

数据包丢弃技术的性能*

涂奉生 吴 民

(南开大学计算机与系统科学系·天津, 300071)

摘要: 数据包丢弃技术是宽带网络中的一种缓冲区管理技术, 其目标是使网络超负荷运行时有较高的端到端的吞吐量. 本文采用流量模型, 通过分析和仿真, 考察了在数据包长度数据包长度呈负指数分布的条件下, 数据包丢弃技术的稳态性能.

关键词: 数据包提前丢弃; 数据包尾部丢弃; 流量模型; ATM

Performance of Packet Discard Policies

Tu Fengsheng Wu Min

(Department of Computer and System Sciences, Nankai University · Tianjin, 300071, P. R. China)

Abstract: Packet discard policies is a buffer-management technique to ensure high end-to-end throughput for data applications when the network is overloaded. In this paper, we adopt fluid model and discuss the performance of packet discard policies through analysis and simulation under the assumption that packet lengths are geometric distributed.

Key words: early packet discard; tail dropping; fluid model; ATM

1 引言

传统的数据业务在 ATM 网中传输时, 由于端到端的运输层数据包一般包含数百上千字节, 而 ATM 网中基本传输单位——信元的长度为 53 字节, 其中有效负荷 48 字节, 因此需要用多个信元来传输一个数据包. ATM 中的适配层 AAL5 用于数据业务的传送. AAL5 用信元头的 PTI 中的一个比特, 标志数据包是否结束 (也就是标志哪几个信元属于同一数据包). 该比特为 1, 表示运输层的数据包结束; 该比特为 0, 表示运输层的数据包刚刚开始或正在继续.

数据业务对信息的丢失是十分敏感的, 也就是当数据流的某一块, 哪怕是一小块内容丢失, 都会使整块信息价值降低, 甚至整块数据也成为废数据. 这也就是传统的计算机网络采用差错校验和错误重传等机制避免数据丢失的原因. 在 ATM 网络中, 没有丢失重传的机制, 因此当某个数据包的一个信元因网络拥塞而丢失时, 该数据包的其它信元即使传输至目的端, 目的端也不能恢复出源端的数据包, 所以传输它们毫无意义. 数据包丢弃技术就是在这—事实的基础上, 通过丢弃这些无用信元, 提高网络资源的有效利用率.

数据包丢弃技术是目前 ATM 研究中的较新的

课题^[1]. [2] 和 [3] 分别采用确定型模型, 针对最坏情形和一种理想情形研究了数据包丢弃技术在 ATM 网中应用的一些问题, 特别是计算出采用数据包丢弃技术的结点的完整输出率 (goodput) 以及达到完整输出率 100% 所需的存储器数量. [5] 在随机模型下, 分析了采用数据包丢弃技术的结点的完整输出率, 但是在该文的模型中, 在任意时刻, 只有一个虚连接向该结点输入信元. 在本文中, 我们也采用随机模型, 但有多个虚连接同时向结点输入信元, 由于在 ATM 网络中统计复用被广泛的采用, 因此本文的假设与实际情形较接近.

2 数学模型

本文采用连续的流量模型^[2] 分析数据包丢弃技术. 我们知道, 在 ATM 网络中, 信息是以信元为基本单位传送的, 因此是以离散的块的形式来传送. 但是由于宽带网络的带宽比较大, 加上传输的业务的信息量也比较大, 所以可以将网络中传输的离散信息流近似为连续的信息流模型. 这种近似在宽带网和 ATM 的研究中广为采用. 另外, 我们假设数据包的长度呈参数为 λ 的负指数分布, 当一个数据包结束的时候, 下一个数据包立即开始.

* 国家攀登计划项目 (970211017) 以及北京邮电大学“程控交换技术与通信网”国家重点实验室开放课题基金资助项目.

