

含优先级机制的 ATM Mux 中的信元丢失率分析¹

汪永明 黄载禄

(华中理工大学电子与信息工程系 武汉 430074)

摘 要 含丢失优先级机制的 ATM Mux 中的信元丢失率分析是 ATM 网络流量控制研究中的一个重要问题。本文用两状态的 MMDP 近似实际输入过程, 并采用流体流技术对不同优先级信元在 ATM Mux 中的丢失率进行了分析, 得到了各类信元的丢失率与缓冲容量之间关系的解析式。模拟实验表明该方法足够精确, 完全可以满足实际应用的需要。

关键词 丢失优先级机制, 信元丢失率, 异步转移模式

中图分类号 TN913.24

1 引 言

含丢失优先级机制的 ATM Mux (Multiplexer) 是 ATM 网络中的一个核心单元, 它里面的信元丢失率的分析是一个非常重要而又困难的问题, 这一问题与信源模型、优先级分配规则、排队规则等都有关系。在目前所提出的分析方法中, 或精度不高^[1], 或计算过于复杂^[2], 很难满足实际应用的需要。

为了克服这些方法的上述不足, 本文提出了一种新的更实用的分析方法: 先用不含优先级的排队系统作为等效模型, 并在此基础上通过近似的到达过程和流体流技术得到了两类不同丢失优先级信元在突发级上的丢失率关于缓冲容量的解析表达式。

2 无优先级控制时突发级信元丢失率分析

2.1 无优先级控制的排队模型

我们先考虑这样的一个不含优先级控制的排队系统: 输入是由 N 个独立的同类 ON-OFF 信源叠加的过程, ON-OFF 信源的两状态持续时间分别是服从参数为 α 和 β (单位: 1/s) 的负指数分布, 信元峰值速率为 V_P 信元/s (相应的到达间隔为 T (s)); 排队系统有 K 个缓冲单元; 服务速率为 RV_P 信元/s, 并假设 R 为整数; 服务规则是 FIFO。

实际通信系统中的信元流是离散的, 为此将上述连续 ON-OFF 信源模型离散化。设 $t_i = iT$ ($i = 0, 1, 2, \dots$), 我们只研究 t_i^- 、 t_i 和 t_i^+ 时的情况, 并认为在有 (无) 信元到达的 T 间隔内该信源处于 ON(OFF) 状态, 于是得到离散 ON-OFF 信源模型^[3]: ON 和 OFF 状态持续时间都是服从延迟几何分布 (以 T 为单位) 的随机变量, 其参数分别为: $p_N = 1 - \alpha T$ 和 $p_F = 1 - \beta T$ 。则在任一时刻信源处于 ON 状态的概率 $p = (1 - p_F)(2 - p_N - p_F)^{-1}$, ON 和 OFF 状态持续 i 个 T 间隔的概率分别是 $P_N(i) = (1 - p_N)p_N^{i-1}$ 和 $P_F(i) = (1 - p_F)p_F^{i-1}$ 。如果

¹ 1996-04-05 收到, 1996-10-23 定稿

用 $LP_b(R, N, p, K)$ 表示突发级信元丢失率, 则有

$$LP_b(R, N, p, 0) = (1/Np) \sum_{n=R+1}^N C_N^n (n-R)p^n (1-p)^{N-n}. \quad (1)$$

2.2 一个缓冲单元时突发级信元丢失率

由于本文将要用到在一个缓冲单元条件下突发级信元丢失率, 所以我们先推导其计算公式。对上述排队系统而言, 状态 n 表示有 n 个信源处于 ON 状态, 其余的 $N-n$ 个信源处于 OFF 状态, 用 D_n 表示 n 状态的平均持续时间, 用 $P(l|n)$ 表示在至少有一个信源的状态发生改变的情况下状态 n 向状态 l 转移的条件转移概率, 并设 $m > 0$, 则有

$$D_n = (1 - p_N^n p_F^{N-n})^{-1}, \quad (2a)$$

$$P(n+m|n) = p_F^{(N-n)} p_N^n (1 - p_F^{(N-n)} p_N^n)^{-1} \times \sum_{l=m}^{\min(n+m, N-n)} C_{N-n}^l C_n^{l-m} (1 - p_F)^l p_F^{-l} (1 - p_N)^{l-m} p_N^{m-l}, \quad (2b)$$

$$P(n-m|n) = p_N^n p_F^{N-n} (1 - p_N^n p_F^{N-n})^{-1} \times \sum_{l=m}^{\min(n, N-n+m)} C_n^l C_{N-n}^{l-m} (1 - p_N)^l p_N^{-l} (1 - p_F)^{l-m} p_F^{m-l}. \quad (2c)$$

