

输入排队 Crossbar 架构下的流量模型

马祥杰, 兰巨龙, 毛军鹏, 张百生

(解放军信息工程大学信息工程学院, 河南郑州 450002; 国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南郑州 450002)

摘 要: 本文基于 IP 包在路由器各端口到达流量的统计特性, 建立了输入排队 Crossbar 架构下的流量模型, 对 IP 包流量的平均到达速率、突发性和均衡性等流量特征进行了分类定义, 给出了各自的充要条件. 文中所讨论的突发度 B 和不均衡度 U 为到达流量提供了精细的计算粒度, 从而为基于 IQ-VOQ 的调度算法性能评估提供了理论依据. 与 LAN 的自相似模型、WAN 的 Poisson 模型以及数据业务的 ON/OFF 模型相比, 本文讨论的流量模型更适用于基于 IQ-VOQ 调度算法性能的精确评估, 为路由器交换架构的工程设计提供了理论依据.

关键词: 到达流量; 到达速率; 容许流量; 突发流量; 均衡流量

中图分类号: TN919. 21 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 01-0170-05

Traffic Model for Input-Queued Crossbar Fabric

MA Xiang jie, LAN Ju long, MAO Jun peng, ZHANG Bai sheng

(Information Engineering Institute, PLA Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450002, China;

National Digital Switching System Engineering and Technological R&D Center, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: Traffic model has been set up for input queued Crossbar fabric in this paper. Precise definitions for arrive traffic are given according to the cell's arrive rate, burst and balance. Meanwhile, existence theorems of different kinds of traffic are also provided and proved, respectively. Precisely computing granularity is provided by the burst degree B and the unbalance degree U discussed in the model. The traffic model provided in this paper offers a theoretical reference to the evaluation of scheduling algorithms based on IQ-VOQ scheme. As compared with the self similarity model in LAN, the Poisson model in WAN and the ON/OFF model of data services, the traffic model proposed in this paper is more adapt to the precise evaluation of scheduling schemes based on IQ-VOQ Crossbar fabric, and therefore the theory reference is provided for designing the switching fabric schemes.

Key words: arrive traffic; arrive rate; admissible traffic; burst traffic; balanced traffic

1 引言

随着宽带流媒体业务的迅速发展, 宽带网络需要研制大容量路由器. 研究更为先进的交换结构和调度策略则是大容量路由器的关键技术. Crossbar 具有无阻塞、易于实现等优点, 是目前主流路由器广泛采用的交换结构. 图 1 为输入排队的 3×3 Crossbar 交换架构的逻辑结构图, 信元按照目的端口分别在虚拟输出队列 (VOQ) 排队^[1,2], 它有效的解决了信元输入排队的队头阻塞问题. 基于输入排队 Crossbar 交换架构的队列调度算法, 如 PIM, RRM 和 iSLIP 及其衍生算法, 在到达流量为均匀独立同分布的假设下获得了理想的性能. 文献[3, 4] 分别给出了 PIM 和 iSLIP 的实现机制和性能验证. 文献[5] 对上述迭代算法进行了量化评估, 发现在突发流量和不均衡流量情况下这些算法不再收敛. 而网络中数据业务流量往往具有很强的突发性, 大容量路由器选用的调度

算法必须适用各种流量模式. 文献[6] 在对独立业务源的流量统计分析的基础上发现了局域网络中流量的自相似特性. 文献[7] 对 WAN TCP 到达流量进行了分析, 指出了用传统 Poisson 流量模型存在的缺陷与不足. 文献[8] 讨论了数据传输业务的 ON/OFF 流量模型. 由此可见, 上述文献对网络流量的研究仅针对特定的网络环境或者特定的应用协议, 而对于路由器各输入队列流量到达情况的研究却很少, 现有的 IQ Crossbar 调度算法仅用 Poisson 模型去逼近均匀流量的情况, 用 ON/OFF 模型去逼近突发流量的情况^[4], 这些模型的模糊性影响了调度算法性能评估的精确度. 本文从随机过程和数理统计等基础理论出发, 在给出输入子队列到达流量的五条基本特性的基础上, 建立了 IQ-VOQ 的流量模型, 给出了到达流量、到达速率、容许流量、突发流量以及均衡流量数学定义, 并推导了各种流量类型判定的充要条件, 为构建和评价高性能调度算法提供了流量模型.

