

一种基于时间触发光纤通道的 lp-QPS 算法

杨佳宁, 苏皓*, 王一, 冉成

(华北理工大学 电气工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要:为解决光纤通道交换机调度算法在高吞吐率和低延时性能之间的权衡问题,提出了一种基于时间触发光纤通道的队列比例抽样(lp-QPS)算法。该算法通过引入长队列有效机制,优先匹配超过门限阈值的虚拟输出队列(VOQ),同时对其余队列采用队列比例抽样进行循环调度,并与其它迭代调度算法进行实验对比。实验结果表明:在 Bernoulli 到达过程和突发到达过程的 4 种流量模型下,该算法均可以获得 100% 的吞吐量,并提供更优的延时性能,为光纤通道交换机的性能优化提供了重要参考。

关键词: 光纤通道; Crossbar 交换网络; 调度算法; 虚拟输出队列; 输入排队

中图分类号: TN929.11; TP393.0 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2025)03-0090-07

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.03.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Lp-QPS algorithm based on time triggered fiber channel

YANG Jianing, SU Hao*, WANG Yi, RAN Cheng

(School of Electrical Engineering, North China University of Technology, Tangshan Hebei 063210, China)

Abstract: To address the trade-off between high throughput and low latency in scheduling algorithms for fiber channel switches, this paper proposes a time-triggered queue proportional sampling (lp-QPS) algorithm. The algorithm introduces a long-queue prioritization mechanism to preferentially match virtual output queue (VOQ) exceeding the threshold, while employing queue proportional sampling for cyclic scheduling of the remaining queues. Comparative experiments with other iterative scheduling algorithms demonstrate that the lp-QPS algorithm achieves 100% throughput and superior latency performance under four traffic models, including both Bernoulli and burst arrival processes. These findings provide valuable insights for optimizing the performance of fiber channel switches.

Key words: fiber channel, crossbar switching network, scheduling algorithm, virtual output queue, input queueing

0 引言

随着航空电子网络的发展及应用日益广泛,飞行控制、导航系统和通信系统等关键功能对数据交换调度算法提出了更高的带宽要求和更低的延迟要求。时间触发光纤通道(TTFC)网络是时间触发以太网(TTE)与光纤通道(FC)网络的融合技术,凭借其低延迟、高传输速率及强大的抗电磁干扰能力,成为航空电子网络的首选方案^[1-2]。在航空电子网络中,FC 交换机作为

数据中心和存储网络的核心设备,其调度算法对数据传输的实时性、可靠性和效率具有直接影响。

目前,FC 交换机通常采用无阻塞的交叉开关矩阵(Crossbar)作为交换结构^[3]。通过使用虚拟输出队列(VOQ)技术,可以有效解决队头阻塞(HOL)的问题。基于输入排队结构的调度算法主要包括最大权重匹配算法和极大匹配算法。最大权重匹配算法包括最长队列优先(LQF)算法^[4]、最久端口优先(LPF)算法^[5]和最久信元优先(OCF)算法^[6]。这类算法在均匀流量条件下能够保证 100% 的吞吐量。然而,在非均匀流量情况下,LQF 算法和 LPF 算法可能会导致某些数据流发生“饿死”现象。此外,这些最大权重匹配算法的复杂度普遍较高,实际应用比较困难^[7]。极大匹配算法的实现复杂度明显低于最大权重匹配算法,主要分为请求、授权和接受 3 个步骤。这类算法包括并行迭代匹配(PIM)算法^[8]、循

收稿日期: 2024-07-21。

作者简介: 杨佳宁(1999—),男,河北省唐山市人,硕士研究生,现就读于华北理工大学电气工程学院仪器科学与技术专业,本科毕业于北华航天工业学院电子与控制工程学院微电子科学与工程专业,主要研究方向为数字集成电路设计。