用 $P(R, 1)$ 表示排队系统处于状态 R 并且缓冲器里有一个信元的概率, 用 $\Delta(R, N)$ 表示无缓冲器时丢失率与有一个缓冲单元时丢失率之差。由于在只有一个缓冲单元的条件下, 当排队系统进入状态 $n(n < R)$ 时, 若缓冲器里有一个信元, 则该信元就被传送出去, 所以有

$$P(R, 1) = P(R) \sum_{i=R+1}^N \frac{P(R|i)P(i)}{D_i} \left(\sum_{j=0}^{R-1} \frac{P(R|j)P(j)}{D_j} + \sum_{j=R+1}^N \frac{P(R|j)P(j)}{D_j} \right)^{-1}, \quad (2d)$$

$$\Delta(R, N) = \frac{1}{Np} \sum_{n=0}^{R-1} \left[\frac{P(n|R)P(R, 1)}{D_R} + \sum_{i=R+1}^N \frac{P(n|i)P(i)}{D_i} \right]. \quad (2e)$$

于是 $LP_b(R, N, p, 1) = LP_b(R, N, p, 0) - \Delta(R, N)$ 。如果只考虑相邻状态间的状态转移, 则有

$$\Delta(R, N) = \frac{P(R)}{Np} \frac{P(R-1|R)}{D_R} \left[1 + \frac{P(R|R-1)P(R-1)D_{R+1}}{P(R|R+1)P(R+1)D_{R-1}} \right]^{-1}. \quad (2f)$$

2.3 无优先级控制时突发级信元丢失率函数的求解

我们先用一个参数有待确定的两状态 MMDP(Markov Modulated Determined Rate Process) 来逼近实际的输入流, 并利用流体流技术^[4] 求出被丢弃的信元在过载信元中所占的比例, 再将它乘以无缓冲器时的突发级丢失率便得到突发级信元丢失率的计算公式, 最后利用上面求出的 $LP_b(R, N, p, 0)$ 和 $LP_b(R, N, p, 1)$ 和该公式来确定 MMDP 的各个参数。

对于参数分别为 $1/w_i$ (平均持续时间) 和 B_i (到达速率)($i = 0, 1$) 的两状态 MMDP 来说, 当服务速率为 $RV_P(B_0 > RV_P > B_1)$ 时, MMDP/D/1/K 和 MMDP/D/1/0 的突发级信元丢失率之比为^[3,4]:

$$Q(R, N, K) = (\lambda_0 - \lambda_1) [\lambda_0 e^{(\lambda_0 - \lambda_1)K} - \lambda_1]^{-1},$$

其中 $\lambda_0^{-1} = w_0(B_0 - RV_P)$, $\lambda_1^{-1} = w_1(RV_P - B_1)$. 则

$$LP_b(R, N, p, K) = LP_b(R, N, p, 0)Q(R, N, K). \quad (3a)$$

用以逼近实际输入过程的 MMDP 的到达速率 $B_i (i = 0, 1)$ 按照如下的方法来确定:

$$B_0 = V_P \sum_{i=R_0}^N iP(i)/P_0, \quad B_1 = V_P \sum_{i=0}^{R_1} iP(i)/P_1, \quad P_0 = \sum_{i=R_0}^N P(i), \quad P_1 = \sum_{i=0}^{R_1} P(i),$$

其中 R_0 和 R_1 是 R 的子状态且满足:

$$P(R_0) = P(R)[1 - P(R)]^{-1} \sum_{i=R+1}^N P(i), \quad P(R_1) = P(R)[1 - P(R)]^{-1} \sum_{i=0}^{R-1} P(i),$$

而 w_0 和 w_1 可由 $w_0P_1 = w_1P_0$ 和 $LP_b(R, N, p, 0) - \Delta(R, N) = LP_b(R, N, p, 0)Q(R, N, 1)$ 来确定.

实验表明^[3]: 上述方法非常稳定, 并足够精确, 其数学上的原因在于实际的突发级信元丢失率函数与上述公式在形式上非常相近, 而且变化平缓, 因而只要两者在上述两个特殊点处相吻合, 就可以在一定的 K 值变化范围内保证两者相近.