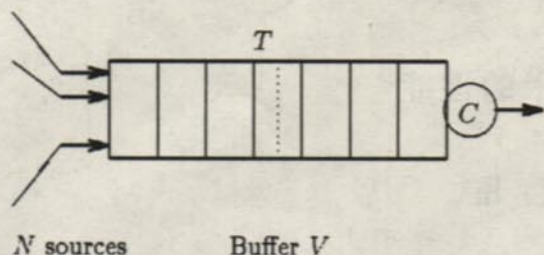


图 1 一个网络结点的模型

图 1 是一个采用数据包丢弃技术的网络结点的逻辑模型。\$N\$ 个数据流同时向结点输入数据流，我们假定每个数据流需要的带宽为 1。结点有一条输出线路，带宽为 \$C\$，假定 \$C\$ 不是整数。结点有一个缓冲区，容量为 \$V\$。采用数据包丢弃技术的网络结点必须为每个数据业务流保持一个二值状态，正常和丢弃。当某个流处于正常状态时，结点将试图接收该流的信元并向下一结点传输；当它处于丢弃状态时，结点将不接收该流的信元。一般情形下，每个流的状态为正常。本文分析的数据包丢弃技术有如下两种：数据包尾部丢弃，采用数据包尾部丢弃技术的网络结点，当它的某个输入数据流的某个信元因缓冲区溢出而被丢弃时，结点会将该流的状态变为丢弃，直到丢弃一个具有结束标志的信元后，结点才将该流的状态恢复正常；数据包提前丢弃，采用数据包提前丢弃的网络结点，会在其缓冲区中设置一个门限值 \$T\$，当一个数据包的第一个信元到达结点时，结点要根据当前缓冲区内的信元数量决定是否接收该信元，若当前缓冲区内的信元数小于门限值，则接收该信元，并且将该流的状态设为正常；若当前缓冲区内的信元数大于门限值，则丢弃该信元，并将该流的状态设为丢弃。一旦出现结点的缓冲区溢出，结点将立刻使一些处于正常状态的数据包变为丢弃状态，使处于正常状态的数据包的带宽总和在 \$C\$ 以内。同数据包尾部丢弃技术一样，对于因缓冲区溢出而发生丢弃信元的数据流，采用数据包提前丢弃的结点也会立刻将它们标志为丢弃状态。

我们首先给出采用数据包提前丢弃技术的系统稳态概率计算方法，将此方法稍加修改就可以计算出采用数据包尾部丢弃技术的稳态概率。

3 数据包提前丢弃的分析

令缓冲区占有量为 \$\xi_t\$，它是一个连续型随机变量。我们需要得到 \$\xi_t\$ 的稳态分布。

首先我们考虑 \$\xi_t\$ 小于门限值 \$T\$ 时的情形。令

\$F_i(t, x)\$ 为 \$t\$ 时刻有 \$i\$ 个虚连接处于正常状态，且缓冲区占有量小于 \$x\$ 的概率，即

$$F_i(t, x) = P(\xi_t < x, i \text{ 个流处于正常}), \quad (1)$$

当 \$i < 0\$ 或 \$i > N\$ 时，令 \$F_i(t, x) = 0\$。

我们要求出当 \$t \rightarrow \infty\$ 时的 \$F_i(t, x)\$。设在 \$t + \Delta t\$ 时刻事件“有 \$i\$ 个数据流处于正常状态且 \$\xi_{t+\Delta t} < x\$”发生，这一事件的发生有两种可能，一是在 \$t\$ 时刻事件“\$\xi_t < x\$ 而且有 \$i-1\$ 个数据流处于正常状态”发生，而在 \$[t, t+\Delta t)\$ 时间内发生了“某个处于丢弃状态的数据包结束，新的数据包开始”（由于缓冲区占有量小于门限值，新的数据包将处于正常状态），这一事件发生的条件概率是 \$[N - (i-1)] \cdot \lambda \Delta t\$；另一可能是在 \$t\$ 时刻事件“\$\xi_t < x - (i-C)\Delta t\$ 而且有 \$i\$ 个数据流处于正常状态”发生，而在 \$[t, t+\Delta t)\$ 时间内未发生“数据包结束，新数据包开始”事件，这一事件未发生的条件概率是 \$1 - (N-i) \cdot \lambda \Delta t\$。因此

$$F_i(t + \Delta t, x) = [N - (i-1)] \cdot \lambda \Delta t \cdot F_{i-1}(t, x) + [1 - (N-i) \cdot \lambda \Delta t] \cdot F_i[t, x - (i-C)\Delta t] + o(\Delta t). \quad (2)$$