* **通信作者:** 苏皓(1980—),男,博士,副教授,主要研究方向为集成电路设计与测试。



环匹配调度(RRM)算法^[9]和滑动多次迭代匹配(iSLIP)算法^[10]。PIM 算法采用随机匹配策略,虽然实现简单,但算法的公平性较差,最高吞吐率仅能达到大约 63%。RRM 算法通过轮询匹配解决了 PIM 算法存在的公平性问题,但由于存在指针同步现象,可能会产生额外的损耗。iSLIP 算法通过改进轮询指针更新策略,不仅解决了指针同步的问题,还有效地避免了“饿死”现象的发生,其公平性更好、效率更高。尽管如此,在非均匀流量条件下,某些输入端口可能需要经历多个轮次才能成功获得调度资源,这将导致整体调度延迟有所增加。文献[11]基于对 iSLIP 算法的改进,提出了优先匹配队列信元数量达到满载的调度算法 (PMQF-iSLIP)算法。该算法通过设置 VOQ 容量并引入辅助轮询指针,优先调度队列长度达到容量值的队列,从而提高了在非均匀流量下的性能。然而,由于没有考虑首信元的等待时间,导致公平性下降和数据交换中的平均延迟增加。双轮询匹配(DRRM)算法^[12]和授权感知(GA)算法^[13]简化了匹配过程,将其分为请求和授权 2 个步骤。在请求阶段,每个输入端口只向一个输出端口发送请求。虽然简化了匹配步骤,但每次匹配成功的端口数量减少,需要更多的迭代才能达到最大匹配,进而导致整体延迟性能的下降。最高排名优先单次迭代(HRF)算法^[14]按照队列长度将 VOQ 分为 4 个优先级,并采用基于队列长度排名的方式进行调度,尽管它是目前性能最好的单次迭代调度算法之一,但其在匹配过程中存在随机选择的问题,导致其在非均匀流量下的表现不佳,这种随机性可能会引发“饥饿”现象,影响吞吐率和延迟性能。增强型 2 位匹配(E2B)算法^[15]考虑到了空 VOQ,能够有效处理突发流量,但该算法需要计算每个输入端口的空队列数量和队列长度,因此复杂性较高。流量自适应的多优先级变长轮询调度(tavp-RRM)算法^[16]同时考虑了队列长度和首信元等待时间,增加了轮询指针,虽然可以更细致地进行调度决策,但也因此需要更长的时间进行轮询选择,从而增加了整体的平均延迟。

为了解决现有算法在均匀流量和非均匀流量条件下难以同时保证调度性能的问题,并提高算法的公平性和延迟性能。本文提出一种基于时间触发光纤通道的队列比例抽样(lp-QPS)算法。

1 lp-QPS 算法

1.1 输入排队(IQ)交换结构

lp-QPS 算法是基于 IQ 交换结构提出的。根据缓

冲队列的位置不同,Crossbar 结构可分为 IQ、输出排队(OQ)和组合输入/输出排队(CIOQ)3 种类型。OQ 结构能够提供最优的服务质量(QoS)性能,但为了达到 100%的吞吐率,交换机内部需要 N 倍的加速比,这在高速环境下实现困难^[17]。CIOQ 结构的输入端和输出端均设有缓存队列,既避免了输入端队头堵塞问题,又解决了输出端数据竞争问题,但其算法的复杂度较高,因此主要停留在理论探讨层面^[18]。

目前,FC 交换机大多采用 IQ 交换结构。 $N \times N$ 的 IQ 交换结构图如图 1 所示。其中, $A_i(n)$ 为进入输入端口 1 的信元, $A_{i,j}(n)$ 为进入输入端口 1 中要去往输出端口 j 的信元, $Q_{i,1}(n)$ 为输入端口 1 中要去往输出端口 1 的信元的 VOQ 队列。IQ 交换结构由输入缓冲队列、仲裁器和 Crossbar 交换单元三部分组成。该结构内部无阻塞,交换速度可以达到开关端口速度^[19],因此比 OQ 结构实现的难度和成本更低。但是,由于早期的 FC 交换机要用先入先出队列(FIFO)作为其基本排队机制,导致 IQ 结构存在 HOL 问题,严重影响 Crossbar 内部的带宽利用率,在信元到达模式服从伯努利(Bernoulli)分布时,带宽利用率仅有 58.6%;而在突发流量的情况下,这一数值会更低^[20]。随着技术的发展,VOQ 技术被提出作为一种解决 HOL 问题的有效方法。VOQ 的实现方式是在每个输入端口设置 N 个独立的缓冲队列,VOQ 技术允许来自同一输入端口但前往不同输出端口的数据包被存储在不同的队列中。理论上,VOQ 策略可以完全消除 HOL 问题,从而获得 100%的带宽利用率。