另外, 在实际通信系统中, R 可能不是整数, 由于 R 一般都较大, $LP_b(\lfloor R \rfloor, N, p, K)$ 、 $LP_b(R, N, p, K)$ 和 $LP_b(\lceil R \rceil, N, p, K)$ 都很相近, 而且它们随 K 改变而变化较为缓慢, 此时可利用插值的方法来估计 $LP_b(R, N, p, K)$:

$$LP_b(R, N, p, K) = \frac{[LP_b(R, N, p, 0) - LP_b(\lceil R \rceil, N, p, 0)]LP_b(\lfloor R \rfloor, N, p, K)}{LP_b(\lfloor R \rfloor, N, p, 0) - LP_b(\lceil R \rceil, N, p, 0)} + \frac{[LP_b(\lfloor R \rfloor, N, p, 0) - LP_b(R, N, p, 0)]LP_b(\lceil R \rceil, N, p, K)}{LP_b(\lfloor R \rfloor, N, p, 0) - LP_b(\lceil R \rceil, N, p, 0)}. \quad (3b)$$

3 含两个丢失优先级 ATM Mux 突发级信元丢失率的计算

在本文所要分析的含两个丢失优先级的排队系统中, 采用如下突发信源模型^[2]: 突发信源 ON 和 OFF 状态的持续时间分别是服从参数为 α 和 β (单位: 1/s) 的负指数分布的随机变量(令 $p = \beta(\alpha + \beta)^{-1}$); 在 ON 状态下 CLP (Cell Loss Priority) 为 0 的信元(即优先信元)以 v_0 信元/s 的固定速率到达, CLP 为 1 的信元(即有标记的信元)以 v_1 信元/s 的固定速率到达; 而在 OFF 状态下无信元到达. 在该排队系统中, 有 N 个独立的同类信源, K 个缓冲单元, 当缓冲器被占满时, 有标记的信元将首先被丢弃, 系统服务速率为 C (单位是: 信元/s), 并采用 FIFO 的服务规则.

在上述的排队系统中, 由于优先信元是否丢失与有标记的信元无关, 因而我们可以直接利用第 2 节介绍的方法来求解优先信元的突发级丢失率. 这时信元峰值速率为 v_0 , 服务速率为 C . 将这些参数代入式 (3b) 中便可得到优先信元的丢失率(记为 $LP_{b0}(C, v_0, v_1, N, p, K)$):

$$LP_{b0}(C, v_0, v_1, N, p, K) = LP_b(C/v_0, N, p, K). \quad (4)$$

由于突发级信元丢失率不考虑因短时间内系统过载而被丢弃的信元,因此该排队系统突发级的平均丢失率与如下的排队系统突发级信元丢失率相同:信元峰值速率为 $v_0 + v_1$,其它条件不变。用 $LP_{bm}(C, v_0, v_1, N, p, K)$ 表示平均丢失率,则

$$LP_{bm}(C, v_0, v_1, N, p, K) = LP_b(C/(v_0 + v_1), N, p, K). \quad (5)$$

而有标记的信元的丢失率 $LP_{b1}(C, v_0, v_1, N, p, K)$ 可由下式给出:

$$LP_{b1}(C, v_0, v_1, N, p, K) = (1 + v_0/v_1)LP_{bm}(C, v_0, v_1, N, p, K) - LP_{b0}(C, v_0, v_1, N, p, K)v_0/v_1. \quad (6)$$

有关这种方法精度的说明如下:在优先信元丢失率、平均丢失率和有标记的信元丢失率中,第一个的值最小,但它是由第2节所提出的方法直接计算出来的,其精度是由上述方法本身的精度决定的;第二个次之,其精度也是由上述方法本身的精度决定的;第三个虽然是由间接的方法得到的,但由于它最大,并且在通常情况下它和第二个都与第一个有数量级的差别,因此其相对误差与第二个的相对误差相当,这样一来其精度也是由上述方法本身决定的。

