

ATM 网中具有优先级管理的漏桶监管器性能分析¹

徐树公 黄载禄

(华中理工大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘要 本文利用推广的流体流方法分析了具有优先级管理的 ATM 网漏桶监管器 (PLB) 性能。这种 PLB 将部分缓冲共享 (PBS) 的选择丢弃优先级管理策略用于业务监管, 对高、低优先级信元区别对待, 从而保证高优先级信元的低丢失率。文中针对突发业务分析了此种监管方案的性能。理论计算及仿真实验结果表明了该方案的有效性。通过性能分析可望选取合适的 PLB 参数进行有效控制。

关键词 具有优先级管理的漏桶监管器, 部分缓冲共享策略, 流体流方法, ATM 网

中图分类号 TN913.24

1 前言

ATM 网主要采用预防式控制避免网络拥塞。业务监管 (也称为用户参数控制, UPC) 是其中重要的一环。漏桶法 (leaky bucket) 作为性能较好的一种 UPC 方案, 被 ITU-T 推荐为 UPC 的实现方法之一。

由于带缓冲区的漏桶可以暂时保存违约信元, 实现信元丢弃与信元延迟的折衷^[1], 近来研究较多。本文讨论也是以这种带缓冲区的漏桶监管为基础的。为了实现多种业务综合传输并满足相差很大的不同业务要求, ATM 网中引入了优先级管理。选择丢弃是 ATM 网中缓冲区优先级管理策略, 部分缓冲共享 (Partial Buffer Sharing, PBS) 的选择丢弃策略性能较好^[2]。有关漏桶监管的理论分析不少, 但迄今为止未见将之与优先级管理相结合的。实际上, 这种理论分析相当困难。文献 [2] 中的分析假设输入为泊松到达, 是与实际不很相符的。

本文将此优先级管理策略应用到漏桶监管之中, 称之为具有优先级管理的 ATM 网漏桶监管器 (Priority Leaky Bucket, PLB)。然后利用文献 [3, 4] 发展的推广的流体流方法 (Fluid Flow Method) 加以分析。流体流方法是一种排队近似分析法。在文献 [5] 将它引入通信领域之后很快得到广泛运用。文献 [3] 对流体流方法进行了成功推广, 发展了一套可分析多门限排队 (如 ATM 网 PBS 选择丢弃) 策略的流体流法。就理论分析而言, 本文的讨论涵盖了文献 [6], 该文的模型只是本文模型的一个特例。

2 业务模型及 PLB 策略模型

2.1 业务模型

本文采用与文献 [6, 7] 相同的突发业务模型作为系统的输入。为论述完整起见, 这里给出其简要描述。

¹ 1995-10-11 收到, 1997-03-25 定稿

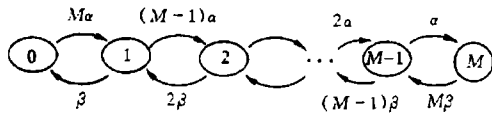


图 1 突发业务的状态转移示意图

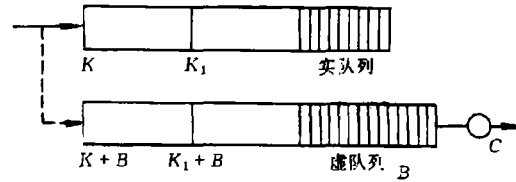


图 2 具有优先级管理的漏桶模型

图 1 是突发业务的状态转移图。这种突发业务实际上是 M 个独立同分布的 ON-OFF 信源的复合。图中状态 $i(0 \leq i \leq M)$ 表示有 i 个 ON-OFF 信源处于 ON 态，对应信源的速率为 iV ， V 为单个信源 ON 期速率。处于 ON 状态的 ON-OFF 信源数的稳态分布为

$$\pi_i = \binom{M}{i} P^i (1-P)^{M-i}, \quad i = 0, 1, \dots, M,$$

其中 $P = \alpha / (\alpha + \beta)$ 。

本文即针对此复合业务模型展开讨论。需要说明，本文的分析可以推广到马尔柯夫调制的确定速率过程 (Markov Modulated Determined Rate Process, MMDP) 信源中去，有关分析可参照文献 [3, 4]。为与文献 [6] 对照起见，采用上述突发业务模型。

