

# 高性能输入排队交换机的公平调度算法研究<sup>\*</sup>

冉成<sup>1</sup> 苏皓<sup>1,2</sup> 孙晔<sup>3</sup> 孙洁<sup>1</sup>(1. 华北理工大学电气工程学院 唐山 063210; 2. 唐山市半导体集成电路重点实验室 唐山 063210;  
3. 中国信息通信研究院 北京 100010)

**摘要:**针对目前输入排队下的调度算法无法同时满足非均匀流量下的公平性能和时延性能问题,提出一种穷尽优先服务空队列和混合权重(EPEMW)调度算法。首先,通过优先服务空队列多的输入端口;其次对非空虚拟输出队列(VOQ)长度和非空 VOQ 首信元等待时间两个权重综合考虑;最后采用穷尽服务策略和每次时隙只对改变的数据包进行重排序。实验结果表明,在伯努利均匀流量下,EPEMW 算法实现 100% 的吞吐率和更低的延时;在突发均匀和伯努利热点流量下公平性能最好,其平均公平性指数分别为 99.83% 和 99.82%。

**关键词:**数据延时;调度算法;输入排队;流量模型;公平性指数

**中图分类号:** TP391.9;TP393.0 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5025

## Research on fair scheduling algorithm of high-performance input queuing switch

Ran Cheng<sup>1</sup> Su Hao<sup>1,2</sup> Sun Ye<sup>3</sup> Sun Jie<sup>1</sup>(1. School of Electrical Engineering, North China University of Technology, Tangshan 063210, China;  
2. Tangshan Key Laboratory of Semiconductor Integrated Circuits, Tangshan 063210, China;  
3. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100010, China)

**Abstract:** The scheduling algorithm under the current input queuing cannot meet the fairness and delay performance problems under non-uniform traffic. This paper proposes an exhaustive priority service empty queue and mixed weight (EPEMW) scheduling algorithm. The algorithm prioritizes serving input ports with many empty queues, and then comprehensively considers the two weights of non-empty VOQ length and non-empty VOQ first cell waiting time. Finally, an exhaustive service policy is adopted and only the changed packets are reordered every time slot. The experimental results show that under the uniform flow rate of Bernoulli, the EPEMW algorithm achieves 100% throughput rate and lower delay. The fairness performance was best under burst uniform and Bernoulli hotspot traffic, with an average fairness index of 99.83% and 99.82%.

**Keywords:** data delay; scheduling algorithm; input queueing; traffic model; fairness index

### 0 引言

数据交换芯片解决了数据从一个端口到另外一个端口的报文处理和转发的核心问题,其广泛应用于数据中心(data center, DC)、高性能计算(high-performance computing, HPC)、核心聚合等领域<sup>[1]</sup>。交换芯片作为交换机的核心芯片之一,决定了交换机的整体性能,在由交换芯片构成的交换网络中,交换结构和调度算法共同完成了各接

口单元之间的数据通信,实现了输入端口与输出端口之间的匹配和数据转发<sup>[2-3]</sup>。交换结构是构建高性能数据交换设备的核心组成部分之一,可实现数据包从输入端传输到输出端,每个时隙内只允许每个输入/输出发送/接收一个数据包,不需要加速就能完成数据输入/输出之间的交换,而调度算法最大程度的解决了交换结构中输入/输出端口之间数据竞争的问题,并快速的计算出输入/输出端之间需要在下一时隙完成匹配的端口<sup>[4-5]</sup>。