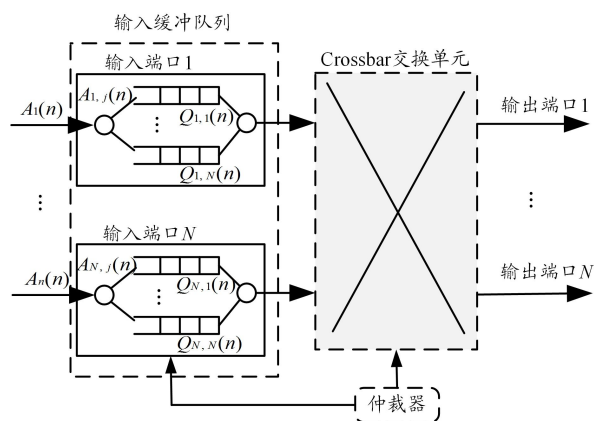


图 1 $N \times N$ IQ 交换结构

1.2 算法原理

lp-QPS 算法基于输入端口中每个 VOQ 的实时状态进行调度。在每个时隙开始时,算法采集 2 个关键参数:一是各 VOQ 中排列的信元数量,二是该 VOQ

杨佳宁,苏皓,王一,等:一种基于时间触发光纤通道的 lp-QPS 算法

长度占所属输入端口所有 VOQ 队列之和的比例 R 。在输入端口发送请求后,算法首先判断各 VOQ 的队列长度,并设定最大长度 $L_{\max}$ 。优先对达到或超过 $L_{\max}$ 的 VOQ 进行匹配,其余队列则采用基于队列比例抽样的加权轮询调度,优先调度值较大的 VOQ。若存在多个 VOQ 具有相同的最大队列比例抽样值,则选择队列长度 L 最大的请求进行授权。该方法能在突发流量下快速检查 VOQ 队列状态,优先调度长队列,从而降低丢包率。

在 4x4 Crossbar 交换架构中,本文采用门限阈值为 4 的 lp-QPS 算法,在第一个时隙内进行首次迭代,lp-QPS 算法匹配过程如图 2 所示。图中每个黑点代表一个输入或输出端口。迭代过程具体如下:首先,由于 VOQ(4,1)的队列长度达到门限阈值,系统优先对其进行匹配,并更新输出调度器的轮询指针(即调度器指针)。然后,系统根据队列比例抽样的原则对剩余端口进行匹配处理。以输出端口 2 为例,它同时接收到来自输入端口 2 和 3 的请求。为了确定优先匹配哪个输入端口的请求,系统需要比较这 2 个请求的 VOQ 队列长度占其所在输入端口中所有 VOQ 队列长度之和的比例 R 。例如,VOQ(2,2)的队列长度为 2,而输入端口 2 的所有 VOQ 队列总长度为 3,因此 VOQ(2,2)的 R 值为 $2/3$ 。同理,计算得出 VOQ(3,2)的 R 值为 1,因为它是该输入端口唯一的请求。由于 VOQ(3,2)的 R 值大于 VOQ(2,2),输出调度器向输入端口 3 发送授权信号。输入端口 3 接到授权后,返回接受信号至输出端口 2。完成这一匹配过程后,输入调度器的指针更新到 3,输出调度器的指针更新到 4,从而顺利完成此次匹配。

1.3 算法执行过程

lp-QPS 算法的执行过程如图 3 所示。该算法为

“请求—判断—授权—接受”,具体步骤如下:

1)请求。在第 t 时隙,未匹配的输入端口会向非空 VOQ 所对应的输出端口发送请求信号。其中,请求信号中包含 (R, L) 信息。 $R = m_i / m$, m_i 表示输入端口 i 中 N 个 VOQ 各自的信元数量, m 表示输入端口 i 中 N 个 VOQ 中的信元总数量; V_{ij} 为从输入端口 i 去往输出端口 j 的信元数量。

2)判断。输出端口 j 接收到输入端口 i 发送的请求信号后,首先判断是否有 VOQ 队列长度大于/等于门限阈值的请求,对 VOQ 队列长度达到门限阈值 $L_{\max}$ 的那些输入端口做出响应,向拥有最长队列的请求发送授权信号;若存在多个最长队列则采用轮询(RR)策略,则从当前轮询指针位置开始查找,并向找到的第一个最长队列对应的请求输入端口发送授权信号。若没有 VOQ 队列达到门限阈值,则直接跳过此步骤。

3)授权。已经匹配成功的端口不再参与此步骤,输出端口在所有接收到的请求信号中,优先对 R 最大的输入端口授权,如果有多个最大的 R ,则从中选取最长 L 的输入端口优先授权,如果出现多个最长 L ,则按照 RR 规则,从轮询指针当前位置开始轮询查找,对找到的第一个最长 L 请求输入端口进行授权。

4)接受。未匹配的输入端口 i 接收到授权信号,从所有授权端口中选取有最长 L 的 VOQ 对应的输出端口 j 进行接受,如果出现多个最长 L ,则按照 RR 规则,从轮询指针当前位置开始轮询查找,对找到的第一个最长 L 输出端口进行接受。只有在第一次迭代且匹配成功时才将轮询指针指向下一个端口,否则指针保持不变。

