

分组丢弃算法性能仿真研究¹

景志钢 李乐民 孙海荣

(电子科技大学光纤通信国家重点实验室 成都 610054)

摘 要 该文研究了在固定有效带宽、时变有效带宽情况下和不同种业务环境下, EPD (EarlyPacket Discard) 和 PPD(Partial Packet Discard) 算法的通过率和公平性, 认为采用 EPD 算法的 ATM 交换机, 靠近该交换机的业务源可以得到更高的通过率, 而远离该交换机的业务源的通过率较低, 该文的研究进一步得到了解决这种不公平性的一种实用方案。

关键词 ATM 网, 分组丢弃算法, Pareto 分布, ON-OFF 源
中图分类号 TN919.1

1 引 言

异步转移模式 (ATM) 虽然能够按需提供带宽和满足不同服务质量要求, 并将成为未来宽带综合业务数字网 (B-ISDN) 的解决方案。但目前, 越来越需要利用 ATM 网连接已有的数据通信网络, 如 SMDS, CBDS, LAN 仿真, IP over ATM 等, 并支持存在的应用, 如 FTP, 电子邮件, WEB 浏览。这些应用运行在 TCP/IP 平台上, 这就要求 ATM 网能支持 TCP/IP 协议^[1,2]。

当在 ATM 网络上运行 TCP/IP 协议, TCP/IP 分组会被分割成固定长度的 ATM 信元。ATM 网按 ATM 信元为传输单位依次向下一级 ATM 交换机传输。如果 ATM 网采用 AAL5(ATM Adaptation Layer 5) 来适配 TCP/IP 分组, AAL5 可以仅通过 ATM 层的 PT(Payload Type) 位就可以标识出分组的起始、中间和结束。当 ATM 交换机因为缓存不足而丢弃信元时, 属于同一分组的未被丢弃的其它信元仍会被传输到目的端。当这些信元到达目的端, 由于该分组中有丢失的信元, 这些信元不能被打包, 而 TCP 协议会要求信源重传该分组。因此, 一个或几个信元的丢失被放大到了整个分组的丢失, 造成网络资源的浪费。这一现象被 Romanow 和 Floyd 发现, 他们提出了 EPD(Early Packet Discard) 和 PPD(Partial Packet Discard) 算法来提高 TCP 分组的通过率^[3]。当一分组中某一信元被丢弃后, PPD 算法会丢弃该分组中后面的所有信元, 但是已被破坏的部分分组仍会被传递到目的端。EPD 算法改进了 PPD 算法, 当交换机的缓存中信元的排队长度达到某一门限后, 新到达的整个分组会被全部丢弃。如果令门限等于缓存的长度, EPD 算法变为 PPD 算法。

在文献 [3] 中, 利用了离散事件仿真研究了在 ATM 网上运行 TCP 协议时, EPD 和 PPD 算法带来的性能改善。如果 EPD 算法不加区别地丢弃分组, 会造成严重的不公平。文献 [4] 提出了 Per-VC 排队的技术来处理这种不公平性, 但是需要复杂的缓存管理算法, 实现成本较高。

文献 [5] 研究同种的业务环境下的性能, 每个信源按间断 Bernoulli(IBP) 过程产生信元, 在 ON 持续期产生的信元构成一分组, 且 ON(OFF) 持续期间服从指数分布。通过其研究指出: 当分组长度较短时, PPD 的性能优于 EPD; 当分组长度较长, 具有优化门限值的 EPD 算法优于 PPD 算法。文献 [6] 分析 EPD 时引入了 ARQ 差错控制机制, 所有的分组到达 (包括新到达的和重传的分组) 假定为 Bernoulli 过程。文献 [7] 研究了 ABR 流控机制对 EPD 算法的影响, 数据源被假定为两态的 Markov 链, ON(OFF) 持续期服从指数分布, 经研究指出: EPD 算法的稳态性能对反馈延迟敏感。文献 [8] 中, 一路分组到达过程被考虑成 Poisson 过程, 且分析了

