

多级互连网在多速率业务环境下的阻塞分析¹

贺飞云 闻慧生 蔡元龙

(西安交通大学信息与通信工程系 西安 710049)

摘 要 本文提出了一种估计多级互连网在多速率业务环境下的阻塞率的方法。它可用在多速率线路交换和 ATM 交换系统中。文中首先给出了分析方法,并用计算机仿真验证了分析模型。然后对影响阻塞率的因素进行了分析。研究表明,交换模块的大小和业务的带宽对阻塞率影响极大。同时与无阻塞交换相比,有阻塞交换结构可大大降低系统的复杂性。

关键词 阻塞分析, 多级互连网, 宽带综合业务数字网

中图分类号 TN913.2

1 引 言

近年来,宽带综合业务数字网(B-ISDN)获得人们的极大关注。在B-ISDN中,不同速率的业务被分成固定长的分组,各分组以统计复用的方式在网中传输。因而一个连接占用交换网络链路的带宽可以为任意百分比。在呼叫建立期为每一连接选择通路时,为保证通信质量,通路上各链路的可用带宽必须能满足连接业务的需求,当需要的链路被别的连接占用而不能满足时,该连接请求被拒绝。一个连接请求被拒绝(阻塞)的概率是衡量一个网络性能的重要指标。当然,阻塞可以通过提供更多的通过网络的通路或提高交换网内部链路的速率来减小,甚至避免。但这样会引起系统复杂性和实现代价的提高。多级互连网是由简单的交换单元以一定方式互连形成的网络,在线路交换和多速率ATM交换中得到普遍应用。在多级互连网中,由于级间链路的共享,一般存在阻塞问题。网络的分析模型是估计网络阻塞特性的方法。在传统的线路交换中已提出许多估计网络阻塞特性的分析模型^[1,2]。在这些模型中,文献[2]中Lee的模型是概念上最简单,也是最著名的。它基于静态模型,以网络的承载业务为基础,得到了阻塞率的保守估计。Pipenger^[1]考虑了链路间的相关性,扩展了Lee的方法,但它也是针对线路交换而言的。关于多速率环境下多级网的阻塞特性的研究还不多。文献[3]分析了网络拓扑在多速率环境下的无阻塞条件。文献[4]以网络到达业务为基础研究了多速率环境下的阻塞特性。

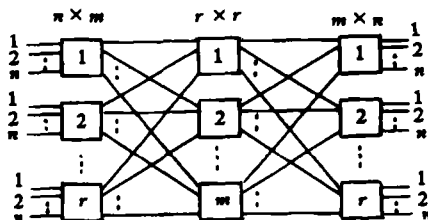


图 1 多级交换网络 $V(n, m, r)$

¹ 1995-04-28 收到, 1995-12-11 定稿

西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室开放项目资助课题

本文研究多级网在多速率环境下的阻塞特性。我们考虑如图 1 所示的三级对称 Clos 网。假设各模块是无内部阻塞的。网络用 $V(n, m, r)$ 表示。其中 n 为输入级模块的入线数, m 为输入级模块的出线数, r 为输入级模块个数。遵循 Lee 的方法^[2], 我们以网络的承载业务为基础, 提出了一种分析网络阻塞特性的估计方法, 并对影响阻塞特性的因素进行了分析。

2 Lee 模型

在线路交换网络中最初用分析方法来估计网络阻塞特性的是 Lee 提出的模型^[2]。它也是从概念和计算上都很简单的方法。在线路交换中, 一个连接使用一条链路的全部带宽。在 Lee 模型中, 假设每条链路忙的概率为 P , 闲的概率为 $q = 1 - P$, 各链路的忙闲状态与其他链路的状态互相独立。这样对一个 $V(n, m, r)$ 的网络, 如用 P_B 表示阻塞率, 则