2.2 具有优先级管理的漏桶 (PLB) 模型

ATM 网中的部分缓冲共享选择丢弃策略可以模型化为一个具有门限 K_1 的 K 容量 FIFO 排队，($0 \leq K_1 \leq K$)，排队为定常服务。所谓部分缓冲共享即当排队长度小于 K_1 时，高低优先级信元均可进入排队系统，共享此部分缓冲区；当排队长度超过 K_1 时，到达的低优先级信元被丢弃，高优先级信元继续进入排队；只有排队缓冲区全部占满，即排队长度为 K 时，高优先级信元才被丢弃。将排队长度超过 K_1 时，低优先级信元被丢弃看成实际输入速率的下降。当高优先级信元速率是总速率的 η 倍 ($\eta < 1$) 时，则发生选择丢弃相当于实际输入速率下降为原来的 η 倍。如可将 η 取为 0.5^[7]。

有关漏桶监管法的描述可参见文献 [1-3, 6]，不再赘述。漏桶可用虚排队模型表示^[1,6]。此时将漏桶容量 $B(B \geq 0)$ 考虑到一个虚排队中。结合上述部分缓冲共享优先级管理策略模型，可将整个系统，即具有优先级管理的漏桶 (PLB) 表示为图 2。

虚队列服务速率 (令牌生成速率) 为 C ，当实队列长度 $q_r(t) \geq 0$ 时，虚队列长度 $q_f(t) \geq B$ 。并有下式成立：

$$P\{q_r \leq x\} = P\{q_f \leq B + x\}. \quad (1)$$

于是我们可以通过分析虚队列的队长分布求出实队列的队长分布，进而求取信元的丢失率 (高、低优先级信元的丢失率不同)，平均排队长及平均时延等重要参数。通过性能分析可望选取合适的 PLB 参数进行有效控制。

3 突发业务的 PLB 分析

下面用推广的流体流方法分析具有优先级管理的漏桶 (PLB) 性能。流体流方法忽略到达过程及排队队长的离散性质，将到达及队长变化看成连续变化。文献 [1, 6, 7] 等均采用了这种分析方法。本文中用 $q(t)$ 和 $\lambda(t)$ 表示 t 时刻的队列长度及实际输入速率，则可以用二维状态

$\{q(t), \lambda(t)\}$ 表示此 PLB 排队系统的状态。但是在引入了优先级管理之后, 由于 PLB 策略排队模型的输入与排队状态有关, 对它直接分析很困难。我们将该模型分解, 用两个排队分别描述有无输入降速的状态变化。用流体流方法分别分析它们。然后通过建立它们之间的联系分析 PLB 排队模型, 这就是所谓推广的流体流方法的要点所在。注意: 我们这里及以下讨论的均是虚队列。

对于未发生选择丢弃, 即无输入降速的排队, 可令 $P_i(t, x) = \text{prob}\{q(t) \leq x, \lambda(t) = iV\}$ 且 $F_i(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t, x)$, $\vec{F}(x) = [F_0(x), F_1(x), \dots, F_M(x)]^T$, 于是下式成立:

$$D \cdot \vec{F}(x) = R \cdot \vec{F}(x), \quad (2)$$

其中 $D = \text{diag}(-C, V - C, 2V - C, \dots, MV - C)$, R 是输入业务源马氏过程转移强度矩阵的转置阵。由于我们讨论的业务模型基于生死链, 只在相邻状态之间发生状态转移, 如图 1。故这里的 R 阵具有特殊结构, 只有主对角线及其左右的元素为非零, 且 R 阵列和为零。