¹ 1999-09-29 收到, 2000-01-28 定稿

国家自然科学基金 (69882003) 和高校博士点基金 (98061409) 资助课题

持续期为指数分布的 ON-OFF 的分组到达对网络性能的影响。但只考虑了一路分组到达, 没有考虑其它业务的影响。

在不同种业务环境下 EPD 和 PPD 算法的性能如何, 以及是否存在既解决 EPD 算法的不公平性又易于实现的方案, 都是值得研究的问题。在实际网络环境中, 业务源按突发的方式产生分组, 在 ON 状态, 业务源产生信元构成分组; 在 OFF 状态没有信元产生。文献 [9] 指出: TCP/IP 分组的到达过程是一个自相似过程 (具有长期相关性), 其持续期和间隔时间的实验分布可近似为 Pareto 分布, 而指数分布的假设 (Markov 模型) 严重低估了 TCP/IP 分组的突发性。因而文献中的两态 Markov 模型 [7] 和 IBP 模型 [5] 都不能精确地反映实际网络分组的行为。当分组流进入 ATM 网络后, 由于统计复用平滑了业务的突发性, 使信元的到达过程随机化。那么, 在网络中央, 分组的到达过程可近似成为 Poisson 过程。因此, 在 ATM 网络内部的 ATM 交换机的分组输入过程, 可考虑成包括远离交换机的分组到达和靠近交换机的分组到达。

本文利用仿真技术, 较完整地分析了固定有效带宽和时变有效带宽下, 同种和异种业务环境下, EPD 和 PPD 算法的性能。本文的研究有助于理解在存在长期相关性业务 (LRD) 情况下, 分组丢弃算法的性能情况。文中第 2 节介绍所采用的分析模型。第 3 节描述分组丢弃算法。第 4 节为实验数据和结果。第 5 节给出结论。

2 分析模型

在 ATM 网络内部的 ATM 交换机的分组输入过程, 可考虑成包括远离交换机的分组到达过程 (用 Poisson 过程近似) 和靠近交换机的分组到达过程 (用持续期间服从 Pareto 分布的 ON-OFF 到达过程表示)^[10]。

2.1 Poisson 过程

我们假定信元的到达过程服从 Poisson 分布, 而分组长度 (按信元) 的分布为几何分布。信元的到达率为 λ 。一个到达的信元为分组头的概率为 q 。那么, 平均分组长度和分组到达率分别为 $1/q$ 和 λq ^[8]。

2.2 ON-OFF 到达过程

IP 分组到达过程假定为 ON-OFF 业务源, ON(OFF) 的持续时间服从 Pareto 分布。对于 Pareto 分布, 假设 ON(OFF) 的持续时间为随机变量 X_{ON} , (X_{OFF}) 则

$$f_{ON}(x_{ON}) = \beta_1 \alpha_1^{\beta_1} x_{ON}^{-\beta_1-1}, \quad \alpha_1, \beta_1 \geq 0, \quad x_{ON} \geq \alpha_1 \quad (1)$$

$$f_{OFF}(x_{OFF}) = \beta_2 \alpha_2^{\beta_2} x_{OFF}^{-\beta_2-1}, \quad \alpha_2, \beta_2 \geq 0, \quad x_{OFF} \geq \alpha_2 \quad (2)$$

其均值和方差有如下的特征:

$$E[X_{ON}] = \begin{cases} \infty, & \beta_1 \leq 1 \\ \frac{\alpha_1 \beta_1}{\beta_1 - 1}, & \beta_1 > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$E[X_{OFF}] = \begin{cases} \infty, & \beta_2 \leq 1 \\ \frac{\alpha_2 \beta_2}{\beta_2 - 1}, & \beta_2 > 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Var}[X_{ON}] = \begin{cases} \infty, & \beta_1 \leq 2 \\ \frac{\alpha_1^2 \beta_1}{(\beta_1 - 1)(\beta_1 - 2)}, & \beta_1 > 2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Var}[X_{OFF}] = \begin{cases} \infty, & \beta_2 \leq 2 \\ \frac{\alpha_2^2 \beta_2}{(\beta_2 - 1)(\beta_2 - 2)}, & \beta_2 > 2 \end{cases} \quad (6)$$

本文考察 $\beta_1 = \beta_2 = 1.25$ 的 Pareto 分布, 此时 ON(OFF) 持续时间的方差为无穷大, 这是经统计分析较符合实际情况的参数值^[9]。