2 仿真平台设计与流量模型

为了测试 lp-QPS 算法的性能,本文自主设计了

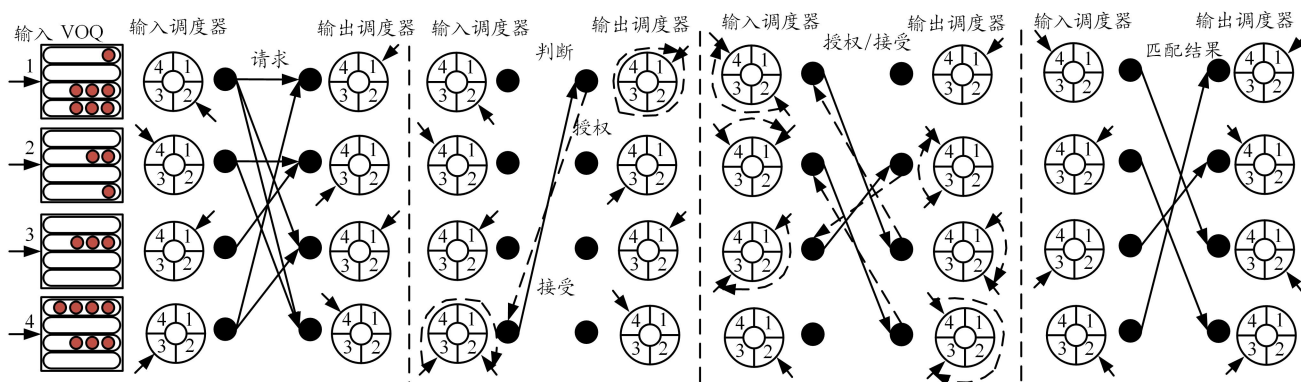


图2 lp-QPS 算法匹配过程

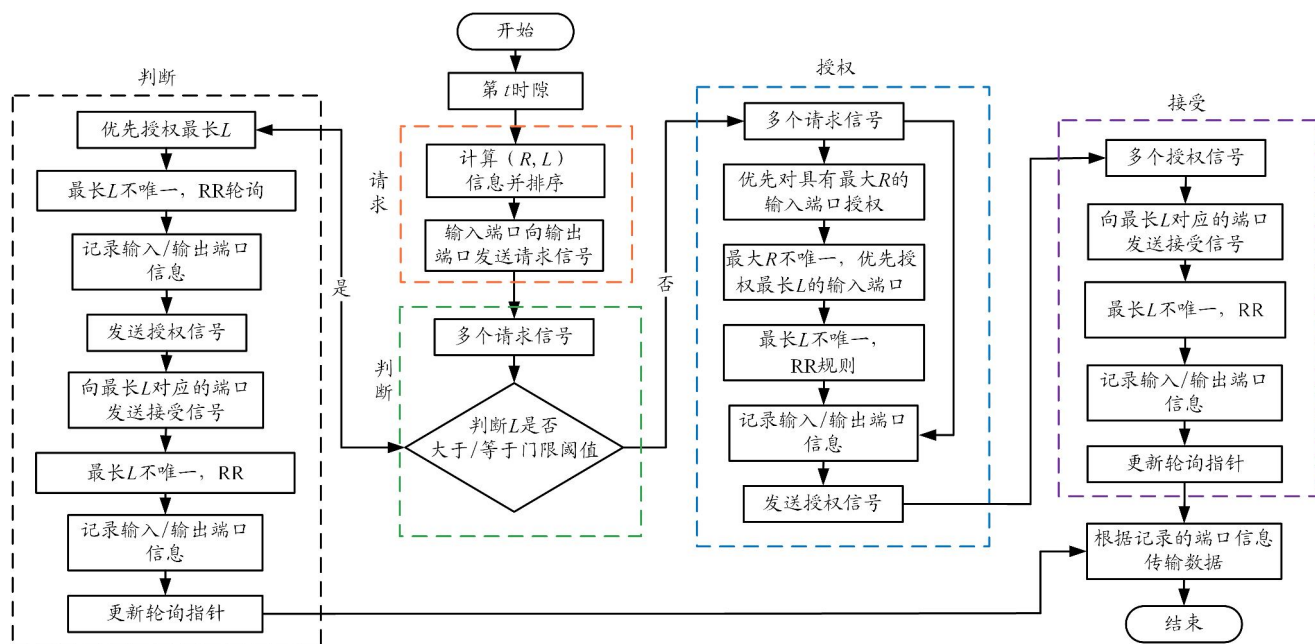


图3 lp-QPS 算法执行过程

一款数据仿真实验平台,使用C语言进行实现。该平台可以模拟2种信元到达过程和4种流量分布模型对算法进行仿真测试。

2.1 仿真平台设计

本文数据仿真实验平台采用模块化的设计方法,将整个调度系统分为流量模块、统计模块、IQ模块、交换结构和调度算法模块、数据收集及分析模块。仿真结构模型图如图4所示。在运行时,信元发生器根据信元到达过程生成信元。这些信元进入输入端口后,依据流量分布模型在IQ模块中排队。随后,交换结构模块按照调度算法将信元输出。统计模块负责收集并统计各个模块的信元信息,而数据收集及分析模块则对统计模块所收集的信息进行详细分析,并最终以文本形式输出分析结果。