收稿日期: 2006-01-20; 修回日期: 2008-08-25

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划 (No. 2007CB307102)

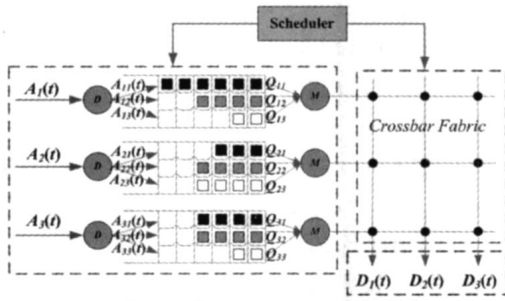


图1 基于IQ的3x3Crossbar交换架构

为了便于说明,我们在本文中约定如下: 交换网络特指 $N \times N$ 的 IQ-VOQ Crossbar 交换结构; 信元特指由 IP 分组切片后形成的等长数据包, 长度 L (Cell) 一般为 512bits 或 64bytes; 时隙 T (Cell) 特指在链路速率为 R 的条件下, 发送或接收一个信元的时间。

2 IQ-VOQ 流量模型

2.1 IQ-VOQ 到达流量与到达速率

IQ-VOQ 是输入排队 Crossbar 架构的基本缓存单元, 它的到达流量可以反映路由器各输入端口的流量分布情况, 其到达流量定义如下:

定义 1(到达流量) 假设输入端口为 i 中输出端口为 j 的 VOQ 子队列记为 $Q_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, N)$, 状态空间记为 $I = \{i_k; i_k = 0, 1, 2, \dots\}, [0, +\infty)$ 上的时间参数集记为 T , 若对于任意 $t \in T$, 如果随机过程 $A_{ij}(t)$ 满足:

- (a) $A_{ij}(0) = 0$;
- (b) $A_{ij}(t) = i_k, i_k \in I, \forall t \in T$;
- (c) $A_{ij}(t_2) - A_{ij}(t_1) \geq 0, \forall t_1, t_2 \in T$ 且 $t_2 \geq t_1 \geq 0$;
- (d) $A_{ij}(t)$ 与 $A_{kl}(t)$ 相互独立,
 $\forall i, j, k, l \in \{1, 2, \dots, N\}, i \neq j$ 或 $k \neq l$;
- (e) $[A_{ij}(t_2) - A_{ij}(t_1)]$ 与 $[A_{ij}(t_4) - A_{ij}(t_3)]$ 相互独立,
 $\forall t_1, t_2, t_3, t_4 \in T$ 且 $t_4 \geq t_3 \geq t_2 \geq t_1 \geq 0$.

则称随机过程 $\{A_{ij}(t), t \in T\}$ 是队列 Q_{ij} 在状态空间 I 上的到达流量^[9]。

定义 1 中描述了连续时间的信元到达流量。 $A_{ij}(t)$ 是一个独立增量过程, 记录了在任意区间 $[0, t]$ 内可能到达的信元个数。由式 (1) 我们可以得到交换结构的单端口到达流量 $A_i(t)$ 和总到达流量 $A(t)$:

$$A_i(t) = \sum_{j=1}^N A_{ij}(t), \forall i = 1, \dots, N; t \in T \quad (2)$$

$$A(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N A_{ij}(t), t \in T \quad (3)$$

定义 2(到达速率与平均到达速率) 假设队列 Q_{ij} 的到达流量为 $\{A_{ij}(t), t \in T\}$, 则将 $\{A_{ij}(t), t \in T\}$ 对于任意区间 $[t_1, t_2](t_2 > t_1 \geq 0)$ 上的时间期望值称为队列 Q_{ij} 的到达速率, 记作 $\lambda_{ij}(t_2, t_1)$ 定义式如下:

$$\lambda_{ij}(t_2, t_1) = {}^D E \left[\frac{A_{ij}(t_2) - A_{ij}(t_1)}{t_2 - t_1} \right]; \forall i, j = 1, \dots, N(4)$$