收稿日期:2022-11-16

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(51102076)项目资助

针对组合输入输出排队 (combined input/output-queued, CIOQ) 交换结构, 研究者提出多种调度算法, 如基于极大匹配的思想, 通过多次迭代来实现最大匹配数量, 一般来说, 迭代调度算法本质上都是采用分布式策略, 主要分为请求、授权、接受。文献[6]提出的并行迭代匹配 (parallel iterative matching, PIM) 算法, 授权和接受采用随机匹配的策略, 公平性能差, 吞吐率最高为 63%。文献[7]提出的迭代轮询匹配 (iterative round-robin matching, iRRM) 算法, 引入轮询调度器, 解决 PIM 随机匹配的策略, 但出现同步现象。Mckeown 等<sup>[8]</sup>提出一种基于硬件实现简单的滑动迭代轮循匹配 (iSLIP) 多次迭代算法, 解决了 iRRM 的输出同步问题, 公平性能好, 但该算法的调度器只会按照固定轮询列表中的顺序选择要授权或接受的信元, 存在较长的排队延迟和匹配开销问题, 因此具有队长的端口不能及时的将所需信息尽快传递到目的端口, 导致算法在非均匀业务下性能降低。基于 iSLIP 改进, 文献[9]提出优先服务队列长度达到阈值和优先服务首信元等待时间达到阈值的两种优先服务机制, 其中基于长队列优先匹配 (long queues priority iSLIP, lp\_iSLIP) 算法, 可以提高非均匀业务下的吞吐率, 但没有考虑等待时间长的首信元而队列长度短情况, 导致数据在交换的过程中延时增加。同理, 基于首信元等待时间优先匹配 (old queues priority iSLIP, op\_iSLIP) 算法, 通过优先服务等待时间长的端口, 虽然减少了数据等待延时, 但在突发均匀业务下吞吐率只有 81.25%, 丢包现象较严重, 会影响用户服务质量 (quality of service, QoS)<sup>[10-11]</sup>。文献[12]提出的  $\pi$ -RGA 属于多比特单次迭代算法, 采用连续非空时间最长的队列优先匹配策略, 加速比为 2 时, 在非均匀业务下取得很高的吞吐率, 但请求携带信息过多, 实现较复杂, 不适合高速交换。文献[13]提出将输出端指针更新为队列长度最长的端口策略, 在伯努利强对角和伯努利均匀业务下数据交换延时较高。一些调度算法, 如 DRRM、GA 简化步骤<sup>[14]</sup>, 分为请求、授权。由于每次时隙在输入端只发送单个请求, 最终在确定最大匹配上花费相当多的时间, 导致整体延时增加。文献[15-17]提出的 SRR、RR/LQF、HRF/RC 算法, 属于单比特迭代调度算法, 对虚拟输出队列 (virtual output queue, VOQ) 的长度进行排序并记录, 增加了硬件实现和维护复杂度, 加大时间的开销; 并且总是考虑优先服务队列长度策略, 低占用 VOQ 平均时延将远高于高占用 VOQ 平均时延; 其中 SRR 与 HRF/RC 算法步骤存在随机策略, 公平性能降低。

针对上述问题, 为了解决以上调度算法无法同时满足非均匀流量下的公平性能和时延性能, 本文从提高公平性并且保证良好的延时性能方面考虑, 提出对 VOQ 长度和 VOQ 首信元等待时间两个权重值综合考虑, 并加入穷尽服务策略和优先服务空的 VOQ 策略, 具有一定的公平性, 既能改善首信元长时间等待带来的延时, 又能减少队

列长度达到最大容量带来的丢包数量。在此基础上本文提出一种穷尽优先服务空队列和混合权重 (exhaustion of priority service empty queues and mixed weights, EPEMW) 调度算法。最后, 通过自主构建的仿真平台对该算法与其他算法在不同流量模型下进行仿真实验, 并根据实验结果比较算法的平均延时、公平性。

## 1 组合输入及交叉点带缓存排队 (CIOQ) 交换结构

目前, 许多学者对交换结构进行相关研究, 提出输入排队 (input queued, IQ)、输出排队 (output queued, OQ)、CIOQ、CICQ 交换结构。其中 CIOQ 结构应用最广泛, 在于硬件实现简单, 便于扩展, 解决了输入端口数据堵塞问题。如图 1 所示, CIOQ 由输入端 VOQ<sup>[18-19]</sup>、输出端先入先出 (first in first out, FIFO) 队列, 以及输入与输出之间的交换内核组成<sup>[20-21]</sup>。CIOQ 中的交换内核是基于 Crossbar 交换结构设计<sup>[22-23]</sup>, 其内部交换无阻塞, 可实现多路数据流并行处理, 完成多输入、多输出之间的匹配。可以说, 调度算法在 CIOQ 中是最重要的一环, 对数据传输过程中存在的数据冲突、延时、丢包起决定性作用<sup>[24]</sup>, 而衡量一个算法的好坏, 应从公平性、吞吐率、平均延时等性能指标综合考量。