$$P_B = (1 - q^2)^m = (1 - (1 - P)^2)^m \quad (1)$$

在已知 P 或 q 时, 即可由上式计算阻塞率 P_B 。

3 多速率环境下的阻塞率

在本节中我们将 Lee 模型的方法扩展到多速率环境。由上节可知, Lee 模型的应用需已知链路的占用概率。我们知道, 多级网中的阻塞是由于内部链路的资源占用使空闲资源不能满足连接请求所需的资源而引起的。在线路交换中, 一个连接使用一条链路的全部带宽。因而链路占用状态可用一个链路的忙闲概率 p 来表示和描述。而在多速率环境下, 一个连接可使用一条链路的任意带宽 (由业务本身的带宽决定)。链路的占用可取 0 — 1 之间的任意值。因而必须用链路占用的概率分布来表示链路的占用情况。链路的占用分布一般取决于连接的带宽, 连接业务的到达和保持时间等多种因素。所以一般化的占用分布估计是困难的。用根据一定的业务带宽分布下一条链路的占用概率来近似所有链路的占用情况是常用的近似方法。假设提供给链路的业务负荷由几种不同类型的业务组成, 业务的到达为泊松分布, 服务时间为任意分布, 则链路的占用概率可用文献 [5] 中的数字迭代算法求出。但该算法是利用网络的到达业务估计的。而 Lee 模型中的链路忙概率反映的是链路实际的承载业务, 且多速率环境下承载业务与到达业务是不同的。因而本文提出一种基于承载业务的链路占用概率估计方法, 它应获得更好的结果。

3.1 假设和符号表示

假设一个交换网络的内部链路的带宽为 1, 我们将链路分为 k ($k \geq 1$ 的整数) 个基本带宽单元, 则 $1/k$ 为一个基本带宽单元的带宽。假设连接业务的带宽需求是基本带宽单元的倍数, 需要 ω 个基本带宽单元的连接业务用 ω 表示, ω 叫做连接业务的倍数因子。对于一个有 s 类业务的情况, 通过选择适当大的 k 可精确地用 ω 表示业务的带宽需求。当考虑一个具有倍数因子 ω 的业务连接时, 假设链路是由能支持该连接的若干信道组成, 这样在网络的一个入出间建立一个 ω 连接时, 必须在入出通路间的每一条链路上有一个空闲的 ω/k 带宽的信道。一个 ω 业务连接的阻塞率是找不到这样的通路的概率。与 Lee 模型一样, 假设这些信道是互相独立的。我们推导当网络有 s 类背景业务时一条内部链路的占用概率, 且使用下列符号表示: λ 为链路的平均业务负荷; α_i ($i = 1, 2, \dots, s, \sum_{i=1}^s \alpha_i = 1$) 为第 i 类业务占用总负荷的份额; ω_i ($i = 1, 2, \dots, s$) 为第 i 类业务的倍数因子; k 为链路的倍数因子; X_i ($i = 1, 2, \dots, s$) 为随机变量, 表示链路上第 i 类业务的个数; Y 为业务占用链路随机变量。

3.2 链路占用概率分布分析

为了使推导的链路占用概率与承载业务有关, 我们采用下列方法来产生链路上有 s 类业务时链路的随机状态。令链路上的 s 类业务按倍数因子 ω_i 的大小排序, $\omega_1 > \omega_2 > \dots > \omega_s$ 。我们从具有最大带宽需求的 ω_1 类业务开始分配信道, 此时将链路看作由具有 ω_1/k 带宽的信道组成, 则共有 $\lfloor k/\omega_1 \rfloor$ 个信道。其中 $\lfloor x \rfloor$ 表示小于等于 x 的最大整数。由上假设, ω_1 类业务平均到达为 $\alpha_1 \lambda$, 则以 $\alpha_1 \lambda$ 为平均业务在 $\lfloor k/\omega_1 \rfloor$ 个信道上分配 ω_1 业务时, 每一信道忙的概率为 $\alpha_1 \lambda$ 。分配完 ω_1 后, 在剩余信道上以同样的方式分配 ω_2 。直到分完 ω_s 。这种以倍数因子从大到小的分配方法产生链路的状态, 可以保证每类业务以指定的均值复用到链路上。而不会因为因剩余带宽不够而使具有大倍数因子的业务占不到应有的份额。在实际网络中, 呼叫分配过程可能产生不同的分布, 但上述过程仅是一个产生对应于给定承载业务, 而不是到达业务的随机状态的方法。利用这样的方法, 我们有下列分析。令 Y_j 为分配完 j 类业务后的链路占用随机变量, 则