4 模拟实验和分析

为方便起见,在以下的讨论中,我们以总的到达速率所对应的到达间隔为时间单位,即令 $v_0 + v_1 = 1$ 。考虑到分层编码在语音和图象业务的信源编码中应用最为广泛,我们针对如下两类业务做了大量的实验研究:突发长度和突发度分别是 58 和 64/22 的语音业务和两参数分别是 2604 和 2000/87 的图象业务^[5]。为了能够较为容易地得到可信的模拟值,本文为 v_0 和 v_1 选取了合适的值并在此条件下来作研究。模拟结果是采用第3节中给出的信源模型和排队模型,并利用蒙特卡罗实验获得的,其置信度优于 90%。由于在缓冲容量较大的情况下,突发级信元丢失占主导地位,在缓冲容量较小的情况下,信元级信元丢失占主导地位,因此本文只比较缓冲容量较大时的计算结果和模拟结果。

图1是把本文的方法与 Kroner 等提出的方法^[1]相比较。在图1里,对于语音业务中的优先信元的丢失率来说,本方法的分析结果比 Kroner 等提出方法^[1]的分析结果要精确得多;对于语音业务中的有标记信元和平均丢失率来说, Kroner 等提出方法稍精确些;而在分析图象业务的信元丢失率时,两者的精度并无明显的差别。事实上, Kroner 等提出的方法^[1]所得到的结果是突发级损失系统的丢失率,它并不能反映突发级混合系统的信元丢失率随缓冲容量改变而变化的关系;而本文所提出的方法在突发长度较长时更为精确。由于当负荷较重或突发长度较长时,突发级信元丢失率随着缓冲容量的增大而非常缓慢地下降;而当突发长度较短并且负荷不重时,突发级信元丢失率随着缓冲容量的增大而迅速地减小,所以自然会出现上述结果。

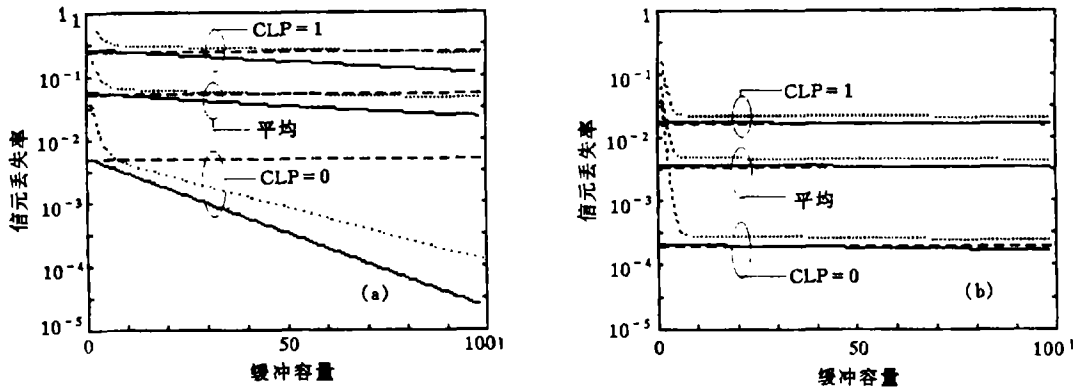


图 1 比较不同方法所得到的结果

..... 模拟 — 本文的方法 - - - Kroner 等提出的方法 [1]

(a) 话音 $N=50, C=18, v_0 = 0.8, v_1 = 0.2$ (b) 图象 $N = 150, C=12, v_0 = 0.8, v_1 = 0.2$

图 2 是在保持信元总的到达速率不变的条件下，减小 v_0 增大 v_1 后所得到的结果。不难看出： v_0 减小后，本方法计算出的优先信元的丢失率与模拟值相比，偏差有所增大，而其它两个值与对应的模拟值之间的偏差无明显变化。其原因在于：减小 v_0 ，对于优先信元来说，等效于减小信源的突发长度，但对于平均丢失率来说，并没有这种影响，又由于优先信元的丢失率在平均丢失率中所起的作用较小，本方法计算出有标记信元的丢失率的精度与计算出的平均丢失率的精度相当，因此对于有标记信元和平均丢失率来说，分析结果的精度并不随 v_0 的改变而发生明显的变化。