将单端口和总到达流量对于任意区间 $[t_1, t_2](t_2 > t_1 \geq 0)$ 上的到达速率分别记为 $\lambda_{ij}(t_2, t_1)$ 和 $\lambda(t_2, t_1)$, 其定义式如下:

$$\lambda_i(t_2, t_1) = {}^D E \left[\frac{A_i(t_2) - A_i(t_1)}{t_2 - t_1} \right] = \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}(t_2 - t_1), \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (5)$$

$$\lambda(t_2, t_1) = {}^D E \left[\frac{A(t_2) - A(t_1)}{t_2 - t_1} \right] = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}(t_2 - t_1) \quad (6)$$

由到达流量的定义可以得到:

$$\lambda_{ij}(t) = {}^D E \left[\frac{A_{ij}(t)}{t} \right], \forall i, j = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$\lambda_i(t) = {}^D E \left[\frac{A_i(t)}{t} \right] = \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}(t), \forall i = 1, \dots, N \quad (8)$$

$$\lambda(t) = {}^D E \left[\frac{A(t)}{t} \right] = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}(t) \quad (9)$$

则将 $\{A_{ij}(t), t \in T\}$ 对于整个时间参数 T 上的时间期望值称为队列 Q_{ij} 的平均到达速率, 记作 λ_{ij} , 定义式为:

$$\lambda_{ij} = {}^D \lim_{t \rightarrow \infty} \left[\frac{A_{ij}(t)}{t} \right], \forall i, j = 1, \dots, N \quad (10)$$

由队列 Q_{ij} 的平均到达速率我们得到交换结构单端口到达速率 λ_i 和总到达速率 λ 计算公式如下:

$$\lambda_i = \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}, \forall i = 1, \dots, N \quad (11)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} \quad (12)$$

到达流量描述了任意 IQ-VOQ 子队列在任意区间 $[t_1, t_2]$ 上信元的到达个数, 即 $A_{ij}(t_2, t_1) = A_{ij}(t_2) - A_{ij}(t_1)$, 反映了信元到达的多少; 而到达速率和平均到达速率则分别描述了任意时间区间 $[t_1, t_2]$ 上的信元到达速率和整个时间 T 上平均到达速率, 反映了信元到达的快慢。

2.2 IQ-VOQ 容许流量与超载流量

对于等长信元来说, 我们把满足单个时隙 T (Cell) = L (Cell) / R 内信元到达个数不超过 1 的输入流量称为容许流量 (Admissible Traffic, AT), 否则称为超载流量 (Oversubscribed Traffic, OT), 且将单个时隙内到达 L ($L > 1$) 个信元的超载流量称为 L-OT 流量。

定理 1(AT 容许流量定理) 假设交换结构单端口到达速率为 $\lambda_i(t)$, 那么交换结构信元到达过程为 AT 容许流量的充要条件是 $\lambda_i(t) \leq 1$ ($i = 1, \dots, N$)。

证明(充分性) 不妨设当 $\lambda_i(t) \leq 1$ 时到达过程为 L-OT 超载流量, 则单个时隙内到达信元数为 L ($L > 1$)。

令 $T = T(\text{Cell})$, 对于到达过程 $\{A_i(t), t \in T\}$ 满足:

$$A_i(p+1) - A_i(p) = L, p = 1, 2, \dots$$

$$\text{从而 } A_i(t) \geq \sum_{p=1}^P [A_i(p+1) - A_i(p)] = \sum_{p=1}^P L = PL,$$

其中 P 取 t 值的下限整数: $P = \lfloor t \rfloor$ (i)

由式(8)、(7)、(2)可知:

$$\begin{aligned} \lambda_i(t) &= \sum_{j=1}^N \lambda_{ij}(t) = \sum_{j=1}^N \left[E \left[\frac{A_{ij}(t)}{t} \right] \right] \\ &= E \left[\frac{\sum_{j=1}^N A_{ij}(t)}{t} \right] = E \left[\frac{A_i(t)}{t} \right] \end{aligned} \quad (\text{ii})$$

