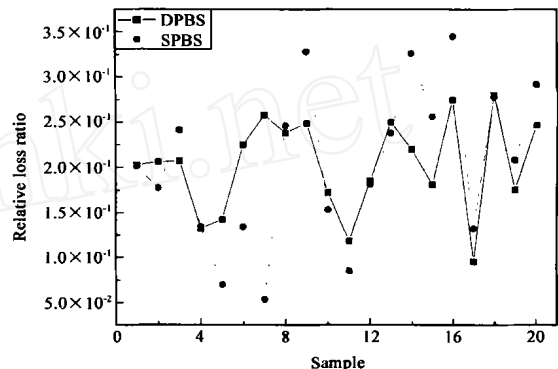


图 7 四优先级情况下  $P4/P3$  相对丢失率变化曲线

#### 4.4 控制参数变化对 DPBS 方案性能的影响

这组模拟旨在分析两优先级 DPBS 方案中四个控制参数  $kh, kl, th, tl$  对系统性能的影响.前面的分析已经指出,这四个控制参数决定了系统内部负反馈机制的速度和稳定性,设置不当会导致方案性能的下降.其中,  $th$  和  $tl$  为阈值移动的步长,可以通过调整  $kh$  和  $kl$  的数值来将其转化为 1,其性能差异可以忽略;而  $kl = r * kh$ ,  $r$  为相对丢失率的期望值.因此  $kh$  的值成为影响系统性能的关键.现调整  $kh$  的数值并观察丢失率性能变化如下,模拟过程中初始阈值为  $TH = 300$ ,其余参数和 4.1 中设定完全相同:

表 1 不同控制参数情况下的 DPBS 性能结果

$kh$	$P2/(E - 04)$	$P2/P1(E - 3)$	$P2/P1(E - 3)$
20	1.09207	3.78534	2.41034
30	1.08540	3.76503	2.52575
40	1.08083	3.74818	2.61545
50	1.07769	3.73360	2.62572

从表 1 的数据中可以看出,控制参数的变化对 DPBS 方案的性能有着一定的影响.  $kh$  值较小时,随着  $kh$  的增大,  $P2/P1$  相对丢失率的抖动随之增大,而同时两个优先级分组的绝

对丢失率都在下降.这是由于系统中负反馈的速度逐渐变慢,阈值变化也逐渐变慢造成的.而随着  $kh$  值继续增大,  $P_2/P_1$  相对丢失率逐渐偏离期望值,抖动也越来越剧烈;而绝对丢失率逐渐平稳且略有回升.因此,  $kh$  参数的设定宜根据需要,在相对丢失率和绝对丢失率性能之间取一个合适的折衷.

## 5 总结

本文提出的 DPBS 方案解决了 SPBS 方案长期以来初始阈值设定的难题,其长期运行结果不受初始阈值的影响,可以通过动态阈值调整来适应网络流量的变化.同时,其控制参数和性能之间有着简单的数学关系,可以针对性能要求确定合适的控制参数.

模拟数据表明,DPBS 方案能够保证相对丢失率基本稳定在期望值附近,而 SPBS 方案无法保证这一点.同时由于负反馈机制的作用,DPBS 方案的分组丢失率抖动也优于 SPBS 方案.在相同的流量环境下,DPBS 方案的绝对分组丢失率性能和 SPBS 方案非常接近.如何更好的调整阈值参数来适应网络流量的模式,进一步提高资源利用率和绝对丢失率性能,将是我们下一步深入研究的课题.

## 参考文献:

- [ 1 ] H Kröner, G Hebuterne, P Boyer, A Gravey. Priority management in ATM switching nodes [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1991, 9(3): 418 - 427.
- [ 2 ] Jeffery W Causey, Hyong S Kim. Comparison of buffer allocation schemes in ATM switches: complete sharing, partial sharing, and dedicated allocation [A]. International Conference on Communications [C]. New Orleans, LA, USA, 1994. 2: 1164 - 1168.
- [ 3 ] Chung G Kang, Harry H Tan. Queuing analysis of explicit priority assignment partial buffer sharing schemes for ATM networks [A]. IEEE INFOCOM [C]. San Francisco, CA, USA, 1993. 2: 810 - 819.
- [ 4 ] Chung G Kang, Harry H Tan. Queuing analysis of explicit priority assignment push-out buffer sharing schemes for ATM networks [A]. IEEE INFOCOM [C]. Toronto, Canada, 1994. 2: 500 - 509.
- [ 5 ] D Mitra, I Ziedins. Virtual partitioning by dynamic priorities: fair and efficient resource-sharing by several services [A]. International Zurich Seminar on Digital Communications [C]. Zurich, Switzerland, 1996. 1044. 173 - 185.
- [ 6 ] Santosh Krishnan, Abhijit K Choudhury, Fabio M Chiussi. Dynamic partitioning: A mechanism for shared memory management [A]. IEEE INFOCOM [C]. New York, NY, USA, 1999. 1: 144 - 152.
- [ 7 ] Abhijit K Choudhury, Ellen L Hahne. Dynamic queue length thresholds for shared-memory packet switches [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1998, 6(2): 130 - 140.
- [ 8 ] Ellen L Hahne, Abhijit K Choudhury. Dynamic queue length thresholds for multiple loss priorities [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(3): 368 - 380.
- [ 9 ] David W Petr, Victor S Frost. Nested threshold cell discarding for ATM overload control: optimization under cell loss constraints [A]. IEEE INFOCOM [C]. Bal Harbor, Florida, 1991. 3: 1403 - 1412.
- [ 10 ] Ho Woo Lee, Boo Yong Ahn. Queuing model for optimal control of partial buffer sharing in ATM [J]. Computers & Operations Research, 1998, 25(2): 113 - 126.
- [ 11 ] Giuseppe Ascia, Vincenzo Catania, Daniela Panno. An efficient buffer management policy based on an integrated fuzzy-ga approach [A]. IEEE INFOCOM [C]. New York, NY, USA, 2002. 2: 1042 - 1048.
- [ 12 ] James Gordon. Pareto process as a model of self-similar packet traffic [A]. IEEE Global Telecommunications Conference [C]. Singapore, 1995. 3: 2232 - 2236.

## 作者简介:



李寅男, 1979年10月出生于江西省, 清华大学计算机系2001级硕士研究生, 主要研究领域为计算机网络, 队列管理算法, 网络处理器技术等.



林闾男, 1948年7月生于辽宁省, 清华大学计算机系教授, 博士生导师, 计算机网络研究所所长, 国家自然科学基金重大研究计划“网络和信息安全”的科学指导专家, 中科院网络中心和北京科技大学兼职教授. 主要研究领域为计算机网络, 系统性能评价, 随机 Petri 网, 逻辑推演和推理系统. 曾在美国 Purdue 大学、美国 Texas 大学奥斯汀分校、香港科技大学、香港浸会大学和美国 Florida 大学长期做研究工作, 已主持国家重点基础研究发展规划(973)、国家高技术研究发展计划(863)、国家自然科学基金、国家科技攻关和国际科研项目等10多项课题的研究, 并多次获奖. 已在 IEEE Transactions on Computers, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, ACM Journal of Wireless Networks, International Journal of Intelligent Systems, IEICE Transactions on Fundamentals, Computer Networks Journal, 计算机学报, 软件学报、电子学报、通信学报等国内外一级期刊上和 IEEE Computer Society 的学术年会上发表论文90余篇, 在国内出版专著2本.