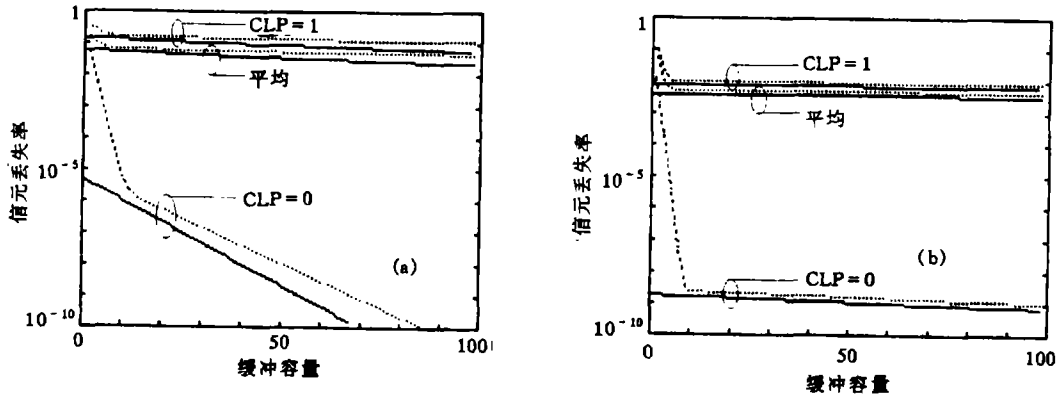


图 2 改变 v_0 和 v_1 后由本方法所得到的结果与模拟值的比较

..... 模拟 — 本文的方法

(a) 话音 $N=50, C=18, v_0 = 0.6, v_1 = 0.4$ (b) 图象 $N = 150, C=12, v_0 = 0.5, v_1 = 0.5$

这里我们假定 ON(OFF) 状态的平均持续时间恒定，并对时间作了归一化处理（即 $v_0 + v_1 = 1$ ）。由于在实际的 ATM 网络中负荷小于 1（即 $Np(v_0 + v_1) < C$ ），所以当 $v_0 \leq p$ 时，在突发级上优先信元丢失率为 0。事实上 ATM 网络中的资源利用率较高，一般满足 $Nv_0 \geq C$ ，即 v_0

一般不会太小并且大于 p ，那么对于 $CLP=0$ 的信元来说，突发长度不会太短，因此对于实际应用来说，本文所提出的方法可以提供足够的分析精度。

5 结 论

本文通过利用适当参数的 MMDP 来近似实际的输入过程和流体流技术，来分析在有优先级控制时的突发级信元丢失率，得到了突发级信元丢失率关于缓冲容量的封闭表达式，使突发级信元丢失率分析变得十分简单。不仅如此，模拟实验还表明：在实际应用中，该方法对于语音和图象业务来说都可以提供足够的分析精度，特别适合在 ON 状态持续期内优先信元平均到达数较大的实时应用。这些结果不仅为研究 ATM 网络中流量控制问题提供了理论分析的方法，而且还可以为 ATM Mux 的设计提供技术指导。

参 考 文 献

- [1] Kroner H. *et al.* An efficient solution method for Markov models of ATM links with loss priorities. *IEEE J. of Select. Areas Commun.*, 1991, SAC-9(3): 418-427.
- [2] Elwalid A I, Mitra D. Statistical multiplexing with loss priorities in rate-based congestion control of high-speed networks. *IEEE Trans. on Commun.*, 1994, COM-42(11): 2989-3001.
- [3] Yongming Wang, Zailu Huang. A simple approach to the cell loss probability in ATM networks. in *ICCT' 96*, Beijing: May 1996, 259-262.
- [4] Butto M. *et al.* Effectiveness of the "leaky bucket", policing mechanism in ATM networks. *IEEE J. of Select. Areas Commun.*, 1991, SAC-9(3): 335-342.
- [5] Tao Yang, *et al.* A Markov modulated characterization of packetized voice and data traffic and related statistical multiplexer performance. *IEEE Trans. on Commun.*, 1995, COM-43(1): 117-126.

THE ANALYSIS OF CELL LOSS RATES IN AN ATM MUX WITH LOSS PRIORITIES

Wang Yongming Huang Zailu

(*Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*)

Abstract The analysis of cell loss rates in an ATM Mux with loss priorities is an important problem in the study of traffic control in ATM networks. In this paper, the loss rates of the cells with different priorities in an ATM Mux are analyzed by approximating the actual input process with two-state MMDP and fluid flow technique, and the analytical expressions of the relation between the loss rates and the buffer size are obtained. Simulation shows that the proposed approach is sufficiently accurate for applications.

Key words Loss priority mechanism, Cell loss rate, Asynchronous Transfer Mode(ATM)

汪永明：男，1968年生，博士生，从事 ATM 和 B-ISDN 理论和技术、图象处理和信号处理等方面的研究工作。

黄载祿：男，1937年生，教授，博士生导师，华中理工大学信息科学与工程学院院长，长期从事通信、信号处理等领域的研究工作。