将(i)代入式(ii)得: $\lambda_i(t) \geq E \left[\frac{PL}{P} \right] = L > 1$, 这与 $\lambda_i(t) \leq 1$ 相矛盾, 所以各输入端口到达过程为容许流量。

(必要性) 由容许流量 AT 的定义可知, 到达过程 $\{A_{ij}(t), t \in T\}$ 满足:

$$0 \leq A_i(p+1) - A_i(p) \leq 1, p = 0, 1, \dots$$

$$\text{从而 } A_i(t) \leq \sum_{p=0}^{P-1} [A_i(p+1) - A_i(p)], \text{ 其中 } P \text{ 取 } t$$

值的上限整数: $P = \lceil t \rceil$ (iii)

将 $\lambda_i(t)$ 定义式可得:

$$\begin{aligned} \lambda_i(t) &= E \left[\frac{A_i(t)}{t} \right] \leq E \left[\frac{\sum_{p=0}^{P-1} [A_i(p+1) - A_i(p)]}{P} \right] \\ &\leq E \left[\frac{\sum_{p=0}^{P-1} 1}{P} \right] = E \left[\frac{P}{P} \right] = 1 \end{aligned} \quad \text{证毕.}$$

2.3 IQ-VOQ 均匀流量与突发流量

根据各输入端口到达流量在不同输出端口的分布情况, 单端口到达流量可以分为均匀流量 (Uniform Traffic, UT) 和突发流量 (Burst Traffic, BT)。

定义 3(UT 均匀流量和 BT 突发流量) 假设 IQ-VOQ 子队列 Q_{ij} 到达过程为 $\{A_{ij}(t), t \in T\}$, 如果对于任意 $k, l \in \{1, 2, \dots, N\}$ 且 $k \neq l$ 均满足: $[E|A_{ik}(t) - A_{il}(t)|]^2 = 0$, 则称 $A_i(t)$ 为 UT 均匀流量, 称端口 i 为均匀流量端口; 如果所有端口 $i (i \in \{1, 2, \dots, N\})$ 都为均匀流量端口则称交换结构的流量是均匀的。反之, 如果 $[E|A_{ik}(t) - A_{il}(t)|]^2 = B_{kl}^2, B_{kl} > 0, B^2 = \max_{k, l \in \{1, 2, \dots, N\}} (B_{kl}^2)$, 则称 $A_i(t)$ 为 $[B^2 - BT]$ 突发流量, 称端口 i 为 $[B^2 - BT]$ 突发流量端口, 参数 B 为输入端口 i 的突发度。

定理 2(均匀流量 UT 定理) 假设队列 Q_{ij} 的到达过程为 $\{A_{ij}(t), t \in T\}$, 那么 $A_i(t)$ 为 UT 均匀流量的充要条件是到达过程 $A_{ik}(t), k \in \{1, \dots, N\}$ 具有相同的数学期望。

证明(充分性) 设到达过程 $A_{ik}(t), k \in \{1, \dots, N\}$ 的数学期望为 $m_k(t) = E[A_{ik}(t)], k \in \{1, \dots, N\}$

$\because A_{ik}(t), k \in \{1, \dots, N\}$ 具有相同的数学期望,

$$\therefore m_{i1}(t) = m_{i2}(t) = \dots = m_{iN}(t) = m(t)$$

$\because A_{ik}(t)$ 与 $A_{il}(t)$ 相互独立, $\forall i, k, l \in \{1, \dots, N\}$

(由定义式(1)-(d))

$$\therefore [E|A_{ik}(t) - A_{il}(t)|]^2 = \{E[A_{ik}(t)] - E[A_{il}(t)]\}^2 = \{m_k(t) - m_l(t)\}^2 = 0$$

$\therefore A_i(t)$ 是 UT 均匀流量的。

(必要性) 如果 $A_i(t)$ 是均匀流量的, 那么对于任意 $k, l \in \{1, \dots, N\}$ 且 $k \neq l$ 均满足: $E|A_{ik}(t) - A_{il}(t)|^2 = 0$ 。