对于上节描述的 PLB, 当 $x \geq K_1 + B$ 时, 发生选择丢弃, 即实际输入速率下降为原来的 η 倍。这种情况下的排队, 定义

$$p'_i(t, y) = \text{prob}\{q(t) \leq x = y + K_1 + B, \lambda(t) = i\eta V\}, \quad G_i(y) = \lim_{t \rightarrow \infty} P'_i(t, y).$$

令 $\vec{G}(y) = [G_0(y), G_1(y), \dots, G_M(y)]^T$, $D' = \text{diag}(-C, \eta V - C, 2\eta V - C, \dots, \eta MV - C)$, 于是有

$$D' \cdot \vec{G}(y) = R \cdot \vec{G}(y) \quad (3)$$

注意到当对于任意 i 有 $iV \neq C$ 且 $i\eta V \neq C$ 时, D 和 D' 是非奇异阵, 它们的逆矩阵存在。假如有某个 i 使得 $iV = C$ 或 $i\eta V = C$, D 或 D' 将是非奇异阵, 此时 (2) 式或 (3) 式对应于 i 的微分方程退化为代数方程, 我们可以通过对 (2) 式或 (3) 式降阶将 D 或 D' 化为非奇异阵。下文中将不考虑这种情况。

(2) 式和 (3) 式的解可分别表示为

$$\vec{F}(x) = \sum_j k_j \cdot \vec{\Phi}_j \cdot e^{z_j x} \quad (4)$$

$$\vec{G}(x) = \sum_j k'_j \cdot \vec{\Phi}'_j \cdot e^{z'_j y} \quad (5)$$

其中 z_j 、 $\vec{\Phi}_j$ 是 $D^{-1}R$ 的特征值及相应的特征向量; z'_j 、 $\vec{\Phi}'_j$ 是 $(D')^{-1}R$ 的特征值及相应的特征向量; k_j 和 k'_j 是待定系数, 共有 $2M$ 个。

下面我们由边界条件确定 k_j 和 k'_j 。令 $\Omega_+ = \{i | iV > C\}$, $\Omega_- = \{i | iV < C\}$, 且 $\Omega'_+ = \{i | i\eta V > C\}$, $\Omega'_- = \{i | i\eta V < C\}$ 。于是可得下列边界条件:

$$F_i(0) = 0, \quad i \in \Omega_+; \quad (6)$$

$$F_i(K_1) = G_i(0), \quad i \in \Omega_- \text{ 或 } i \in \Omega'_+; \quad (7)$$

$$G_i(K - K_1) = \pi_i, \quad i \in \Omega'_-. \quad (8)$$

注意到从 (6)、(7)、(8) 式可以得到 $2M$ 个方程, 由它们便能完全确定 k_j 和 k'_j 。这些条件实质上就是上面两个排队系统的联系。

于是求出了虚队列队长的分布如下:

$$p\{q_f(t) \leq x\} = \begin{cases} \sum_{i=0}^M F_i(x), & 0 \leq x < K_1 + B; \\ \sum_{i=0}^M G_i(x - K_1 - B), & K_1 + B \leq x < K + B; \end{cases}$$

则由 (1) 式可得实际漏桶缓冲区排队 (即实队列) 的队长分布:

$$p\{q_r(t) \leq x\} = \begin{cases} \sum_{i=0}^M F_i(x + B), & 0 \leq x < K_1; \\ \sum_{i=0}^M G_i(x - K_1), & K_1 \leq x < K. \end{cases}$$

i 状态, 即输入速率为 iV 时排队缓冲区满的概率为

$$\begin{aligned} P_i\{q_f(t) = K + B\} &= 0, \quad \text{if } i \in \Omega'_-; \\ &= \pi_i - G_i(K - K_1), \quad \text{if } i \in \Omega'_+. \end{aligned}$$