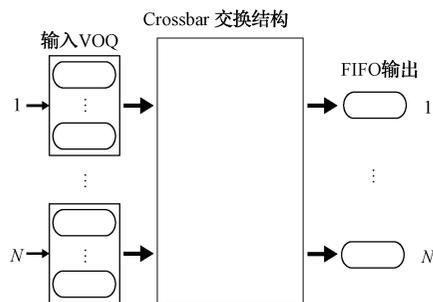


图 1 CIOQ 交换结构

### 1.1 性能指标

在 CIOQ 数据交换仿真平台中, 为了进一步分析调度算法的整体性能, 本文引入如下参数作为性能指标。

1) 公平性指数 (fairness index, FI), FI 越高, 输入端口 VOQ 之间的平均时延差距越小, 其公平性越好, 计算公式如式(1)所示, 将 FI 的平均值定义为平均公平性指数 (average fairness index, AFI)。

$$FI = \frac{\left(\sum_{j=1}^N D_j\right)^2}{N \sum_{j=1}^N D_j^2}, \quad D_1, \dots, D_N \quad (1)$$

式中:  $D_j$  为 VOQ<sub>j</sub> 的平均信元延迟。

2) 平均延时 (average delay, AD), 信元在流量模型产生后进入输入端 VOQ 队列排队后开始计算, 信元到达输出端截至, 以时隙为计算单位, 通过计算信元在交换结构中停留的平均等待时隙数可得, 平均等待时隙数越少, 算

法性能越好,计算公式如下:

$$AD = \frac{\sum_i^N Delay_i}{N} \quad (2)$$

式中:Delay 为信元在交换结构中缓存、调度的等待时间; N 为离开交换结构的信元总数。

根据上述公式计算出的性能指标,可以衡量调度算法的效率、公平性和稳定性,从交换机的整体交换性能分析,一方面,算法的执行效率越快,交换机的带宽利用率和吞吐率越高,另一方面,算法在高负载、均匀和非均匀流量下越稳定,交换机的调度策略越公平<sup>[25]</sup>。

### 1.2 流量模型

对于调度算法的流量模型都需具备容许性,即输入/输出端口无过载现象。容许性的定义如下:

$$\begin{aligned} X_{ij}(t) &= X_{ij}(1) + A_{ij}(t) - L_{ij}(t) \\ t &\geq 0, i, j = 1, \dots, t \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\lambda_{ij}$  为 VOQ<sub>ij</sub> 的平均信元到达率; $X_{ij}(t)$  为时隙  $t$  开始时 VOQ<sub>ij</sub> 的信元数量; $A_{ij}(t)$  为时隙  $t$  开始时 VOQ<sub>ij</sub> 的信元累积到达数量; $L_{ij}(t)$  为时隙  $t$  开始时 VOQ<sub>ij</sub> 的信元累积离开数量。假设信元的到达过程以概率 1 满足强大定理,计算公式如下:

$$Lim_{t \rightarrow \infty} \frac{A_{ij}(t)}{t} = \lambda_{ij} \quad i, j = 1, \dots, t \quad (4)$$

那么对于一个交换机如果满足式(5)其被证明是稳定的。

$$Lim_{t \rightarrow \infty} \frac{L_{ij}(t)}{t} = \lambda_{ij} \quad i, j = 1, \dots, t \quad (5)$$

根据上述公式可以计算出一个可容许的流量业务矩阵需满足式(6)和(7)限制条件,即一个时隙内,到达输入端的信元为 0 或 1 个,且每个输入端口在一次时隙内只能交换一个信元。因此,根据到达输入端的信元去往输出端口的选择分布,可将流量分为伯努利均匀、突发均匀、伯努利热点流量分布模型<sup>[26]</sup>。

$$\sum_{i=1}^t \lambda_{ij} \leq 1, \quad \forall_j = 1, \dots, t \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^t \lambda_{ij} \leq 1, \quad \forall_i = 1, \dots, t \quad (7)$$