将 \$F_i[t, x - (i-C)\Delta t]\$ 展成 Taylor 级数，并令 \$\Delta t \rightarrow 0\$，(2) 可以得出

$$\frac{\partial F_i(t, x)}{\partial t} = [N - (i-1)]\lambda \cdot F_{i-1}(t, x) - (i-C) \frac{\partial F_i(t, x)}{\partial x} - (N-i)\lambda \cdot F_i(t, x) \quad (3)$$

当系统处于稳态时，\$\frac{\partial F_i(t, x)}{\partial t} = 0\$，设 \$F_i(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} F_i(t, x)\$。因此

$$(i-C) \frac{\partial F_i(x)}{\partial x} = [N - (i-1)]\lambda \cdot F_{i-1}(x) - (N-i)\lambda \cdot F_i(x).$$

以上实际上是 \$N+1\$ 元线性微分方程族，定义 \$N+1\$ 元列向量

$$F(x) = [F_0(x), F_1(x), \dots, F_N(x)]^T.$$

可以将方程组写成矩阵形式。

$$D_F \cdot \frac{\partial F(x)}{\partial x} = M_F \cdot F(x). \quad (4)$$

其中

$$D_F = \begin{pmatrix} -C & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 1-C & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & N-C \end{pmatrix}, \quad (5)$$

而

$$M_F = \begin{pmatrix} -N\lambda & 0 & \cdots & \cdots \\ N\lambda & -(N-1)\lambda & 0 & \cdots \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots \end{pmatrix}. \quad (6)$$

令矩阵 $D_F^{-1}M_F$ 的 $N+1$ 个特征根为 $z_0, \dots, z_N$, 对应的特征向量 $\Phi_0, \dots, \Phi_N$, 微分方程 (4) 的解可以表示为

$$F(x) = \sum_{i=0}^N a_i \Phi_i e^{z_i x}.$$

这里 a_i 是待定常数. 根据 D_F, M_F 的具体形式, 第 i 个特征根为

$$z_i = \frac{i-N}{i-C} \lambda.$$

也就是有 $(N+1)$ 个不同的特征根, 因此对应每个特征根有一个特征向量.

下面分析 $\xi_t > T$ 时的情形, 令

$$G_i(t, x) = P(\xi_t \geq x, i \text{ 个流处于正常}).$$

当 $i < 0$ 或 $i > N$ 时, 令 $G_i(t, x) = 0$.

当 $i < C-1$ 时, 类似上面的分析, 设在 $t+\Delta t$ 时刻事件“有 i 个数据流处于正常状态且 $\xi_{t+\Delta t} \geq x$ ”发生, 这一事件的发生有两种可能, 一是在 t 时刻事件“ $\xi_t \geq x$ 而且有 $i+1$ 个数据流处于正常状态”发生, 而在 $[t, t+\Delta t)$ 时间内发生了“某个处于正常状态的数据包结束, 新的数据包开始”(由于缓冲区占有量大于门限值, 新的数据包将处于丢弃状态), 这一事件发生的条件概率是 $(i+1) \cdot \lambda \Delta t$; 另一可能是在 t 时刻事件“ $\xi_t \geq x - (i-C)\Delta t$ 而且有 i 个数据流处于正常状态”发生, 而在 $[t, t+\Delta t)$ 时间内未发生“数据包结束, 新数据包开始”事件, 这一事件未发生的条件概率是 $1 - i \cdot \lambda \Delta t$. 因此

$$\begin{aligned} G_i(t+\Delta t, x) &= (i+1) \cdot \lambda \Delta t \cdot G_{i+1}(t, x) \\ &+ [1 - i \cdot \lambda \Delta t] \cdot G_i[t, x - (i-C)\Delta t] + o(\Delta t). \end{aligned} \quad (7)$$