于是高优先级信元的丢失率可表示为

$$P_{\text{loss}} = \frac{1}{E[\lambda(t)]} \sum_{i=0}^M (iV - C) \cdot P_i\{q_f(t) = K + B\},$$

其中 $E[\lambda(t)]$ 是输入速率的平均值。而低优先级信元的丢失率可表示为

$$P'_{\text{loss}} = \frac{1}{E[\lambda(t)]} \sum_{i=0}^M (iV - C) \cdot [\pi_i - F_i(K + B)].$$

实队列的平均排队长可用斯蒂尔积分表示如下

$$\begin{aligned} \bar{Q} &= \int_0^{K_1^-} x d \left[\sum_i F_i(x + B) \right] + \int_0^{K - K_1} (y + K_1) d \sum_i G_i(y) \\ &\quad + K \left[1 - \sum_i G_i(K - K_1) \right]. \end{aligned}$$

根据 Little 定理可得平均排队时延 $\bar{W} = \bar{Q}/\lambda_r$, 其中 $\lambda_r = E[\lambda(t)] \cdot [1 - P_{\text{loss}}\eta - P'_{\text{loss}}(1 - \eta)]$.

由以上分析可知若 $K_1 = K$ 时, 则本文讨论的情况相当于文献 [6].

4 数值计算及仿真实验结果

与文献 [6] 不同, 我们采用了实际语音信源的模型参数. 文献 [8] 的研究表明, 语音信源表现出典型的 ON-OFF 特性, 尽管这个结论是从分组语音研究所得, 它也同样适用于 ATM 环境, 在许多 ATM 的研究中均采用了这个模型. 这里一路语音的 α 取为 1.5385, β 取为 2.8571,

V 为 64Kb/s(当一个信元包含 44 字节有效载荷时, 相当于每秒 181 个信元)。且 η 取为 0.5, 对语音信息进行奇偶编码并分别组织为高低优先级信元时即是如此, 高、低优先级信元各占一半。

图 3 是 $M = 20, K = 100, B = 20, \rho = E[\lambda(t)]/C = 0.8$ 时高优先级信元丢失率与 $(K_1 + B)$ 的关系图。图 4 是相应的总信元丢失率与 $(K_1 + B)$ 的关系图。理论分析与仿真实验结果相吻合。随着 K_1 逐渐接近 K , 信元丢失率迅速提高且信元丢失率的对数大致与 $(K_1 + B)$ 呈线性关系。这个结论说明了这类优先级管理策略对改善高优先级信元丢失是有效的, 注意: 这是以增高低优先级信元丢失率为代价的。

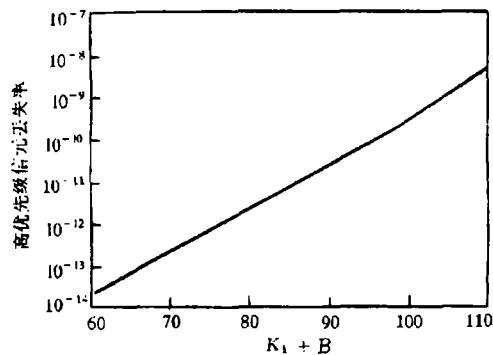


图 3 高优先级信元丢失率与 $(K_1 + B)$ 的关系

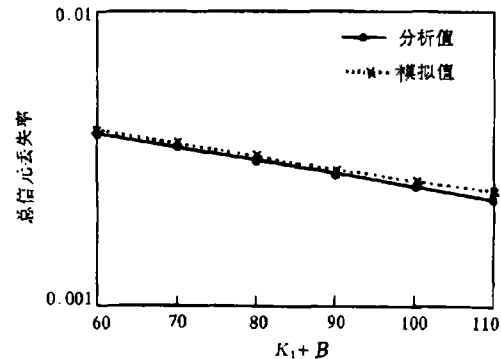


图 4 总信元丢失率关系图与 $(K_1 + B)$ 的关系

图 5 示出了 $K = 100, K_1 = 80, \rho = 0.8$ 时总信元丢失率与 B 的关系。其中 M 分别取值 20, 30, 40。由此图可以发现, 当 M 增大时, 统计复用的作用使总业务流的突发性降低, 从而改善了漏桶性能。这与文献 [6] 的结论一致。