由定义式(1)-(a)和(c)知, $A_{ij}(t) - A_{kl}(0) = A_{ij}(t) - 0 = A_{ij}(t) \geq 0$

$\because A_{ik}(t)$ 与 $A_{il}(t)$ 相互独立, $\forall i, k, l \in \{1, \dots, N\}$ (由定义式(1)-(d))

$$\begin{aligned} \therefore [E|A_{ik}(t) - A_{il}(t)|]^2 &= [E|A_{ik}(t)| - E|A_{il}(t)|]^2 = \\ &= \{[E[A_{ik}(t)] - E[A_{il}(t)]]\}^2 = \{m_k(t) - m_l(t)\}^2 = 0, \\ &\forall i, k, l \in \{1, \dots, N\} \end{aligned}$$

$$\therefore m_{ik}(t) = m_{il}(t), \forall i, k, l \in \{1, \dots, N\}$$

\therefore 到达过程 $A_{ik}(t), k \in \{1, \dots, N\}$ 具有相同的数学期望。证毕。

2.4 IQ-VOQ 均衡流量与不均衡流量

根据各端口之间信元到达统计特性的差异, 到达流量可以划分为均衡流量 (Balanced Traffic, BaT) 和不均衡流量 (Unbalanced Traffic, UBaT)。

定义 4(均衡流量 BaT 和不均衡流量 UBaT)

假设端口 i 的到达过程为 $\{A_i(t), t \in T\}$, 如果对于任意 $k, l \in \{1, 2, \dots, N\}$ 且 $k \neq l$ 均满足: $[E|A_k(t) - A_l(t)|]^2 = 0$, 则称交换结构各端口到达流量是 BaT 均衡流量的; 反之, 如果 $[E|A_k(t) - A_l(t)|]^2 = U_{kl}^2, U_{kl} > 0$, 且 $U^2 = \max_{k, l \in \{1, 2, \dots, N\}} (U_{kl}^2)$, 则称交换结构为 $[U^2 - UBaT]$ 不均衡流量的, 并称参数 U 为不均衡度。

定理 3(均衡流量 BaT 定理) 假设端口 i 的到达过程为 $\{A_i(t), t \in T\}$, 那么交换结构为 BaT 均衡流量的充要条件是到达过程 $A_i(t), i \in \{1, \dots, N\}$ 具有相同的数学期望。

证明(充分性) 设到达过程 $A_i(t), i \in \{1, \dots, N\}$ 的数学期望为 $m_i(t) = E[A_i(t)], i \in \{1, \dots, N\}$

$\because A_i(t), i \in \{1, \dots, N\}$ 具有相同的数学期望

$$\therefore m_1(t) = m_2(t) = \dots = m_N(t) = m(t)$$

$\because A_{ij}(t)$ 与 $A_{kl}(t)$ 相互独立, $\forall i, k, l \in \{1, \dots, N\}$ (由定义式(1)-(d)), 且

$$A_i(t) = \sum_{j=1}^N A_{ij}(t), A_k(l) = \sum_{l=1}^N A_{kl}(t), i, k = 1, \dots, N; t \in T$$

$\therefore A_i(t)$ 与 $A_k(t)$ 相互独立, $i, k = 1, \dots, N$

$$\therefore [E|A_k(t) - A_l(t)|]^2 = \{E[A_k(t)] - E[A_l(t)]\}^2 = 0$$

$$(t) \mid j)^2 = \{m_k(t) - m_l(t)\}^2 = \{m(t) - m(t)\}^2 = 0$$

∴ 交换结构是均衡流量的.

(必要性) 如果 $A_i(t)$ 是均衡流量的, 那么对于任意 $k, l \in \{1, 2, \dots, N\}$ 且 $k \neq l$ 均满足: $[E \mid A_k(t) - A_l(t) \mid]^2 = 0$.