当 $i > C$ 时, 情况与 $i < C$ 时的情形有些不同. 由于当缓冲区充满时立刻有若干数据流的状态变为丢弃状态, 使系统处于有 $[C]$ 个数据流处于正常状态. 因此事件“ $\xi_{t+\Delta t} \geq x$ 且有 i 个数据流处于正常状态”中不包含事件“ $\xi_t \geq V - (i-C)\Delta t$ 而且有 i 个数据流处于正常状态且 $[t, t+\Delta t)$ 内未发生数据包结束

和数据包开始”. 这样, 下式成立.

$$\begin{aligned} G_i(t+\Delta t, x) &= (i+1) \cdot \lambda \Delta t \cdot G_{i+1}(t, x) \\ &+ [1 - i \cdot \lambda \Delta t] \cdot G_i[t, x - (i-C)\Delta t] \\ &- [1 - i \cdot \lambda \Delta t] \cdot G_i[t, V - (i-C)\Delta t] + o(\Delta t). \end{aligned} \quad (8)$$

由于当缓冲区充满时立刻有若干数据流的状态变为丢弃状态, 使系统处于有 $[C]$ 个数据流处于正常状态. 因此事件“ $\xi_{t+\Delta t} \geq x$ 且有 $[C]$ 个数据流处于正常状态”中应包含事件“ $\xi_t \geq V - (i-C)\Delta t$ 而且有 $i(i > C)$ 个数据流处于正常状态且 $[t, t+\Delta t)$ 内未发生数据包结束和数据包开始”. 这样, 当 $i = [C]$ 时,

$$\begin{aligned} G_i(t+\Delta t, x) &= (i+1) \cdot \lambda \Delta t \cdot G_{i+1}(t, x) \\ &+ [1 - i \cdot \lambda \Delta t] \cdot G_i[t, x - (i-C)\Delta t] \\ &+ \sum_{j=[C]+1}^N [1 - j \cdot \lambda \Delta t] \cdot G_j[t, V - (j-C)\Delta t] \\ &+ o(\Delta t). \end{aligned} \quad (9)$$

容易看出 $G_i(t, V) = 0$ 且当 $x \rightarrow V$, $G_i(t, x) \rightarrow 0$. 令 $\Delta t \rightarrow 0$, (7), (9), (8) 式分别可以导出 (G' 表示 $\frac{\partial G(t, x)}{\partial x}$):

$$\begin{aligned} i < C-1 \text{ 时,} \\ \frac{\partial G_i(t, x)}{\partial t} &= (i+1)\lambda \cdot G_{i+1}(t, x) \\ &= -(i-C) \frac{\partial G_i(t, x)}{\partial x} - i\lambda \cdot G_i(t, x); \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} i = [C] \text{ 时,} \\ \frac{\partial G_i(t, x)}{\partial t} &= (i+1)\lambda \cdot G_{i+1}(t, x) - (i-C) \frac{\partial G_i(t, x)}{\partial x} \\ &- \sum_{j=[C]+1}^N (j-C) \cdot G'_j(t, V) - i\lambda \cdot G_i(t, x); \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} i > C \text{ 时,} \\ \frac{\partial G_i(t, x)}{\partial t} &= (i+1)\lambda \cdot G_{i+1}(t, x) - (i-C) \frac{\partial G_i(t, x)}{\partial x} \\ &- i\lambda \cdot G_i(t, x) + (i-C) \cdot G'_i(t, V). \end{aligned} \quad (12)$$

当系统处于稳态时, $\frac{\partial G_i(t, x)}{\partial t} = 0$, 令 $G_i(x) = \lim_{t \rightarrow \infty} G_i(t, x)$. 因此,