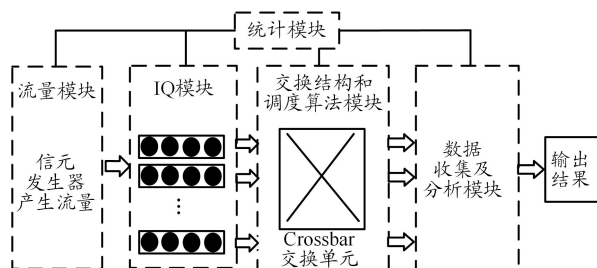


图4 仿真结构模型图

在仿真平台的设计中,每个模块单元都运用了面向对象技术,通过不同的类和对象进行封装,确保了各个模块具备独立的功能与接口。用户可以根据实际需求,灵活地组合多种类型的对象,以构建适应不同

业务流量或调度算法的仿真验证平台。当需要在不同的业务场景或调度策略间切换时,仅需调整相关模块,无需改动其它部分,这不仅有助于实现高效的对比分析,还避免了软件的重复开发,显著降低了工作量。

2.2 流量模型

在仿真平台中,为了全面评估到达输入端口的业务流特性,本文采用了2个关键性能指标:信元到达输入端口的随机过程和信元目的端口地址分布。同时考虑了独立同分布(Bernoulli分布)到达和突发到达这2种不同的到达过程,并在这2种到达模式下,分别应用了4种端口地址分布模型进行深入分析,包括均匀流量分布模型、强对角流量分布模型、弱对角流量分布模型、热点流量分布模型、突发均匀流量模型、突发强对角流量模型、突发弱对角流量模型以及突发热点流量模型。通过这8种不同的流量模型组合,对算法的性能进行了仿真测试,以确保评估结果的全面性和准确性。

3 实验环境及性能分析

3.1 实验环境

本文在8种流量模型下进行仿真实验,分析lp-QPS算法性能,并与具有代表性的几种迭代调度算法(iSLIP、HRF、GA、E2B、tvp-RRM和PMQF-iSLIP)的延时性能进行比较。

本文采用了一个32×32交换机的仿真模型,并设定VOQ缓存为无限大容量,确保在任何输入端口都

杨佳宁, 苏皓, 王一, 等: 一种基于时间触发光纤通道的 lp-QPS 算法

不会发生丢包, 所有算法均能实现 100% 的吞吐率。每个 VOQ 独立运作, 不共享缓存资源。仿真过程涵盖了 10^6 个时隙, 每种算法均进行了 4 次迭代, 以确保结果的稳健性和可靠性。此外, 还纳入了 OQ 算法的仿真测试, 为延时性能提供下界参考。在热点流量模型中, 热点系数设定为 0.5; 在 Bernoulli 到达过程下, 算法阈值设为 20。对于突发到达过程, 负载因子设为 0.75, 突发长度范围在 8~512 之间, 算法阈值则为突发长度的一半。最终, 通过引入 OQ 算法的仿真结果, 为平均延时提供了下界基准。