$$Y_j = \sum_{i=1}^j \omega_i X_i, \quad 1 \leq j \leq s. \quad (2)$$

分配 ω_1 类业务时, 链路上没有其它业务, 则 Y_1 的分布为:

$$P(Y_1 = y_1) = \begin{cases} P(X_1 = \lfloor y_1/\omega_1 \rfloor), & y_1 \bmod(\omega_1) = 0 \\ 0, & \text{其它}. \end{cases}$$

X_1 为 ω_1 类业务的个数, 假设 X_1 随机变量为二项分布, 则

$$P(X_1 = \lfloor y_1/\omega_1 \rfloor) = \binom{\lfloor k/\omega_1 \rfloor}{\lfloor y_1/\omega_1 \rfloor} (\alpha_1 \lambda)^{\lfloor y_1/\omega_1 \rfloor} (1 - \alpha_1 \lambda)^{\lfloor k/\omega_1 \rfloor - \lfloor y_1/\omega_1 \rfloor}. \quad (3)$$

由上可见, 如果 k 是 ω_1 的倍数时, 分完 ω_1 类业务后链路业务负荷均值正好为 $\alpha_1 \lambda$; 当 k 不是 ω_1 的倍数时, 链路平均业务负荷稍大于实际。第 2 类以后业务的分配与前面已分配的业务有关, 它们只能在剩余的带宽中分配。当 $j \geq 2$ 时, 设前面 $j-1$ 类业务分完后链路占用概率分布为 $P(Y_{j-1} = y_{j-1})$, 而 $P(X_j = x_j | Y_{j-1} = y_{j-1})$ 为当有 y_{j-1} 个基本带宽单元已被分配时, 分配 x_j 个 j 类业务的条件概率。此时 $k - y_{j-1}$ 个基本带宽单元可用于分配。令 β_j 为在空闲带宽中分配 ω_j 类业务时一个信道忙的概率, 则 $\beta_j = \alpha_j \lambda / (1 - \sum_{i=1}^{j-1} \alpha_i \lambda)$, 同样假设在 $Y_{j-1} = y_{j-1}$ 条件下 X_j 仍为二项分布, 则

$$P(X_j = x_j | Y_{j-1} = y_{j-1}) = \binom{\lfloor (k - y_{j-1})/\omega_j \rfloor}{x_j} \beta_j^{x_j} (1 - \beta_j)^{\lfloor (k - y_{j-1})/\omega_j \rfloor - x_j}. \quad (4)$$

所以分完 j 类业务后链路占用概率分布为

$$P(Y_j = y_j) = \sum_T P(X_j = x_j | Y_{j-1} = y_{j-1}) P(Y_{j-1} = y_{j-1}), \quad (5)$$

其中 T 为满足 $y_j = \omega_j x_j + y_{j-1}$ 的所有 x_j 和 y_{j-1} 的集合。利用上述公式, 当 $j = s$ 时所得的 $P(Y_s = y)$ 即为分完全部 s 类业务后链路的占用概率分布。

3.3 $V(n, m, r)$ 网络的阻塞率

上述 $P(Y_s = y)$ 为链路上有 s 类业务时链路的占用概率分布, 显然在有 s 类业务的链路上对具有倍数因子 ω 的连接的阻塞率即为不存在 ω 个基本带宽单元的概率。如用 $P(\omega)$ 表示一条链路对 ω 连接业务请求的阻塞率, 则

$$P(\omega) = \sum_{y=k-\omega+1}^k P(Y_s = y). \quad (6)$$

用上述 $P(\omega)$ 代替 Lee 模型中的 p , 即可得 $V(n, m, r)$ 网络对具有倍数因子 ω 的连接的阻塞率

$$P_B(\omega) = \{1 - [1 - P(\omega)]^2\}^m. \quad (7)$$

4 仿真验证

为了验证分析结果, 进行了计算机仿真。采用离散事件仿真器, 输入参数为每类业务平均到达间隔和平均保持时间均为负指数分布, 在仿真时测量平均业务负荷。当实测的平均业务负荷达到要求的值后开始收集数据, 仿真时间为处理 100 万个业务呼叫, 采用 95% 的置信度。