1) 伯努利均匀流量分布模型,其计算公式如式(8)所示,信元以相同的  $\lambda$  到达输入端,去往输出端概率  $P$  相同,到达输入端的信元均匀分布在 VOQ<sub>ij</sub> 中。

$$P_j = \frac{\lambda_{ij}}{N} \quad j = 1, \dots, N \quad (8)$$

式中: $j$  为输出端口; $N$  为端口数目。

2) 伯努利热点流量模型,其计算公式如式(9)所示,信元以相同的  $\lambda$  到达输入端,去往输出端  $P_{ij}$  以热点系数分布。

$$P_{ij} = \begin{cases} H\lambda_{ij}, & j = (i + N/2) \bmod N \\ \frac{1}{2(2-N)}\lambda_{ij}, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $i$  为输入端口; $H$  为热点系数。

3) 突发均匀流量分布模型,到达过程采用两状态的马尔可夫过程,即 ON-OFF 模型,ON 状态表示每个时隙有信元到达,OFF 状态表示每个时隙无信元到达。计算公式如下:

$$[\lambda 1 - \lambda] \times \begin{bmatrix} 1 - P_1 & P_1 \\ P_2 & 1 - P_2 \end{bmatrix} = [\lambda 1 - \lambda] \quad (10)$$

$$\lambda \times P_1 = (1 - \lambda) \times P_2 \quad (11)$$

$$1 - P_1 = \frac{BL}{1 + BL} \quad (12)$$

$$1 - P_2 = \frac{IL}{1 + IL} \quad (13)$$

$$IL = BL \times \frac{1 - \lambda}{\lambda} \quad (14)$$

式中:在  $t$  时刻, $P_1$  为 ON 转换到 OFF 的概率; $1 - P_1$  为 ON 转换到 ON 的概率; $P_2$  为 OFF 转换到 ON 的概率; $1 - P_2$  为 OFF 转换到 OFF 的概率; $\lambda$  为一个时隙产生一个信元的概率,等同负载;突发长度(burst length,BL),同一端口多个时隙连续传输信元的数量;空闲长度(idle length,IL),同一端口多个时隙不传输信元的数量。

## 2 算法设计

本文考虑了空的 VOQ,并在输入端口发送请求信号时,引入混合权重策略,同时考虑队列长度和首信元等待时间,提高了一定的公平性能;对  $(R, M)$  只计算改变值,不用重复排序,可节约硬件资源,降低实现复杂度。EPEMW 算法的执行流程如图 2 所示。

### 1) 请求

第  $t$  时隙,未匹配的输入端口  $i$  向非空 VOQ<sub>ij</sub> 所对应的输出端口  $j$  发送请求信号,其中请求信号包括  $(R, M)$  信息。 $(R, M)$  更新时,只需计算改变值即可。

### 2) 授权

第  $t$  时隙,未匹配的输出口  $j$ ,接收到输入端口  $i$  的请求信号,在上一时隙已经匹配成功,且当前时隙还存在非空 VOQ 时,则继续保持当前匹配,直到由非空转到空时。在所有请求信号中优先授权  $R$  等级高的输入端口;出现相同  $R$ ,优先授权  $M$  混合权重值大的输入端口;如果还是不能选出授权输入端口,则采用 RR 轮询策略。

### 3) 接受

第  $t$  时隙,未匹配的输入端口  $i$  从输出口  $j$  接收到授权信号,如果存在多个授权信号,则接受具有最大  $M$  值的端口。

其中, $R$  为输入端口  $i$  空 VOQ<sub>ij</sub> 的数量; $M$  为混合权重值,包括  $L_{ij}$  和  $T_{ij}$ , $L_{ij}$  为 VOQ<sub>ij</sub> 中正在排队的信元数量; $T_{ij}$  为 VOQ<sub>ij</sub> 中首信元的等待时间。VOQ<sub>ij</sub> 为输入端口  $i$  中的信元要去往输出口  $j$  的缓存队列。