当 $i < C - 1$,

$$(i - C) \frac{\partial G_i(x)}{\partial x} = (i + 1)\lambda \cdot G_{i+1}(x) - i\lambda \cdot G_i(x); \quad (13)$$

当 $i = [C]$,

$$(i - C) \frac{\partial G_i(x)}{\partial x} = (i + 1)\lambda \cdot G_{i+1}(x) - \sum_{j=[C]+1}^N (j - C) \cdot G'_j(V), \\ - i\lambda \cdot G_i(x); \quad (14)$$

当 $i > C$,

$$(i - C) \frac{\partial G_i(x)}{\partial x} = (i + 1)\lambda \cdot G_{i+1}(x) - i\lambda \cdot G_i(x) \\ + (i - C) \cdot G'_i(V). \quad (15)$$

定义 $(N + 1)$ 元列向量

$$G(x) = [G_0(x), G_1(x), \dots, G_N(x)]^T.$$

式 (10), (11), (12) 写成矩阵形式

$$D_G \frac{\partial G(x)}{\partial x} = M_G G(x) + \sum_{j=[C]+1}^N (j - C) G'_j(V) \cdot W_j. \quad (16)$$

其中 $D_G = D_F$, 而

$$M_G = \begin{pmatrix} 0 & \lambda & 0 & \dots \\ 0 & -\lambda & 2\lambda & 0 \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & \ddots & \ddots & \ddots \end{pmatrix}. \quad (17)$$

而 $W_j (j = [C] + 1, \dots, N)$ 都是 $(N + 1)$ 维列向量. 在 W_j 中第 j 个元素为 1, 第 $[C]$ 个元素为 -1 , 其它元素为 0.

为了求解式 (16) 的非齐次线性微分方程组, 首先需要解下面的齐次线性微分方程组:

$$D_G \frac{\partial G(x)}{\partial x} = M_G G(x). \quad (18)$$

令矩阵 $D_G^{-1} M_G$ 的 $N + 1$ 个特征根为 $y_0, \dots, y_N$, 对应的特征向量 $\psi_0, \dots, \psi_N$, 微分方程 (18) 的解可以表示为

$$G(x) = \sum_{i=0}^N b_i \psi_i e^{y_i x}.$$

这里 b_i 是待定常数. 根据 D_G, M_G 的具体形式, 第 i 个特征根为

$$y_i = i\lambda.$$

也就是有 $(N + 1)$ 个不同的特征根, 因此对应每个

特征根有一个特征向量.

如果找到方程 (16) 的一个特解 $G_0(x)$, 那么 (16) 的通解可以表示为

$$G(x) = \sum_{i=0}^N b_i \psi_i e^{y_i x} + G_0(x).$$

下面我们寻找 $G_0(x)$. 注意到设 $\theta_j(x)$ 是方程

$$D_G \frac{\partial G(x)}{\partial x} = M_G G(x) + W_j. \quad (19)$$

的一个特解, 那么 $G_0(x) = \sum_{j=[C]+1}^N (j - C) G'_j(V) \theta_j(x)$

是方程 (16) 的一个特解. 因此, 我们只需逐一对 $j = [C] + 1, \dots, N$ 求解 (19). 令 $c_j = (j - C) G'_j(V)$, 方程 (16) 的通解可以表示为

$$G(x) = \sum_{i=0}^N b_i \psi_i e^{y_i x} + \sum_{j=[C]+1}^N c_j \theta_j(x).$$

以上分别写出 $F_i(x)$ 的基本形式和 $G_i(x)$ 的基本形式, 但是这些形式中包含若干待定常数 a_i, b_i, c_i , 需要通过一些边值条件和归一化条件来确定这些常数.