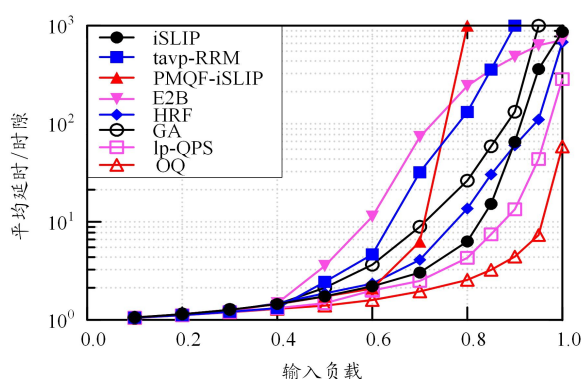
3.2 Bernoulli 到达过程

在 Bernoulli 到达过程下, 本文利用均匀流量、强对角流量、弱对角流量及热点流量这 4 种模型对不同调度算法进行仿真分析。结果如图 5 所示。lp-QPS 算法在 4 种流量模型下均实现了 100% 的吞吐率。从图 5(a) 可知, 在均匀流量模型下, 低负载时各算法延时相近; 但随着负载增加, lp-QPS 算法的平均延时显著低于其它算法。当负载为 1.0 时, 其延时比 HRF 和 E2B 算法减少 50% 以上。从图 5(b) 可知, 在强对角流量模型下, 当负载小于 0.7 时, 算法间延时差异小于 8 个时隙; 但负载超过 0.7 后, 延时迅速增加。当负载为 0.8 时, GA 算法的平均时延接近 10^3 , 因此其平均延时约为 1 000 个时隙, 特别是 lp-QPS 算法在负载为 1.0 时, 根据仿真具体数据可知, 其延时为 564 个时隙, 表现最佳。从图 5(c) 可知, 在弱对角流量模型下, lp-QPS 算法延时最低, 整体性能最优。当负载超 0.6 时, GA 算法和 iSLIP 算法延时激增, 远高于其它算法; 当负载达 0.9 时, 仅 PMQF-iSLIP、E2B 和 lp-QPS 算法延时较低, lp-QPS 表现最佳。从图 5(d) 可知, 在热点流量模型下, 所有算法延时上升, 无算法能承受满负载 1。lp-QPS 算法仍表现最佳, 延时性能最优。GA 和 tavp-RRM 算法在负载低于 0.8 时延时已超 1 000 时隙, PMQF-iSLIP 和 iSLIP 在负载低于 0.9 时达此水平。当负载为 0.8 时, E2B、HRF 和 lp-QPS 算法延时最低, 其中 lp-QPS 略优, 且随负载增加, 其性能优势扩大, 显示出 lp-QPS 在热点流量和高负载条件下的强适应性和优调度性能。

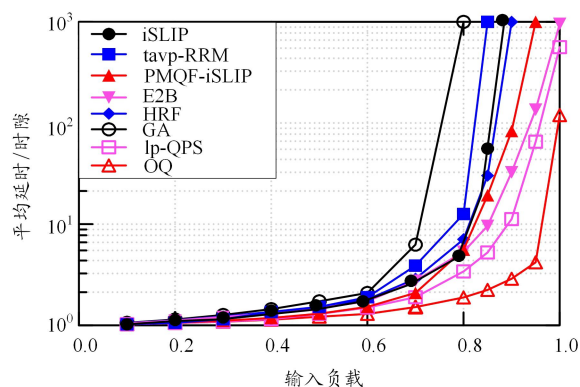
3.3 突发到达过程

在突发到达过程下, 本文利用均匀流量、强对角流量、弱对角流量及热点流量这 4 种模型对多种调度算法进行了仿真测试, 结果如图 6 所示。所有算法均实现了 100% 的吞吐率。

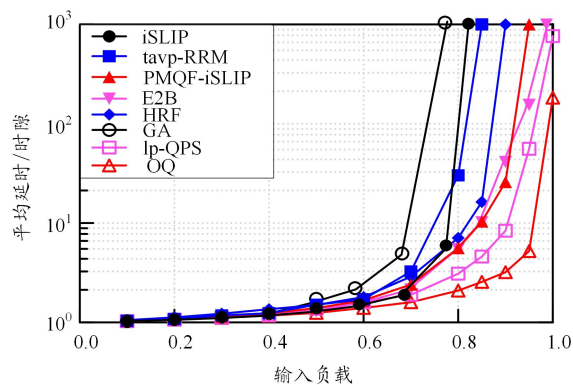
由图 6 可知, 除均匀流量模型外, lp-QPS 算法在其它 3 种流量模型下的延时性能均保持领先。在强对