EPEMW 是分布式迭代算法,轮询调度器独立工作,互不影响,只有在第 1 次迭代且 VOQ 由非空转变为空时

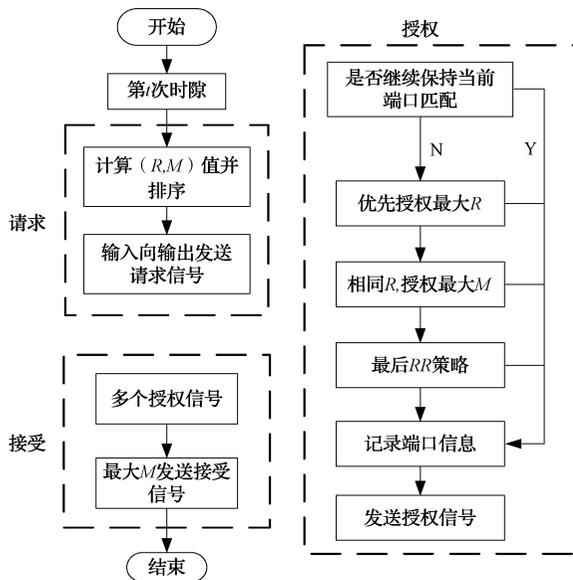


图2 EPEMW 算法流程

才更新轮询指针, 指针更新方式同 iSLIP, 根据上述 EPEMW 算法的执行步骤可知, 本文提出的算法时间复杂度为  $O(N)$ 。本文提出的调度算法比现有的调度算法更适合 CIOQ 交换机, 其原因如下。

- 1) 使用最大空队列优先排序调度策略, 提高最大匹配的概率。
- 2) 对  $R, M$  排序时, 只更新当前时隙变化的值, 即每个时隙只会选择一个数据包进行重排序, 降低时间复杂度。
- 3) 引入混合权重策略, 具备更好的公平性。
- 4) 穷尽服务策略, 减少匹配计算时间。

### 3 仿真平台设计与实验数据分析

数据交换仿真平台是模拟数据包的到达和在 VOQ 中排队的一个过程。通过仿真能够准确的分析和计算出调度算法在不同流量模型下的性能指标, 并对统计得到的性能指标以图形化显示, 为设计和实现高性能交换机提供可靠的定量依据<sup>[27]</sup>, 进一步增强网络数据交换的安全性和稳定性。

#### 3.1 CIOQ 仿真平台设计

如图 3 所示, 仿真平台分为流量模块、CIOQ 交换结构、输出模块、统计模块 4 个模块, 每个模块写成接口, 可独立工作。其运行过程为首先, 流量模块负责产生信元, 其次, 产生的信元根据要去往的目的端口在输入端口 VOQ 中排队缓存, 然后, 根据相应的调度算法完成信元从输入端口 VOQ 队列到输出端口 VOQ 队列的调度分配, 最后, 统计模块将各个模块统计得到的数据信息进行分析处理, 并通过输出模块将数据以界面或者文本文件输出。

#### 3.2 实验环境

本文在 3 种典型的伯努利均匀、伯努利热点、突发均

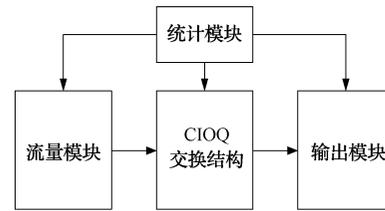


图3 仿真系统结构模型

匀流量模型下进行仿真实验。根据仿真结果分析 EPEMW 算法的性能, 并与以下具有代表性的迭代调度算法 iLQF、iOCF、iSLIP、SRR、RR/LQF 进行比较。算法执行的迭代次数各不相同, 如 iLQF-2 表示该算法执行两次迭代。