首先, 当 $i > C$ 时, 缓冲区的占有量必定在上升, 因此这时必有

$$F_i(0) = 0, \quad i > C. \quad (20)$$

其次, 当 $i < C$ 时, 缓冲区的占有量必定在降低, 因此这时必有

$$G_i(V) = 0, \quad i < C. \quad (21)$$

而且, 当 $i > C$ 时, 缓冲区一旦溢出, 结点将立刻使若干数据包变为丢弃状态, 使传送数据的带宽小于 C , 从而缓冲区的容量处于降低的状态, 因此必有

$$G_i(V) = 0, \quad i > C. \quad (22)$$

设 $i < C$, $\Delta t > 0$ 且很小. 当系统处于平稳状态, $t + \Delta t$ 时刻, ξ_t 满足

$$T + (i - C)\Delta t \leq \xi_t < T,$$

且有 i 个数据包处于正常状态的事件的概率为 $F_i(T) - F_i[T + (i - C)\Delta t]$. 当 $\Delta t \rightarrow 0$, 这一事件发生有两种可能性, 一种是 t 时刻, ξ_t 满足

$$T \leq \xi_t < T - (i - C)\Delta t,$$

且有 i 个数据包处于正常状态 (这一事件发生的概率为 $G_i(T) - G_i[T - (i - C)\Delta t]$), 且在 Δt 时间内, N 个虚连接的状态没有发生迁移. 这一事件发生的

条件概率为 $1 - i \cdot \lambda \Delta t$; 另一种是 t 时刻, ξ_t 满足

$$T + (i - C)\Delta t \leq \xi_t < T,$$

且有 $i - 1$ 个数据包处于正常状态 (这一事件发生的概率为 $F_{i-1}(T) - F_{i-1}[T + (i - C)\Delta t]$), 且在 Δt 时间内, 发生了一个处于数据丢弃状态的数据包结束, 新的数据包开始的事件, 这一事件发生的条件概率是 $[N - (i - 1)]\lambda \Delta t$. 这样, 下式成立

$$\begin{aligned} F_i(T) &= F_i[T + (i - C)\Delta t] \\ &+ \{G_i(T) - G_i[T - (i - C)\Delta t]\} \cdot (1 - i \cdot \lambda \Delta t) \\ &\cdot \{F_{i-1}(T) - F_{i-1}[T + (i - C)\Delta t]\} \\ &\cdot [N - (i - 1)]\lambda \Delta t + o(\Delta t). \end{aligned}$$

所以, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 应有

$$\left. \frac{\partial F_i(x)}{\partial x} \right|_{x=T} = - \left. \frac{\partial G_i(x)}{\partial x} \right|_{x=T}. \quad (23)$$

类似可以证明 $i > C$ 时的情况.

综合 (20), (21), (22) 以及 (23) 可得

$$\begin{cases} F_i(0) = 0, i > C, \\ G_i(V) = 0, \\ F'_i(T) + G'_i(T) = 0. \end{cases} \quad (24)$$

以上共有 $3N - [C]$ 个方程, 而 a_i, b_i, c_i 共 $3N - [C]$ 个未知数, 因此这 $3N - [C]$ 个方程以及下面的归一化方程

$$\sum_{i=0}^N F_i(T) + \sum_{i=0}^N G_i(T) = 1.$$

就可以求出 a_i, b_i, c_i 了.

4 数据包尾部丢弃的分析

我们对数据包提前丢弃技术进行修改, 使当其缓冲区占有量 $\xi_t > T$ 时, 结点仍然接受新开始的数据包, 而不是丢弃, 这时数据包提前丢弃技术就变成了数据包尾部丢弃技术. 因此, 将上一节描述数据包提前丢弃技术的微分方程中的 M_G 用 M_F 替代, 就得到描述数据包尾部丢弃的微分方程. 整个计算过程完全不变.

5 性能的计算

在本节中, 我们讨论以包为单位的性能指标的计算. 定义输出线路上的完整数据包与输出线路上的总数据包个数之比为完整输出率 (goodput). 我们将给出完整输出率的计算公式.