对于 ON-OFF 业务源, 在 OFF 期间, 没有信元产生; 在 ON 期间, 按 Poisson 分布到达的信元构成一个分组; ON 期间信元的到达率为 δ ; 则平均分组到达率 R_P , 平均信元到达率 R_C , 平均分组长度 E_l 分别为

$$R_P = \frac{1}{E(X_{ON}) + E(X_{OFF})} \quad (7)$$

$$R_C = \frac{\delta E(X_{ON})}{E(X_{ON}) + E(X_{OFF})} \quad (8)$$

$$E_l = \frac{R_C}{R_P} = \delta E(X_{ON}) \quad (9)$$

3 分组丢弃算法的实现

假定缓存的容量为 N (信元数), EPD 算法的门限值为 K (信元数)。当一个分组到达缓存, 它会面临三种情况: 成功地被传输; 完全被丢弃(当第一个信元到达时, 缓存的排队长度已超过设定的门限); 部分被丢弃。假定在某一段时间内, 到达的分组数目为 $p_{in}(t)$, 被成功传输的分组为 $p_{out}(t)$, 被完全丢弃的分组数为 $p_{pic}(t)$, 被部分丢弃的分组数为 $p_{plp}(t)$, 那么, 我们采用的分组通过率 $G^{[8]}$ (Goodput) 定义为

$$G = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{p_{out}(t)}{p_{in}(t)} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{p_{out}(t)}{p_{pic}(t) + p_{plp}(t) + p_{out}(t)} \quad (10)$$

EPD 算法的实现步骤如下:

当一个信元到达 ATM 交换机;

if(这是该分组的第一个信元)

{

if(缓存的排队长度大于给定门限) 丢弃该信元;

else 接受该信元;

}

else

{

if(该分组中已被丢弃了的信元) 丢弃该信元;

else

{

if (缓存的排队长度等于缓存的大小) 丢弃该信元;

else 接受该信元;

}

}

4 仿真结果和分析

本节分别研究带宽固定和时变带宽下, 同种和不同业务源环境下, EPD 和 PPD 算法的性能。我们假定 $N = 100$, $\mu = 1$ (服务率)。

4.1 带宽固定下的性能比较

4.1.1 同种业务源 (Poisson)

(1) 欠载的缓存 我们分别对具有相同的平均分组到达率 (见图 1), 相同的平均信元到达率 (图略), 相同的平均分组长度 (图略) 情况下, EPD 和 PPD 算法进行了性能比较, 同时与没有分组丢弃算法的性能做了比较。通过分析可以得到以下结论: (a) 在欠载的情况下, 与没有分组丢弃算法的性能比较, EPD 和 PPD 算法的性能改善不是很显著。(b) PPD 算法性能略优于 EPD 算法, 但并不明显。(c) EPD 和 PPD 算法均可提供较公平的通过率。(d) 具有较小门限的 EPD 算法比没有分组丢弃算法的性能还要差。所以在欠载情况下, EPD 和 PPD 算法所带来的性能改善并不明显。

(2) 过载的缓存 我们分别研究了具有相同的平均分组到达率 (见图 2), 相同的平均信元到达率 (图略), 相同的平均分组长度 (图略) 情况下, EPD 和 PPD 算法的性能, 同时与没有分组丢弃算法的性能做了比较。通过分析可以得到以下结论: (a) 在过载的情况下, 与没有分组丢弃算法的性能比较, EPD 和 PPD 算法的性能改善很显著。(b) PPD 算法性能优于 EPD 算法, 但同种业务的不同业务条件下得到不同的通过率 (Goodput), PPD 显示出一定的不公平性。(c) 除了在较小的门限情况下, EPD 算法对于不同的业务条件呈现出近似相同 (相差并不明显) 的通过率, 表现出公平性 (特别是当门限设为缓存的一半时)。所以在过载情况下, EPD 和 PPD 算法所带来的性能改善明显。