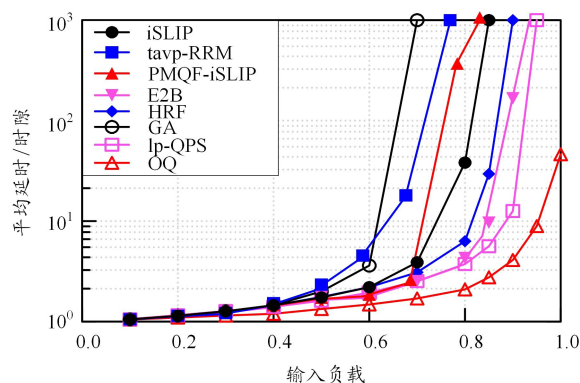
(a) 均匀流量模型下延时性能



(b) 强对角流量模型下延时性能

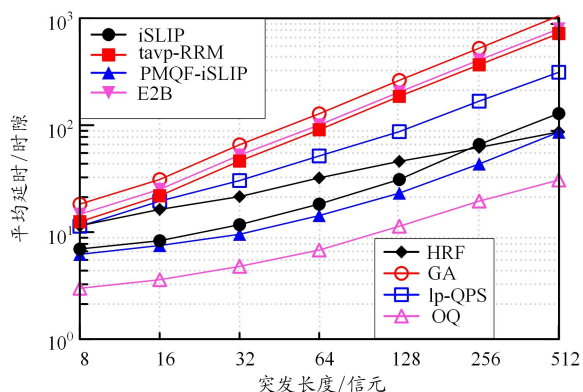


(c) 弱对角流量模型下延时性能

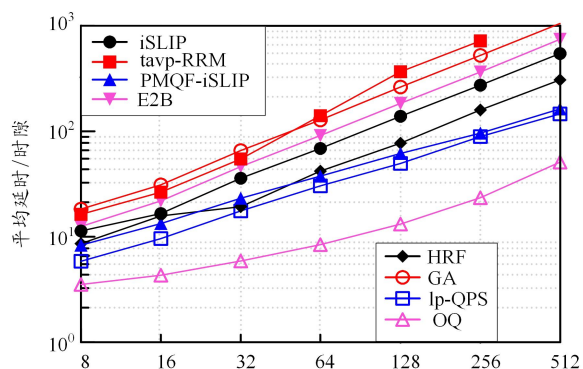


(d) 热点流量模型下延时性能

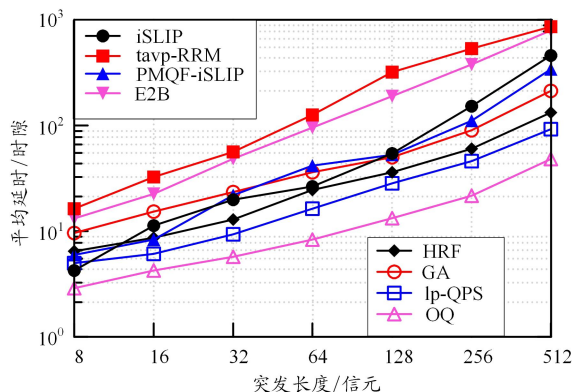
图 5 Bernoulli 到达下延时性能



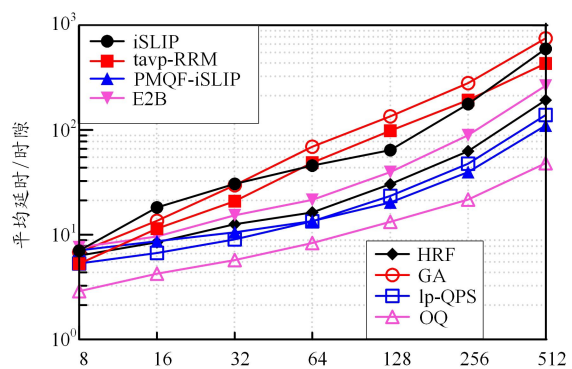
(a) 均匀流量模型下延时性能



(b) 强对角流量模型下延时性能



(c) 弱对角流量模型下延时性能



(d) 热点流量模型下延时性能

图6 不同算法的突发到达下延时性能

角流量和弱对角流量模型下,lp-QPS算法的优势尤为明显,这得益于其优先匹配队列长度达到门限阈值的策略,以及采用队列比例抽样的匹配方式,有效降低了丢包率和整体平均延时。在强对角流量模型下,lp-QPS算法在7个突发长度下的平均延时较PMQF-iSLIP算法提升了13%;在弱对角流量模型下,其优势随突发长度增加而愈发显著,当突发长度达到512信元时,lp-QPS算法相较于HRF算法的平均延时性能提升了27%。

在热点流量模型中,随着突发长度的增加,iSLIP、GA和tasp-RRM算法的平均延时急剧上升,而其它算法则表现相对平稳。当突发长度小于128信元时,lp-QPS算法的延时性能最佳;但当突发长度超过128信元后,其平均延时略高于PMQF-iSLIP算法。

3.4 公平性分析

为了分析算法的公平性,本文引入了公平性指数(FI)对算法的公平性进行评价。FI为0~1,FI越大,表示输入端口各VOQ之间的平均延时差距越小,其公平性越好,计算公式如式(1)所示。

$$G_{FI} = \frac{\left(\sum_{j=1}^n D_j \right)^2}{n \left(\sum_{j=1}^n D_j^2 \right)} \quad (1)$$

其中, G_{FI} 为FI的值, n 为输入端口VOQ的总数量, D_j 为 j 个输入端口VOQ的平均延时。

本文主要评估了所提算法在Bernoulli均匀流量、Bernoulli热点流量及突发均匀流量3种模型下的公平性表现。当负载为0.8时,各算法的FI如表1所示。可以看出,在Bernoulli均匀流量模型下,所有算法均展现出高公平性,FI超过99.9%,其中PMQF-iSLIP和lp-QPS算法表现尤为卓越,FI高达99.99%。对于Bernoulli热点流量模型,E2B算法公平性最佳,而lp-QPS算法虽略逊于E2B,但仍优于其它算法。在突发均匀流量