由定义式(1)-(a)和(c)知, $A_k(t) \geq 0, A_l(t) \geq 0$

∴ $A_k(t)$ 与 $A_l(t)$ 相互独立, $\forall k, l \in \{1, 2, \dots, N\}$ (由定义式(1)-(d))

$$\begin{aligned} \therefore [E \mid A_k(t) - A_l(t) \mid]^2 &= [E \mid A_k(t) \mid - E \mid A_l(t) \mid]^2 \\ &= \{[E \mid A_k(t) \mid] - [E \mid A_l(t) \mid]\}^2 = \{m_k(t) - m_l(t)\}^2 = 0, \\ \forall i, k, l \in \{1, \dots, N\} \end{aligned}$$

$$\therefore m_k(t) = m_l(t), \forall k, l \in \{1, \dots, N\}$$

∴ 到达过程 $A_i(t), i \in \{1, \dots, N\}$ 具有相同的数学期望. 证毕.

3 IQ VOQ 时隙到达流量

对于等长信元来说, 我们可以按照信元时隙 $T = T(\text{Cell}) = L(\text{Cell})/R$, 将时间参数 t 离散化为参数 k . 对于任意 $t \in [kT, (k+1)T]$, 令信元时隙 T 为单位 1, $n = k$, 则对于任意 $t \in [n, n+1]$, AT 容许流量满足至多到达一个信元, 即 $A_i(n+1) - A_i(n) \leq 1$. 我们得到队列 $Q_{ij}(t)$ 的时隙到达流量 $K_{ij}(t)$.

定义 5(时隙到达流量) 假设队列 $Q_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, N)$ 到达过程为 AT 容许流量, 若流量 $K_{ij}(t)$ 满足:

$$\begin{aligned} (a) K_{ij}(n) &= \begin{cases} 0, n \text{ 时隙无 Cell 到达} \\ 1, n \text{ 时隙有 Cell 到达} \end{cases}, i, j \in \{1, \dots, N\} \\ (b) E[K_{ij}(n)] &= m_{ij}, i, j \in \{1, \dots, N\} \end{aligned}$$

(13)

则称 $K_{ij}(t)$ 为队列 $Q_{ij}(t)$ 的时隙到达流量.

那么, 输入端口 i 的单端口时隙到达流量 $K_i(n)$ 和交换结构的总时隙到达流量 $K(n)$ 计算公式如下:

$$K_i(n) = \sum_{j=1}^N K_{ij}(n) = \begin{cases} 0, n \text{ 时隙无 Cell 到达} \\ 1, n \text{ 时隙有 Cell 到达} \end{cases}, i \in \{1, \dots, N\}$$

(14)

$$K(n) = \sum_{i=1}^N K_i(n) = k \leq N, k \in \{1, \dots, N\} \quad (15)$$

由定理 1 可知, 每个端口 AT 流量信元时隙到达信元数至多为 1, 所以式(14)中的 $K_i(n) \leq 1$. 式(15)中 $K(n) = k$ 表示第 n 时隙中有 k 个端口有信元到达. 由式(2)、(3)可以得到队列 $Q_{ij}(t)$ 到达流量 $A_{ij}(n)$ 、单端口离散到达流量 $A_i(n)$ 和交换结构离散总到达流量 $A(n)$ 计算公式如下:

$$A_{ij}(n) = \sum_{m=1}^n K_{ij}(m), i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (16)$$

$$A_i(n) = \sum_{j=1}^N A_{ij}(n) = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^n K_{ij}(m)$$

$$= \sum_{m=1}^n K_i(m), i \in \{1, \dots, N\} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} A(n) &= \sum_{i=1}^N A_i(n) = \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^n K_i(m) \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^n K_{ij}(m) = \sum_{m=1}^n K(m) \end{aligned} \quad (18)$$

引理 1(容许流量引理) 假设交换结构单端口时隙到达流量的数学期望为 $m_i(i = 1, \dots, N)$, 那么交换结构信元到达过程为 AT 容许流量的充要条件是 $m_i \leq 1(i = 1, \dots, N)$.