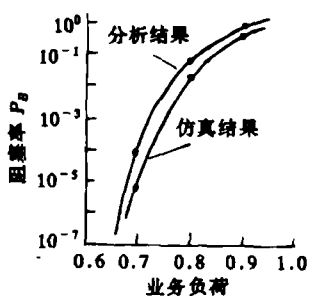


图 2 仿真与分析结果比较

图 2 给出了在下列参数下对最大带宽需求业务 (32Mbit/s) 的阻塞率的分析 and 随机选路方式下的仿真结果。假设对 $V(8, 8, 16)$ 的多级网, 链路速率为 150Mbit/s, 有三类业务, 它们的速率分别为 32Mbit/s, 12Mbit/s, 8Mbit/s。对应的 α_i 分别为 0.2, 0.3, 0.5。从图可见分析结果的阻塞率比仿真更大, 说明它是有保守的估计。它们相差不大。说明它有良好的精度。

5 影响阻塞率的因素

本节利用分析方法研究影响阻塞率特性的因素, 并比较无阻塞设计与有阻塞设计所需的扩展因子 m/n 。图 3 为在网络参数与上节相同的情况下对不同连接业务的阻塞率。其中 A, B, C 分别对应 32Mbit/s, 12Mbit/s, 8Mbit/s。可见宽带业务的阻塞率更大。这说明设计有阻塞交换网络时, 应以最大带宽的业务的阻塞率为准。图 4 示出业务带宽间的影响。假设有两类业务 A 和 B, 其中 A 类业务带宽大于 B 类, 它们各占总业务的一半 ($\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$)。图中 a, b, c 分别为 A 类业务带宽为 48Mbit/s, 32Mbit/s, 16Mbit/s, B 类业务为 8Mbit/s 时, 网络 $V(8, 8, 16)$ 对 A 类业务的阻塞率。可见随着 A 类业务带宽的增宽, 阻塞率增加很快。本文也研究了 B 类业务带宽增宽时对 A 类业务阻塞率的影响。一般 B 类业务带宽增宽, 阻塞率增加, 但增加很慢。图 5 为不同业务份额的影响。假设三类业务分别为 32Mbit/s, 8Mbit/s, 2Mbit/s, 网络业务负荷为 0.8, 其余参数同第 4 节中的假设。图 5 示出不同 α_i 时对 32Mbit/s 连接业务的阻塞率。从图可见宽带业务增加和窄带业务减小都会使阻塞率下降, 但影响均不十分明显。

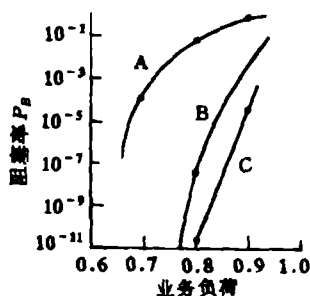


图 3 不同业务的阻塞率

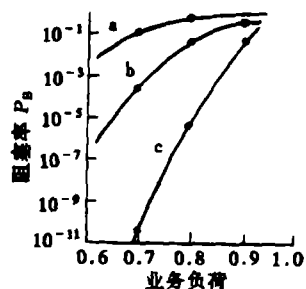


图 4 业务带宽的影响

表 1 不同模块大小的扩展因子 m/n 与阻塞率 (32Mbit/s)

n	8			16			32		
m	8	9	10	16	17	18	32	33	34
m/n	1	1.125	1.25	1	1.0625	1.125	1	1.03125	1.0625
$P_B(\omega)$	9.19×10^{-2}	1.95×10^{-6}	2.73×10^{-12}	8.45×10^{-3}	7.08×10^{-7}	3.81×10^{-12}	7.14×10^{-5}	1.59×10^{-8}	5.01×10^{-13}