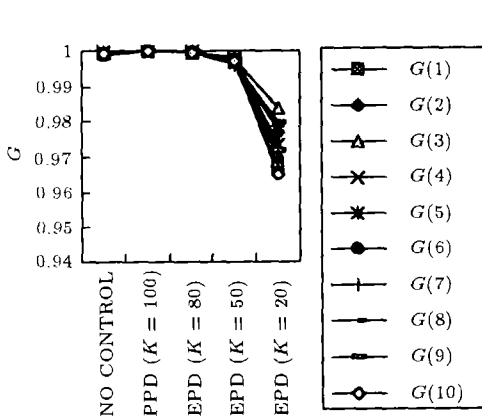


图 1 相同分组到达率的 10 路 Poisson 业务源的性能比较 (欠载) 业务参数:
 $\lambda_i = \{0.02; 0.03; 0.05; 0.06; 0.08; 0.1; 0.12; 0.15; 0.16; 0.2\}$
 $q_i = \{0.6; 0.4; 0.24; 0.2; 0.15; 0.12; 0.1; 0.08; 0.075; 0.06\}$

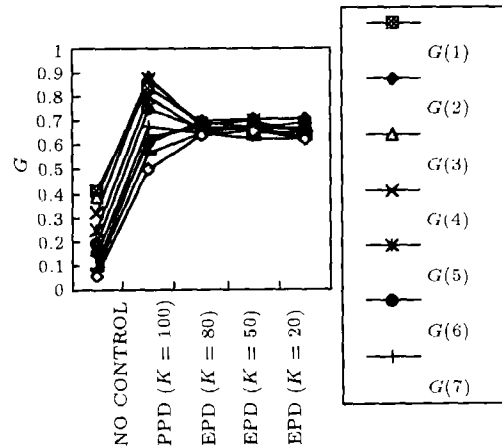


图 2 具有相同分组到达率的 10 路 Poisson 业务源的性能比较 (过载) 业务参数:
 $\lambda_i = \{0.25; 0.3; 0.05; 0.06; 0.08; 0.1; 0.12; 0.15; 0.16; 0.2\}$
 $q_i = \{0.048; 0.04; 0.24; 0.2; 0.15; 0.12; 0.1; 0.08; 0.075; 0.06\}$

4.1.2 不同种业务环境 在这一节, 我们比较不同种业务环境下的性能。一种业务是 Poisson 过程, 另一种业务为持续期间服从 Pareto 分布的 ON-OFF 过程。我们考虑两种情况: 在第一种情况下, Poisson 过程与服从 Pareto 分布的 ON-OFF 过程具有相同的平均分组到达率 $R_P = 0.005$, 平均信元到达率为 $R_C = 0.5$, 平均分组长度为 $E_l = 100$ 。在第二种情况下, Poisson 过程与 Pateto 分布的 ON-OFF 过程也具有相同的平均分组到达率 $R_P = 0.05$, 平均信元到达率为 $R_C = 0.5$, 平均分组长度为 $E_l = 10$ (见图 3, 图 4)。

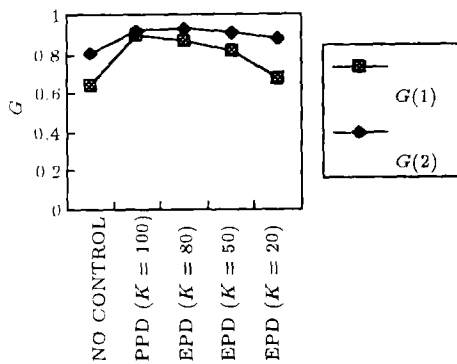


图3 具有相同分组到达率, 信元到达率, 分组长度的 Poisson 业务源和 ON-OFF 业务源的性能比较 (第一种情况) 业务参数:
 $\alpha_1 = 20; \beta_1 = 1.25; \alpha_2 = 20; \beta_2 = 1.26;$
 $\delta = 1.0; \lambda = 0.5; q = 0.01$
 $G(1)$ 表示 Poisson 到达过程,
 $G(2)$ 表示 ON-OFF 到达过程

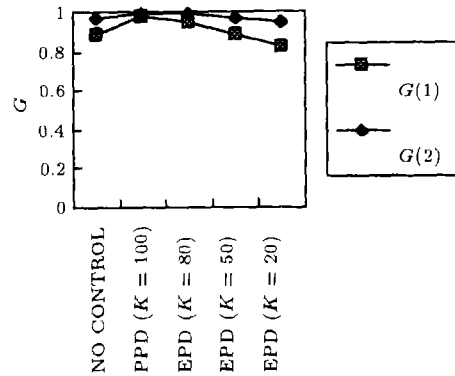


图4 具有相同分组到达率, 信元到达率, 分组长度的 Poisson 业务源和 ON-OFF 业务源的性能比较 (第二种情况) 业务参数:
 $\alpha_1 = 2; \beta_1 = 1.25; \alpha_2 = 2; \beta_2 = 1.26;$
 $\delta = 1.0; \lambda = 0.5; q = 0.1$
 $G(1)$ 表示 Poisson 到达过程,
 $G(2)$ 表示 ON-OFF 到达过程