证明 由式(7)、(1)-(b)和(10)可得:

$$\begin{aligned} \lambda_j &= \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[\frac{A_j(n)}{n} \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[\frac{A_j(n)}{n} \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[\frac{\sum_{m=1}^n K_j(m)}{n} \right] = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left[\frac{\sum_{m=1}^n E[K_j(m)]}{n} \right] \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{\sum_{m=1}^n m_j}{n} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{m_j n}{n} \right) = m_j, \\ i, j &= 1, \dots, N \end{aligned} \quad (i)$$

将式(i)代入式(5)可得:

$$\lambda_j = \sum_{i=1}^N \lambda_{ij} = \sum_{i=1}^N m_{ij} = m_j, i = 1, \dots, N \quad (ii)$$

由定理 1 可知 $\lambda_j = m_j \leq 1, i = 1, \dots, N$. 证毕.

4 仿真实验

为了验证上述流量模型的有效性, 我们截取了校园网 16×16 端口路由器的实时数据, 并对其中 100 个时隙信元到达数、平均速率、不均衡度 U 和突发度 B 进行了仿真. 图 2 是对所有输入端口在 100 时隙中信元到达数量的仿真结果. 从图中可以看出, 路由器在多数时隙中信元到达数量在 4 至 12 之间, 即在这些时隙中有 4 至 12 个端口有信元到达. 图 3 为 100 时隙内归一化的信元平均到达速率. 从图中可以看出, 10 个端口平均到达速率小于 0.5, 所有端口到达速率小于 0.7. 图 4 为 100 时隙内各输入端口的归一化不均衡度 U , 从图中可以看出, 只有第 48、50、53 和 56 时隙的不均衡度 U 在

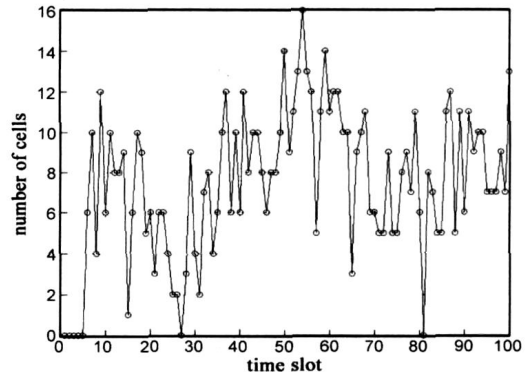


图2 所有输入端口在各时隙的到达信元数

0.1 以上, 高达 96% 的时隙不均衡度小于 0.1, 所以该流量具有良好的均衡度. 图 5 为第 1 端口在 100 时隙内的归一化突发度 B , 从图中可以看出, 只有第 23、24、54、56、86 和 87 等 6 个时隙突发度超过 0.1, 高达 94% 的时隙突发度小于 0.1, 所以该流量在输入端口 1 具有良好的突发度.