首先, 我们计算一个数据包被结点拒绝而丢失

的概率. 结点将数据包丢弃包含两种可能, 一种是因数据包的开始信元到达结点时, 缓冲区的占有量超过门限 T , 设发生这种丢失的概率为 P_1 ; 另一种是虽然数据包的开始信元到达结点时, 缓冲区的占有量小于门限 T , 但却在传输该数据包的过程中发生缓冲区溢出, 造成该数据包部分丢失, 结点将它后面的部分信元丢弃, 设发生这种丢失的概率是 P_2 .

P_1 是比较好求的. 设当结点的系统处于平稳状态, 一个数据包的第一个信元到达结点时刻, 结点的缓冲区容量 ξ_t 小于门限 T 的概率为 $\sum_{i=0}^N F_i(T)$, 而

$\xi_t > T$ 的概率为 $\sum_{i=0}^N G_i(T)$. 因此

$$P_1 = \sum_{i=0}^N G_i(T).$$

P_2 的求得不是那么的明显. P_2 是当结点处于平稳状态时, 在一段时间内到达结点的数据包与因缓冲区溢出而丢弃的数据包个数之比. 考虑在 Δt 时间内发生数据包到达与缓冲区溢出之间的关系: 发生一个数据包到达的概率 $N\lambda\Delta t$, 发生多个数据包到达的概率为 $o(\Delta t)$; 而只要 $i > C$, 且 t 时刻, 满足

$$V - (i - C)\Delta t \leq \xi_t < V, \quad (25)$$

就有可能在未来的 Δt 时间内发生缓冲区溢出, 进一步说, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, 上式定义的事件与 Δt 时间内发生缓冲区溢出的事件是相等的. 满足 (25) 条件的事件发生的概率为 $G_i[V - (i - C)\Delta t]$, 该事件发生将造成 $i - [C]$ 个数据包由正常状态变为丢弃状态. 因此用下式可以近似 P_2 .

$$P_2 \approx \frac{1}{N\lambda\Delta t} \sum_{i=[C]+1}^N G_i[V - (i - C)\Delta t] \cdot (i - [C]).$$

特别地, 令 $\Delta t \rightarrow 0$, 就可以得到

定理 因缓冲区溢出而丢失的数据包的概率为

$$P_2 = -\frac{1}{N\lambda} \sum_{i=[C]+1}^N (i - C)(i - [C]) \left. \frac{\partial G_i(x)}{\partial x} \right|_{x=V}. \quad (26)$$

一旦求得 P_1 和 P_2 , 完整输出率也就求出了:

$$\text{goodput} = \frac{1 - P_1 - P_2}{1 - P_1}.$$

图 2 和图 3 分别是计算和仿真得到的网络结点的有效输出率与 N 的关系, 采用的参数是 $C = 1.7$, $V = 5$, $T = 3$, 而 λ 分别为 0.2, 0.3, 0.4. 比较两个图的结果, 可以发现图线相当吻合, 证明本文给出的

计算公式是正确的. 另外, 若 λ 减小, $\frac{1}{\lambda}$ 增大, 也就是数据包平均长度变长, 这时, 缓冲区溢出的可能性变大, 因此有效输出率变小. 图中还说明随着 N 的增大, 网络结点的负载变大, 有效输出率变小.

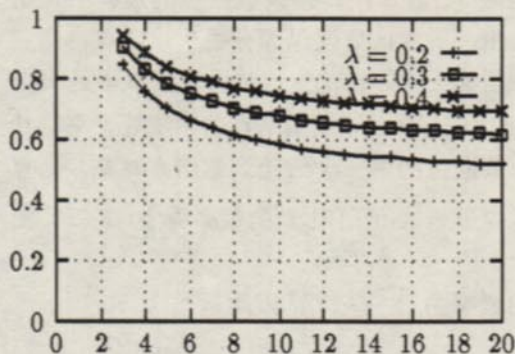


图 2 完整输出率与 N 的关系 (计算)