表 2 无阻塞网络的扩展因子 m/n (32Mbit/s)

n	8	16	32
m	19	41	81
m/n	2.375	2.5625	2.53125

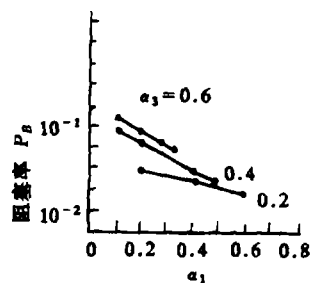


图 5 业务份额的影响

我们也研究了不同模块大小 (n, m) 时的阻塞率。表 1 给出在与图 5 一样的参数假设下, 取 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为 0.2, 0.3, 0.5 时不同的 n, m 对 32Mbit/s 业务的阻塞率。可见 n 越大, 要达到一定的阻塞率所要求的 m/n 越小。且对一定的 n , 阻塞率随 m 的增加下降很快, 因而对一定的阻塞率要求, m 略大于 n 即可满足。

最后我们比较了无阻塞设计与有阻塞设计对硬件的需求, 即扩展因子 m/n 。假设对网络 $V(n, m, r)$, 外部链路的速率为 v , 内部链路速率为 $sv (s \geq 1)$, 则对于具有速率 ω 的业务的无阻塞条件为^[6]: $m \geq 2[(n\nu - \omega)/(s\nu - \omega + \delta)] + 1$, δ 为大于 0 的小正数。由于 ω 大时要求的 m 也大, 为与有阻塞设计比较, 取 $v=150\text{Mbit/s}, s=1, \omega=32\text{Mbit/s}$, 不同 n 时所需的 m 和 m/n 示于表 2。与表 1 相比, 无阻塞设计所需的扩展因子大约是有阻塞设计的两倍。从而说明有阻塞设计对实际可接受的阻塞率可大大减小硬件复杂性。

结 束 语

本文提出了一种估计多级网在多速率环境下的阻塞率的方法,并对影响阻塞率的因素进行了分析。分析结果显示,业务的带宽和交换模块的大小都对阻塞率有很大影响。同时与无阻塞交换结构相比,有阻塞交换结构可大大降低硬件复杂性。需要指出,本文的分析是对 Lee 模型的扩展,它假定链路间是互相独立的。得到阻塞率的保守估计。如何考虑链路间的相关性有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] Pipenger N. On crossbar switching networks. IEEE Trans. on Commun.,1975,COM-23(6):646-659.
- [2] Lee C. Analysis of switching networks. Bell system Tech. J., 1955, 34(11): 1287-1315.
- [3] Melen R, Turner J S. Nonblocking networks for fast packet switching, in Proc. of IEEE INFOCOM, Ottawa, Canada: 1989, 548-557.
- [4] Fitzpatrick G J, et al. Analysis of large-scale three-stage networks serving multirate traffic,teletraffic and datatraffic in a period of change, ITC-13, Denmark: 1991, 905-910.
- [5] Kaufman J S. Blocking in a shared resource environment. IEEE Trans. on Commun.,1981,COM-29(10):1474-1481.
- [6] Sakurai Y, et al. Large-scale ATM multistage switching network with shared buffer memory switches. IEEE Commun.Mag.,1991,29(1):90-96.

AN ANALYSIS OF BLOCKING IN MULTISTAGE INTERCONNECTION NETWORKS SERVING MULTIRATE TRAFFICS

He Feiyun Wen Maosheng Cai Yuanlong

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract The paper proposes an estimation method of blocking in multistage interconnection networks serving multirate traffics. It can be used in multirate circuit switching and ATM switching systems. In this paper, an analysis of blocking is given. The accuracy of the model is tested by simulation and some factors which influence the blocking are compared. The study shows that the modular size and service bandwidth play an important role in the blocking behavior. Compared with non-blocking design, blocking design can reduce the complexity of hardware considerably.

Key words Blocking analysis, Multistage interconnection networks, Broadband integrated service digital networks

贺飞云: 男, 1963 年生, 博士生, 专业为通信与电子系统.

闻懋生: 男, 1936 年生, 博士生导师, 从事专业为通信与电子系统.

蔡元龙: 男, 1928 年生, 教授, 博士生导师, 从事专业为通信与电子系统.