交换规模选  $32 \times 32$ , VOQ 缓存设置无限大, 仿真时隙  $10^6$  个, 取  $10^5 \sim 9 \times 10^5$  时隙之间的数据; 突发均匀流量模型下, 突发大小为 32; 伯努利热点流量模型, 热点系数取 0.5, 最后加入对输出队列的模拟, 以提供延迟性能的下界。

#### 3.3 仿真结果分析

##### 1) 平均延时分析

伯努利均匀流量下平均延时性能如图 4 所示。从图 4 可知, 在所有迭代调度算法中 EPEMW-2 获得了 100% 的吞吐率和不错的延时性能。iOCF-2 实现 70% 的吞吐率, iLQF-2 实现不到 90% 的吞吐率。即使在单次迭代下, EPEMW-1 的性能也优于 iOCF-2。与 iSLIP-2 和 SRR 相比, EPEMW-2 具有更小的延时。当负载等于 0.87 时, SLIP-2 需要 32 个时隙, SRR 需要 100 个时隙, 而 EPEMW-2 只需要 14 个时隙, 延时减少了 50% 以上。

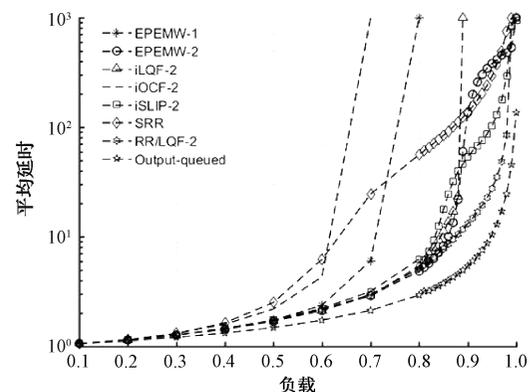


图4 伯努利均匀流量下平均延时性能

突发均匀流量下平均延时性能如图 5 所示。从图 5 可知, 随着负载的增加, 延时迅速增加。在所有的迭代算法中, iSLIP-2 和 iLQF-2 实现不到 90% 的吞吐率, 而 EPEMW-2 获得了 95% 以上, 并且 EPEMW-1 还取得了比 SRR 和 iOCF-2 高的吞吐率。当负载等于 0.9 时, RR/LQF-2 经历了 329 个时隙的平均延时, 而对于 EPEMW-2 只有 296 个时隙, 减少了 10% 的延时。

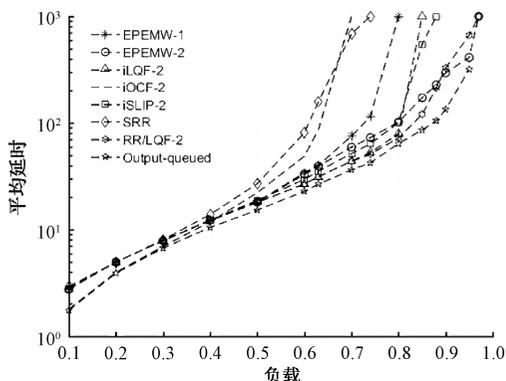


图5 突发均匀流量下平均延时性能

伯努利热点流量下平均延时性能如图6所示。从图6可知,EPEMW-2获得了最好的吞吐率和时延,其性能优于其他所有迭代调度算法。EPEMW-1再次取得了比SRR和iOCF-2更好的吞吐率,并且取得了与iSLIP-2相同的性能。在延时不超过50个时隙的情况下,EPEMW-2可以承受0.9的负载,而SRR只能承受0.65的负载,iSLIP-2只能承受0.8的负载。