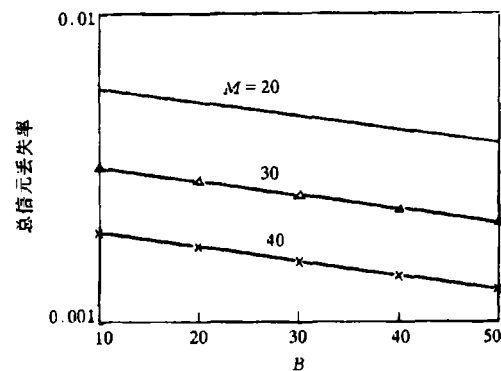


图 5 总信元丢失率关系图与 B 的关系

5 结 论

本文将 PBS 优先级管理策略应用到漏桶监管之中。并利用文献 [3, 4] 发展的推广的流体流方法加以分析。理论分析与仿真实验结果表明, 这类优先级管理策略对改善高优先级信元丢失很有效, 这在业务监管中是很有意义的。

通过这种推广的流体流方法对流量控制策略的分析, 能够找到合适的参数方法完成对各种不同业务的流量控制, 以保证特定业务质量要求。对于本文的 PLB 来说, 可以确定相应的 B 、 K 、 K_1 、 C 等参数, 使高低优先级信元丢失率及排队时延限制在一定的范围内。

参 考 文 献

- [1] Yin N, *et al.* Analysis of the leaky bucket algorithm for on-off data source. IEEE Globecom'91, Phoenix, USA: 1991, 254-260.
- [2] Kroner H, *et al.* Priority management in ATM switching nodes. IEEE J. of SAC, 1991, SAC-9(3): 418-427.
- [3] 徐树公. ATM 网中 VBR 视频业务的建模与控制: [博士论文]. 武汉: 华中理工大学, 1996, 9.
- [4] 徐树公, 黄载禄. 基于缓冲区门限的 ATM 网业务流量控制分析. 通信学报, 1996, 17(5): 74-79.
- [5] Anick D, Mitra D, Sondhi M. Stochastic thoery of data-handling system with multiple sources. Bell Syetem Tech. J, 1982, 61(8): 1871-1894.
- [6] 蒋志刚, 李乐民. ATM 网络中突发业务的漏桶算法分析. 电子学报, 1995, 23(1): 8-14.
- [7] Yin N, *et al.* Congestion control for packet voice by selective packet discarding. IEEE Trans. on Comm. 1990, COM-38(9): 674-683.
- [8] Diagle J, *et al.* Models for analysis of packet voice communication system. IEEE J. of SAC, 1986, SAC-4(5): 847-855.

PERFORMANCE ANALYSIS OF LEAKY BUCKET POLICING
WITH PRIORITY MANAGEMENT IN ATM NETWORKS

Xu Shugong Huang Zailu

(Electronic and Information Engineering Dept., HUST, Wuhan 430074)

Abstract The performance of leaky bucket policer with priority management (PLB) in ATM networks is analyzed using extended fluid flow method. This PLB scheme introduces PBS selective discarding priority management into service policing. It guranties lower loss probability for high priority cells. The analysis and numerical experiments show that this scheme is useful. By the performance analysis, suitable PLB parameters for efficacious control may be obtained.

Key words Priority Leaky Bucket(PLB), Partial buffer sharing, Fluid flow method, ATM network

徐树公: 男, 1969 年生, 博士后, 现从事宽带和无线通信的研究工作.

黄载禄: 男, 1937 年生, 教授, 博士生导师, 从事通信和信号处理的教学和研究工作.