通过分析可以得到以下结论: (a) 与没有分组丢弃算法相比, EPD 和 PPD 算法都明显地提高了通过率 (尤其是存在 ON-OFF 源时更为明显)。 (b) ON-OFF 源比 Poisson 过程具有更高的通过率, 平均分组长度越长越明显 (见第一种情况)。 (c) 在不同种的业务环境下, EPD 和 PPD 呈现出明显的不公平性, 因为信源的突发性会被 ATM 交换机的统计复用减缓, 所以 Poisson 到达过程可以看成是远离该 ATM 交换机的业务源, 而 ON-OFF 源可以看成是刚进入网络的业务源。那么, 在采用 EPD 算法的 ATM 交换机, 靠近该交换机的业务源可以得到更高的通过率, 而远离该交换机的业务源的通过率较低。

所以, 在不同种的业务环境下, EPD 和 PPD 算法均显著地提高了分组通过率, 且存在 ON-OFF 业务源的情况下, 性能提高更为明显。

4.2 时变有效带宽的影响

EPD 和 PPD 算法主要用以提高 IP 分组的通过率, 因为 ATM 交换机支持综合业务, 所以网络中存在实时的高优先级的 CBR 和 VBR 业务。由于存在高优先级的业务, IP 分组的有效带宽是时变的, 并受高优先级业务的带宽占用率所控制^[11]。我们假定 IP 分组的有效带宽表示为一 ON-OFF 模型, 我们考虑两种情况下的 ON(OFF) 的持续期间分布。

4.2.1 服从指数分布的 ON(OFF) 持续期间 在 ON(OFF) 的持续时间服从指数分布时, ON 的持续时间服从均值为 $1/\lambda_0$ 的指数分布; OFF 的持续时间服从均值为 $1/\lambda_1$ 的指数分布。在 ON 持续期, IP 分组的有效带宽为 r_0 ; 在 OFF 持续期, IP 分组的有效带宽为 r_1 (参数见图 5)。

4.2.2 服从 Pareto 分布的 ON(OFF) 持续期间 在 ON-OFF 的持续期间服从 Pareto 分布时, ON 的持续期参数为: α_{ON}, β_{ON} ; OFF 的持续期参数为: $\alpha_{OFF}, \beta_{OFF}$ 。在 ON 持续期, IP 分组的有效带宽为 r_0 ; 在 OFF 持续期, IP 分组的有效带宽为 r_1 (参数见图 6)。

4.2.3 实验和分析 虽然, ON-OFF 模型只是对实际情况的近似, 但已足以说明时变带宽对 EPD 算法的影响。为了方便比较时变带宽对 EPD 和 PPD 算法性能的影响, 图 7 列出了固定带宽下, 5 路 Poisson 过程的 EPD 和 PPD 算法下的性能, 图 5、图 6 分别研究了持续期服从指数和 Pareto 分布的有效带宽下, EPD 和 PPD 算法的性能。在图 8 中, 我们进一步研究了 5 路 Poisson 过程和 1 路持续期间服从 Pareto 分布 ON-OFF 信源, 在持续期间服从 Pareto 分布的时变有效带宽下, EPD 和 PPD 算法的性能。通过分析可以得到以下结论: (a) 在时变的带宽下, 与没有分组丢弃算法相比, EPD 和 PPD 算法对分组通过率的改善明显。 (b) 在时

变带宽下，对于不同种业务源，EPD 和 PPD 算法呈现出不公平性，即持续期间服从 Pareto 分布的 ON-OFF 业务比 Poisson 过程获得更高的通过率（见图 5，图 6，图 8）。(c) 在时变的带宽下，EPD 算法对 Poisson 过程可提供近似公平的通过率（如果门限不设得过低）。即使在有效带宽的持续期间服从 Pareto 分布的情况下，EPD 算法对于 Poisson 过程也能呈现出较好的公平性（见图 6、图 8）。