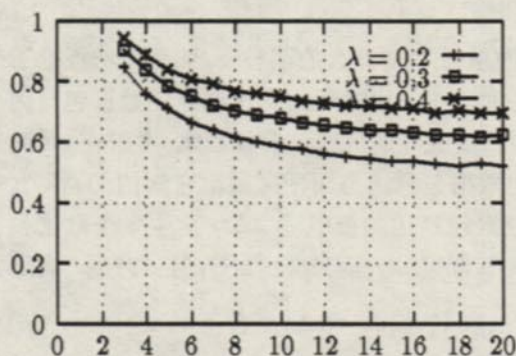


图 3 完整输出率与 N 的关系 (仿真)

6 数据包提前丢弃中的最优问题

上节性能指标是以数据包为单位的, 因此传输一个 200 字节的数据包与传输一个 2000 字节的数据包对性能指标的贡献是相同的. 但很明显, 传输这两个数据包需占用不等的网络资源. 故本节以比特为单位, 考查数据包丢弃技术的完整输出率.

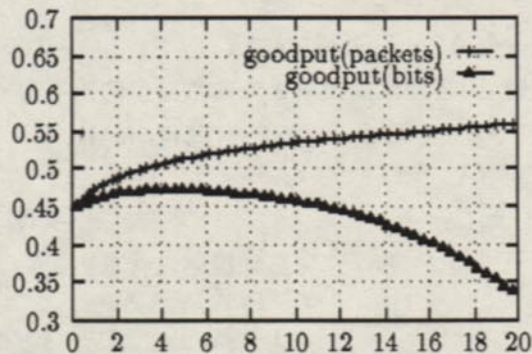


图 4 完整输出率与门限 T 的关系 (仿真)

图 4 是仿真得到的网络结点的完整输出率与 T 的关系, 采用的参数是 $C = 1.7$, $V = 20$, $N = 3$, $\lambda = 0.05$. 我们看到, 以包为单位的完整输出率是一个单调上升曲线, 而以比特为单位的完整输出率是凸的, 最大值取在 $T = 4$ 附近. 因此, 对于数据包提前丢弃问题, 存在最优门限值问题. 如何计算以比特为单位的完整输出率, 以及如何计算最优门限值, 是今后研究的课题.

7 结论

本文采用随机的连续的流量模型, 对数据包丢弃技术中的典型技术—数据包提前丢弃进行了一定的分析, 给出了采用这种技术的结点的缓冲区的平稳分布的计算方法. 本文给出了采用数据包丢弃技术的结点的完整输出率 (以包为单位) 的计算公式. 同时, 通过仿真指出对于数据包提前丢弃技术, 存在寻找最优门限值问题. 数据包丢弃技术已从实验阶段走向实用, 在一些新的 ATM 交换机设计被采纳 [4].

参考文献

- 1 许飞, 许晓鸣, 孙海荣等. TCP over ATM 的拥塞控制研究进展. 通信学报, 1999, 20(1): 56-63
- 2 Turner J S. Maintaining high throughput during overload in ATM switches. Proc. INFOCOM' 96, April, 1996, 287-295
- 3 Casoni M and Turner J S. On the performance of early packet discard. IEEE JSAC, June, 1997
- 4 Chaney Tom, Fingerhut J A, Fluke M, Turner J S. Design of a gigabit ATM switch. Proc. INFOCOM', 1997
- 5 Lapid Y, Rom R. and Sidi M. Analysis of discarding policies in high-speed networks. IEEE JSAC, 1998, 16(5): 764-777
- 6 Kawahara K, Kitajima K, Takine T. and Oie Y. Packet loss performance of selective cell discard schemes in ATM switches. IEEE JSAC, 1997, 15(5): 903-913
- 7 Schwartz M. Broadband Integrated Networks. New York: Prentice Hall Inc, 1996
- 8 Anick D, et al. Stochastic theory of a data-handling system with multiple sources. Bell System Tech. Journal, 1982, 61: 1871-1894