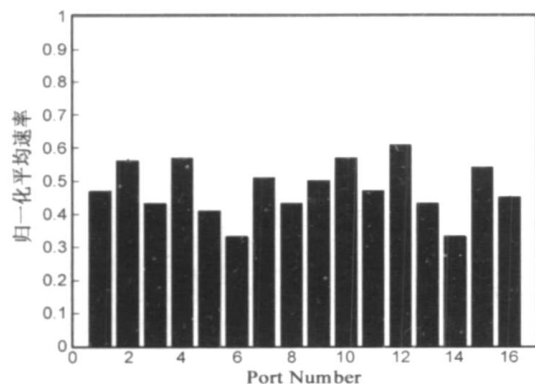


图3 各输入端口的归一化平均到达速率

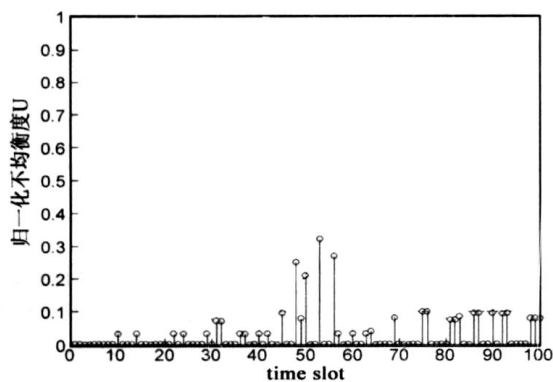


图4 输入端口在各时隙的归一化不均衡度U

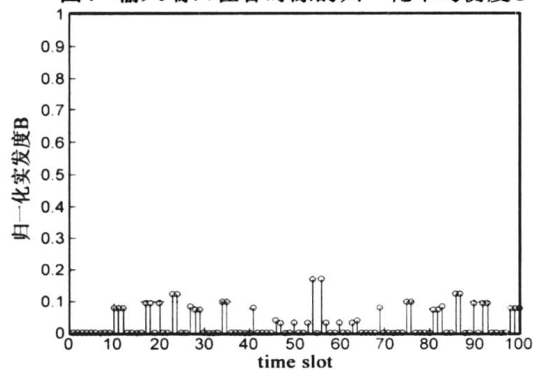


图5 第1端口在各时隙的归一化突发度B

5 结论

本文首先分析了 Crossbar 架构下各种不同排队策略的优缺点, 输入排队 Crossbar 交换结构被证明是当前技术条件下 T 比特 CR 中可行的排队方案. 本文针对输入排队 Crossbar 架构的到达流量构建了流量模型. 该模型从随机过程和概率统计的基础理论出发, 在分析 IQ-

VOQ 到达流量的五条基本特性的基础上, 建立了 IQ-VOQ 的流量模型, 给出了到达流量、到达速率、容许流量、突发流量以及均衡流量的精确定义, 并推导了各种流量存在的充要条件的定理与引理. 同时, 文中所讨论的突发度 B 和不均衡度 U 为到达流量提供了精细的计算粒度. 与 LAN 的自相似模型、WAN 的 Poisson 模型以及数据业务的 ON/OFF 模型相比, 本文讨论的流量模型更适用于基于 IQ-VOQ 调度算法性能的精确评估, 为路由器交换架构的工程设计提供了理论依据.

参考文献:

- [1] K. J. Christensen. Design and Evaluation of a Parallel Polled Virtual Output Queued Switch [A]. In Proc. IEEE ICC' 01 [C]. Helsinki, Finland, June, 2001. 112– 116.
- [2] Adisak Mekittikul, Nick McKeown. Scheduling VOQ switches under non uniform traffic[R]. CSL Technical Report, Stanford University, 1997, CSL TR 97- 747.
- [3] T Anderson, S Owicki, J Saxe, C Thacker. High speed switch scheduling for local area networks[J]. ACM Transactions on Computer System, Nov 1993, 11(2): 319– 352.
- [4] Nick McKeown. The iSLIP scheduling algorithm for input queued switches[J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking, 1999, 7(2): 188– 201.
- [5] Nick McKeown, Thomas E. Anderson. A quantitative comparison of scheduling algorithms for input Queued switches[J]. Computer Networks and ISDN Systems, Dec. 1998, 14(5): 852 – 875.
- [6] Zafer Sahinoglu, Sirin Tekinay. On multimedia networks: self Similar traffic and network performance[J]. IEEE Communications Magazine, Jan. 1999. 48– 52.
- [7] Vern Paxson, Sally Floyd. Wide area Traffic: the failure of Poisson modeling[J]. IEEE/ ACM Transactions on Networking, Jun. 1995, 3(2): 226– 244.
- [8] P R Jelenkovic, A A Lazar. Asymptotic results for multiplexing subexponential on off sources[J]. Advances in Applied Probability, 1999. 394– 421.
- [9] Nelson Randolph. Probability, Stochastic Process and Queuing Theory[M]. Springer, Verlag, Jan. 1995.

作者简介:

马祥杰 男, 1977 年出生于河北滦南, 解放军信息工程大学国家数字交换系统工程技术研究中心在读博士生. 2004 年获通信与信息系统专业工学硕士学位. 主要研究方向为高速网络交换结构与调度算法、光通信网等. E-mail: maxiangjie 100@ 163. com.

兰巨龙 男, 1962 年出生于河北张北, 解放军信息工程大学国家数字交换系统工程技术研究中心教授, 博士生导师. 1988 年获通信与电子系统专业工学硕士学位, 2001 年获通信与信息系统专业博士学位. 主要研究方向为网络路由理论与技术、交换结构与调度算法和 IPv6 技术等.