表1 3种流量模型下不同算法的FI对比

流量模型	FI/%					
	iSLIP	tasp-RRM	PMQF-iSLIP	E2B	HRF	GA
Bernoulli 均匀	99.98	99.96	99.99	99.98	99.97	99.95
Bernoulli 热点	98.71	98.63	99.62	99.87	98.83	99.36
突发 均匀	97.91	98.72	99.31	99.53	99.68	98.23

杨佳宁,苏皓,王一,等:一种基于时间触发光纤通道的 lp-QPS 算法

模型中,lp-QPS 算法公平性表现最优,FI 最高,较表现最差的 iSLIP 算法高出 1.97%。综上所述,尽管 lp-QPS 算法未能在所有流量模型中均取得最佳公平性,但其在 3 种不同流量模型下的 FI 均超过 99.7%,相较于其它算法,展现出更高的稳定性和改进的公平性。

4 结束语

针对采用 IQ 结构的传统算法在非均匀业务流量下吞吐率低、延时高的问题,本文提出了 lp-QPS 算法,并详细介绍了其设计原理与实现流程。该算法通过队列比例抽样值对各端口进行循环匹配调度,以优化不同流量模式下的调度策略。最后,在多种流量模型下进行了仿真测试,并与现有几种调度算法进行了性能对比。实验结果表明:lp-QPS 算法不仅在均匀流量条件下能实现 100% 的吞吐率,而且在均匀及非均匀流量条件下的延时性能均超越传统算法。特别是在负载为 0.8 时,3 种流量模型的 FI 均超过 99.7%。此外,lp-QPS 算法在保持高吞吐率的同时,显著降低了延时,并提供了更优的公平性。因此,与现有调度算法相比,lp-QPS 算法展现出了在不同网络环境下的卓越性能和更强适应性,为光纤通信交换机性能的提升提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 张志超. 时间触发光纤网络交换机的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2023.
- [2] 姜强. FC 交换机调度算法研究与实现 [D]. 成都:电子科技大学,2011.
- [3] 孙雪,曹素芝,许辉. FC 交换机中多优先级变长 CROSSBAR 调度策略[J]. 光通信技术,2018,42(12):15-19.
- [4] MEKKITTIKUL A, MCKEOWN N. A starvation-free algorithm for achieving 100% throughput in an input-queued switch[C]//IEEE. Proceedings of International Conference on Communication Networks. Las Vegas: IEEE, 1996, 96: 226-231.
- [5] MCKEOWN N, MEKKITTIKUL A, ANANTHARAM V, et al. Achieving 100% throughput in an input-queued switch[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(8): 1260-1260.
- [6] MCKEOWN N, MEKKITTIKUL A, ANANTHARAM V, et al. Achieving 100% throughput in an input-queued switch[J]. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(8): 1260-1260.
- [7] 吴博豪. 基于深度强化学习的最大权重匹配问题研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2023.
- [8] 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.
- [9] MCKEOWN N, VARAIYA P, WALRAND J. Scheduling cells in an input-queued switch[J]. Electronics Letters, 1993, 29(25): 2174-2175.
- [10] MCKEOWN N. The iSLIP scheduling algorithm for input-queued switches[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(2): 188-201.
- [11] 冉成,苏皓,孙晔,等. 基于 CIOQ 架构改进 iSLIP 调度算法的研究[J]. 计算机仿真,2024,41(4):325-329,417.
- [12] CHAO J. Saturn: a terabit packet switch using dual round-robin[J]. IEEE Communications Magazine: Articles, News, and Events of Interest to Communications Engineers, 2000, 38(12): 78-84.
- [13] 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.
- [14] HU B, FAN F, 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.
- [15] DEVI R C, FLORINABEL D J, PRASANTH N. High throughput scheduling algorithms for input queued packet switches[J]. CMC-Computers Materials & Continua, 2022, 70(1): 1527-1540.
- [16] 白焱,孙万录,宋平,等. 基于时间触发光纤通道网络的交换调度算法[J]. 电子科技大学学报,2022,51(3):392-396.
- [17] COHEN I, SCALOSUB G. Queueing in the mist: buffering and scheduling with limited knowledge[J]. Computer Networks, 2018, 147: 204-220.
- [18] AL-BAWANI K, ENGLERT M, WESTERMANN M. Online packet scheduling for CIOQ and buffered crossbar switches[C]//ACM. Proceedings of the 28th ACM Symposium on Parallelism in Algorithms and Architectures. Boston: ACM, 2016: 241-250.
- [19] 魏利华,唐玉华. Crossbar 输入排队调度算法的研究[J]. 计算机应用与软件,2006(3):22-24,66.
- [20] 景志勇,方娜,王珏. 基于输入排队的最大匹配调度算法仿真分析[J]. 郑州轻工业学院学报(自然科学版),2011,26(3):88-91.