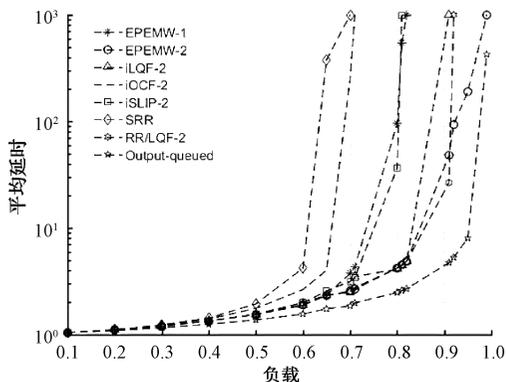


图6 伯努利热点流量下平均延时性能

2)公平性分析

本文主要考虑在突发均匀流量和伯努利热点流量模型下进行公平性测量。表1为突发均匀流量下,承受负载大于0.8的调度算法的公平性指数结果,这里负载取0.81~0.85。从表1可以得出,EPEMW和RR/LQF算法达到比iSLIP算法更好的公平性。RR/LQF算法取得不错的公平性是因为负载较大时,RR/LQF的优先输入/输出发挥出一定的优势,使得输入/输出快速完成匹配。表2为伯努利热点流量下,承受负载同样大于0.8的调度算法的公平性指数结果。从表2可以得出,EPEMW算法比RR/LQF和LQF算法更好的公平性。LQF优先策略总是有利于最长的VOQ,低占用VOQ的平均延时大于高占用VOQ,导致公平性降低,本文提出的EPEMW算法,加入混合权重策略确保所有VOQ的平均延时差别不大,进而提高了公平性。

表1 突发均匀流量下不同算法的FI和AFI对比

| 负载    | 吞吐率/%   |        |         |          |
|-------|---------|--------|---------|----------|
|       | EPEMW-2 | iLQF-2 | iSLIP-2 | RR/LQF-2 |
| 0.81  | 99.88   | 99.61  | 99.46   | 99.88    |
| 0.82  | 99.89   | 99.71  | 99.58   | 99.85    |
| 0.83  | 99.83   | 99.68  | 97.74   | 99.74    |
| 0.84  | 99.79   | 99.71  | 98.89   | 99.88    |
| 0.85  | 99.75   | 99.70  | 96.93   | 99.82    |
| AFI/% | 99.83   | 99.68  | 98.52   | 99.83    |

表2 伯努利热点流量下不同算法的FI和AFI对比

| 负载    | 吞吐率/%   |        |          |
|-------|---------|--------|----------|
|       | EPEMW-2 | iLQF-2 | RR/LQF-2 |
| 0.81  | 99.88   | 84.70  | 96.36    |
| 0.82  | 99.86   | 82.65  | 96.56    |
| 0.83  | 99.84   | 79.77  | 96.82    |
| 0.84  | 99.78   | 76.77  | 97.10    |
| 0.85  | 99.73   | 73.68  | 97.39    |
| AFI/% | 99.82   | 79.51  | 96.85    |

4 结论

本文针对输入排队交换机下的目前调度算法在非均匀流量下的公平性能差、吞吐率低、时延高等问题,提出一种穷尽优先服务空队列和混合权重调度算法EPEMW。结合流量产生模型,计算每个时隙各个输入端的数据将要去往的目的端口,输出端根据穷尽优先服务空队列和混合权重策略,对满足条件的端口发送授权信号。仿真实验表明,在伯努利均匀流量下,该算法能够实现100%的吞吐率;在突发均匀和伯努利热点流量下,EPEMW算法的公平性能最好,且在相同的延时下,所能承受的负载最大。本文提出的EPEMW对传统的算法有一定的改进,对实际使用的高性能交换机调度算法的改进和性能的提高提供了参考价值。为了进一步优化和提高输入排队交换机的交换性能,下一步将针对变长信元的研究,并将本文改进的算法运用到变长信元的调度分配问题,从而提升交换机的性能指标。

参考文献

[1] DEVI C R, FLORINABEL J D, PRASANTH N. High throughput scheduling algorithms for input queued packet switches[J]. Computers, Materials & Continua, 2022, 70 (1): 1527-1540.

[2] 曹东涛. 三级 Clos 分组交换网络调度算法研究[D]. 西安: 中国航天科技集团公司第五研究院西安分院, 2021.

[3] 马文, 苏文伟, 耿贞伟. 基于云服务的 DCOS 分层网络体系结构的研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(2): 83-87.