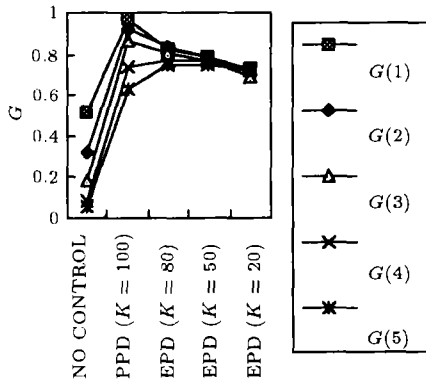


图 5 5 路 Poisson 过程性能比较
(持续期间服从指数分布的时变带宽)
ON-OFF 有效带宽的参数:

$$\lambda_0 = 0.25; \lambda_1 = 0.05; r_0 = 0.9; r_1 = 0.3$$

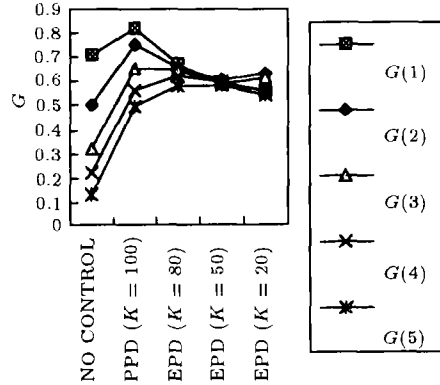


图 6 5 路 Poisson 过程性能比较
(持续期间服从 Pareto 分布的时变带宽)
有效带宽 (ON-OFF 模型) 的参数:

$$\alpha_{ON} = 2; \beta_{ON} = 1.25; \alpha_{OFF} = 2; \beta_{OFF} = 1.25; \delta = 1.0; r_0 = 0.9; r_1 = 0.3$$

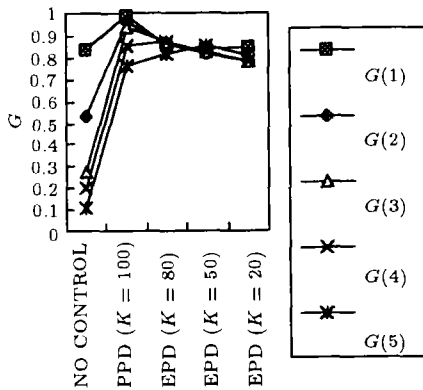


图 7 5 路 Poisson 过程性能比较
(固定带宽)5 路 Poisson 业务的参数:

$$\lambda_i = \{0.1; 0.15; 0.2; 0.3; 0.4\}$$

$$q_i = \{0.06; 0.04; 0.03; 0.02; 0.015\}$$

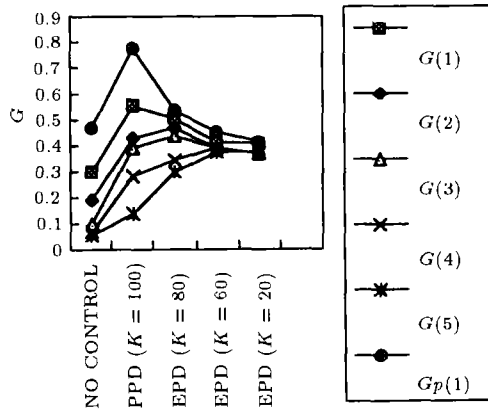


图 8 5 路 Poisson 过程和 1 路持续期间服从 Pareto 分布的 ON-OFF 过程性能比较
(持续期间服从 Pareto 分布时变带宽)

(ON-OFF 过程的 Pareto 分布参数: $\alpha_1 = 2; \beta_1 = 1.25; \alpha_2 = 2; \beta_2 = 1.25; \delta = 0.8$)
 $G_p(1)$ 表示 ON-OFF 到达过程的分组通过率

5 结 论

本文首先建立分析模型,利用仿真的手段,研究了在不同的业务条件下,EPD和PPD算法的性能。其中,业务源包括Poisson到达过程,和分组到达间隔时间和分组长度服从重尾巴分布(Pareto分布)的到达过程。我们也研究了EPD算法和PPD算法的公平性。通过研究我们发现:

在欠载且只存在Poisson业务的情况下,EPD和PPD算法所带来的性能改善不明显。在过载且存在ON-OFF业务的情况下,EPD和PPD算法所带来的性能改善明显。在只存在Poisson业务的情况下,EPD算法能提供较公平的通过率,PPD算法的公平性稍差。ON-OFF源可获得比Poisson过程更高的通过率。

因为信源的突发性会被ATM交换机的统计复用减弱,所以Poisson到达过程可以看成是远离该ATM交换机的业务源,而ON-OFF信源可以看成是刚进入网络的业务源。那么,在采用EPD算法的ATM交换机,靠近该交换机的业务源可以得到更高的通过率。而远离该交换机的业务源的通过率相对较低。虽然基于Per-VC的算法可以解决EPD的不公平性,但过于复杂。因为位于中央的ATM交换机,其输入过程由于经过了若干级的统计复用,可以近似为Poisson过程,由我们的研究表明,对于Poisson业务,EPD算法可以提供较公平的通过率。所以,我们得到的一个重要结论是:基于Per-VC的算法可用在ATM网络的边缘ATM交换机,而不必用于中央的ATM交换机。这样的配置,可以让中央的ATM交换机工作于较高的速率。

参 考 文 献

- [1] Sun Hairong(孙海荣), *et al.*, Supporting IP on the ATM networks, an overview, *Computer Communications*, 1998, 21(11), 1020-1029.
- [2] 景志钢, 李乐民, 孙海荣, 在基于MPLS的ATM交换机上RIO算法实现的研究, *电子科学学报*, 2000, 22(6), 881-889.
- [3] A. Romanow, S. Floyd, Dynamics of TCP Traffic over ATM Networks, *IEEE J. on SAC*, 1995, 13(4), 633-641.
- [4] H. Y. Li, K. Y. Siu, H. Y. Tzeng, C. Ikeda, H. Szuki, On TCP performance in ATM networks with per-VC early packet discard mechanism, *Computer Communications*, 1996, 19(13), 1065-1076.
- [5] K. Kawahara, K. Kitajima, T. Takine, Y. Oie, Packet loss performance of selective cell discard schemes in ATM switches, *IEEE J. on SAC*, 1997, 15(5), 903-912.
- [6] N. Tsukutani, K. Kawahara, T. Takine, H. Sunahara, Y. Oie, Throughput analysis of selective cell discard schemes in transport layer over ATM networks, *GLOBECOM'97*, Phoenix, Arizona, USA, Nov. 1997, 1067-1074.
- [7] Yonghwan Kim, Li San-qi, Performance analysis of feedback controlled data packet transmission over high-speed networks, *INFOCOM'98*, San Francisco, CA, USA, July, 1998, 516-524.
- [8] Y. Lapid, R. Rom, M. Sidi, Analysis of discard policies in high-speed networks, *IEEE J. on SAC*, 1998, 16(5), 764-777.
- [9] V. Paxson, S. Floyd, Wide area traffic, The failure of poisson modeling, *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1995, 3(3), 227-244.
- [10] Jing Zhigang (景志钢), Li Lemin (李乐民), Sun Hairong (孙海荣), Performance evaluation of packet discard schemes in ATM switches in heterogeneous traffic environment, in *Proc of 2nd International IEEE Conference on ATM (ICATM'99)*, Colmar, France, 21-23, 1999, 482-491.
- [11] 景志钢, 李乐民, 孙海荣, VBR背景业务下的ABR拥塞特性, *电子学报*, 1999, 27(7), 9-13.

SIMULATION STUDY OF PERFORMANCE OF PACKET DISCARD SCHEME IN ATM SWITCHES

Jing Zhigang Li Lemin Sun Hairong

(National Key Lab of Optical Fiber Communication, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract The throughput and fairness of EPD and PPD schemes are studied in the environment of heterogeneous traffic and in the environment of time-varying available bandwidth. The queuing system with EPD algorithm gives higher goodput to the sources near it, and the sources far away from the system will have lower goodput. Study of this paper further finds a practical way to solve this unfairness.

Key words ATM networks, Packet discard scheme, Pareto distribution, ON-OFF sources

景志钢: 男, 1972 年生, 博士, 目前研究兴趣为高速网网络性能分析, Internet 网 QoS 等.
李乐民: 男, 1932 年生, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 研究方向为数字信息传输与通信网.
孙海荣: 男, 1968 年生, 博士, 教授, 研究方向为宽带通信网.