- [4] 陶亮. 基于 AXIS 的 Clos 结构高速交换网络的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [5] 赵驰. Crossbar 交换单元分组处理与队列管理的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [6] ANDERSON T E, OWICKI S S, SAXE J B, et al. High speed switch scheduling for local area networks[J]. ACM Transactions on Computer Systems, 1993, 11(4): 319-352.
- [7] MCKEOWN N, VARAIYA P, WALRAND J. Scheduling cells in an input-queued switch [J]. Electronics Letters, 1993, 29(25): 2174-2175.
- [8] MCKEOWN N. The iSLIP scheduling algorithm for input-queued switches[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(2): 188-201.
- [9] 李秋, 戚宇林, 杨凯. 输入排队 iSLIP 算法的改进与比较[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36(2): 106-109.
- [10] LIU X, ZHAI X B, LU W, et al. QoS-guarantee resource allocation for multibeam satellite industrial internet of things with NOMA[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 17(3): 2052-2061.
- [11] 吴梦, 赵一帆, 周思达. 一种面向 FANET 的改进 OLSR 协议[J]. 电子测量技术, 2022, 45(1): 65-69.
- [12] MNEIMNEH S. Matching from the first iteration: An iterative switching algorithm for an input queued switch[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16(1): 206-217.
- [13] 戴悦. 片上网络中交叉开关调度算法的设计与优化[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [14] HAN K E, SONG J, KIM D U, et al. Grant-aware scheduling algorithm for VOQ-based input-buffered packet switches[J]. ETRI Journal, 2018, 40(3): 337-346.
- [15] SCICCHITANO A, BIANCO A, GIACCONE P, et al. Distributed scheduling in input queued switches[C]. 2007 IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2007: 6330-6335.
- [16] HU B, YEUNG K L, ZHOU Q, et al. On iterative scheduling for input-queued switches with a speedup of  $2-1/N$  [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016, 24(6): 3565-3577.
- [17] HU B, FAN F J, YEUNG K L, et al. Highest rank first: A new class of single-iteration scheduling algorithms for input-queued switches [J]. IEEE Access, 2018(6): 11046-11062.
- [18] PRASANTH N N, BALASUBRAMANIAN K, DEVI R C. Starvation free scheduler for buffered crossbar switches [J]. International Journal of Engineering, 2015, 28(4): 23-528.
- [19] JAMALI M, GHIASIAN A. Randomised scheduling algorithm for virtual output queuing switch at the presence of non-uniform traffic[J]. IET Networks, 2019, 8(2): 138-142.
- [20] 林晚晴, 李峭, 赵露茜, 等. 基于 Crossbar 的混合关键性流量调度算法[J]. 电光与控制, 2016, 23(7): 6-10, 23.
- [21] 黄艺, 赵春华, 汤宝平, 等. 冗余策略下的机械振动 WSN 高效可靠传输方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 146-152.
- [22] KAMAL A B, MATTHIAS E, MATTHIAS W. Online packet scheduling for CIOQ and buffered crossbar switches[J]. Algorithmica, 2018, 80(12): 3861-3888.
- [23] PRASANTH N, BALASUBRAMANIAN K. Performance analysis of buffered crossbar switch scheduling algorithms[J]. International Journal of Information and Computer Security, 2015, 7(1): 49-63.
- [24] 欧阳一鸣, 王世杰, 王奇. NoC 中基于数据包分类的功率门控策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6): 152-160.
- [25] 崔勇, 林予松, 李润知, 等. 基于合作博弈的多虚拟机实时迁移带宽分配机制[J]. 通信学报, 2016, 37(4): 149-158.
- [26] HU B, YEUNG K L, ZHANG Z. An efficient single-iteration single-bit request scheduling algorithm for input-queued switches [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2013, 36(1): 187-194.
- [27] 高岩, 资郴琛, 冯四风, 等. 面向拟态防御理论构造 Web 网关的安全调度算法[J]. 小型微型计算机系统, 2021, 42(9): 1913-1919.

#### 作者简介

冉成, 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制算法。

苏皓(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为数字集成电路设计。

E-mail: 66265591@qq.com

孙晔, 工程师, 主要研究方向为大数据和区块链技术应用研发。

孙洁, 博士, 教授, 主要研究方向为测控技术、控制理论与控制工程等方面。